ATMIRE

Title	Diseño de Concreto Sostenible con Vidrio Molido Reciclado y Humo de Sílice para la Reducción del Consumo de Arena y Cemento en Lima Metropolitana
Item Type	https://purl.org/coar/resource_type/c_7a1f
Authors	Ccente Sedano, Kevin Meyer;Tello Taype, Jhon Newton
Publisher	Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)
Rights	https://purl.org/coar/access_right/c_abf2
Download date	2026-11-27 18:43:15
Item License	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Link to Item	https://hdl.handle.net/10757/691325

UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Diseño de Concreto Sostenible con Vidrio Molido Reciclado y Humo de Sílice para la Reducción del Consumo de Arena y Cemento en Lima Metropolitana

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Ccente Sedano, Kevin Meyer	0009-0009-0530-7857
Tello Taype, Jhon Newton	0009-0004-8382-4335

ASESOR(ES)

Eyzaguirre Acosta, Carlos Augusto	0000-0001-9769-2135

Lima, 26 de junio de 2026

DEDICATORIA

Kevin Meyer Ccente Sedano:

Dedico el presente trabajo a mis padres, Teodoro Ccente Aguilar y Celestina Sedano Llancari, quienes me brindaron su respaldo incondicional a lo largo de toda mi formación académica y fueron el pilar fundamental en cada etapa de este camino; a mi familia, que siempre creyó en mí y me acompañó con confianza y aliento; y a mis amigos, quienes estuvieron presentes en cada momento, con su compañía, su tiempo y su energía, motivándome a seguir adelante. A todas estas personas, mi más profundo agradecimiento, pues hicieron posible el cumplimiento de este objetivo y forman parte esencial de este logro.

Jhon Newton Tello Taype:

Dedico el presente trabajo a mi familia, por su apoyo constante, comprensión y confianza a lo largo de mi formación profesional, siendo el principal impulso para culminar esta etapa académica. Asimismo, dedico esta investigación a todas las personas que, directa o indirectamente, contribuyeron con su orientación, conocimientos y motivación durante el desarrollo de esta tesis, fortaleciendo mi compromiso con la ingeniería y con la búsqueda de soluciones sostenibles para la sociedad.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que nos acompañaron y apoyaron a lo largo del desarrollo de esta investigación, así como durante nuestra formación profesional.

En primer lugar, agradecemos sinceramente a nuestras familias, por ser nuestro mayor sostén en este camino. Su amor, comprensión, sacrificio y confianza en nosotros fueron fundamentales para seguir adelante, incluso en los momentos más exigentes. Sin su apoyo incondicional, este logro no habría sido posible.

Extendemos nuestro reconocimiento a nuestro asesor y a los docentes de la Universidad, quienes nos guiaron con paciencia y compromiso durante el proceso de investigación. Sus observaciones, correcciones y sugerencias aportaron significativamente al fortalecimiento de este trabajo.

Agradecemos también a la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC) por brindarnos una formación académica de calidad y las herramientas necesarias para afrontar los desafíos del mundo profesional. Asimismo, reconocemos el apoyo brindado por los laboratorios de Ingeniería Civil, donde se desarrolló la fase experimental de esta investigación.

No podemos dejar de mencionar a nuestros compañeros de carrera, quienes compartieron con nosotros horas de estudio, discusiones, prácticas y aprendizajes. Su compañía y solidaridad fueron parte importante de esta etapa.

Finalmente, a todas aquellas personas que, de forma directa o indirecta, aportaron con su tiempo, conocimientos, motivación o colaboración a la culminación de esta investigación, les extendemos nuestro más sincero agradecimiento.

RESUMEN

La presente investigación aborda la problemática del consumo indiscriminado de arena natural y cemento en la industria del concreto en Lima Metropolitana, materiales cuya explotación genera impactos ambientales significativos. El estudio tuvo como objetivo diseñar y evaluar mezclas de concreto sostenible mediante el reemplazo parcial del agregado fino natural por vidrio molido reciclado y del cemento por humo de sílice, analizando su desempeño técnico, económico y ambiental en comparación con un concreto convencional de resistencia característica f'c = 280 kg/cm².

La metodología empleada fue de tipo experimental con enfoque cuantitativo, desarrollándose diversos diseños de mezcla bajo un esquema comparativo con mezcla patrón, que incorporaron sustituciones progresivas de vidrio molido en proporciones de 10 %, 15 % y 20 %, así como una sustitución del 10 % de cemento por humo de sílice. Las mezclas fueron evaluadas mediante ensayos en estado fresco, que incluyeron asentamiento, temperatura y contenido de aire, y en estado endurecido, mediante ensayos de resistencia a compresión y flexión a 7, 14 y 28 días, conforme a las normas técnicas vigentes.

Los resultados evidenciaron que los diseños combinados HS10V15 y HS10V20 presentan el mejor desempeño integral. En particular, el diseño HS10V15 alcanzó una resistencia a compresión de 345.60 kg/cm² y una resistencia a flexión de 64.20 kg/cm² a los 28 días, superando al concreto patrón, al tiempo que permitió reducir, a escala de investigación, 112.68 kg/m³ de arena y 38.57 kg/m³ de cemento. A partir de estos valores reales, se estimó que, a escala de proyecto, este diseño podría disminuir significativamente el consumo de materiales, y que, a nivel regional, su aplicación tendría el potencial de generar una reducción sustancial en la extracción de recursos naturales y en las emisiones asociadas a la producción de cemento.

Se concluye que la incorporación de vidrio molido reciclado y humo de sílice constituye una alternativa técnica y ambientalmente viable para la producción de concreto sostenible en Lima Metropolitana, manteniendo e incluso mejorando su desempeño mecánico.

Palabras clave: Concreto sostenible; vidrio molido reciclado; humo de sílice; diseño de mezclas; resistencia mecánica; sostenibilidad ambiental.

Sustainable Concrete Design with Recycled Ground Glass and Silica Fume for Reducing Sand and Cement Consumption in Metropolitan Lima

ABSTRACT

This research addresses the issue of the indiscriminate consumption of natural sand and cement in the concrete industry in Metropolitan Lima, materials whose extraction generates significant environmental impacts. The objective of the study was to design and evaluate sustainable concrete mixtures through the partial replacement of natural fine aggregate with recycled ground glass and of cement with silica fume, analyzing their technical, economic, and environmental performance in comparison with a conventional concrete with a characteristic compressive strength of f'c = 280 kg/cm².

An experimental methodology with a quantitative approach was employed, developing several mix designs under a comparative scheme with a control mixture. The proposed mixtures incorporated progressive substitutions of ground glass at 10%, 15%, and 20%, as well as a 10% replacement of cement with silica fume. The mixtures were evaluated through fresh-state tests, including slump, temperature, and air content, and hardened-state tests, including compressive and flexural strength at 7, 14, and 28 days, in accordance with current technical standards.

The results showed that the combined designs HS10V15 and HS10V20 exhibited the best overall performance. In particular, the HS10V15 mix achieved a compressive strength of 345.60 kg/cm² and a flexural strength of 64.20 kg/cm² at 28 days, surpassing the control concrete, while reducing, at the research scale, 112.68 kg/m³ of sand and 38.57 kg/m³ of cement. Based on these actual values, it was estimated that, at the project scale, this design could significantly reduce material consumption, and that, at the regional level, its application would have the potential to generate a substantial reduction in the extraction of natural resources and in the emissions associated with cement production.

It is concluded that the incorporation of recycled ground glass and silica fume constitutes a technically and environmentally viable alternative for the production of sustainable concrete in Metropolitan Lima, maintaining and even improving its mechanical performance.

Keywords: Sustainable concrete; recycled ground glass; silica fume; mix design; mechanical strength; environmental sustainability.

u20201b964_Ccente Sedano, Kevin Meyer_Diseño de Concreto Sostenible con Vidrio Molido Rec Humo de Sílice para la Reducción del Consumo de Arena y Cemento en Lima Metropolitana

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%	21%	8%	7%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUD

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net	Fuente de Internet
2	repositorioacademico.upc.edu.pe	Fuente de Internet
3	repositorio.uss.edu.pe	Fuente de Internet
4	Submitted to Universidad Cesar Vallejo	Trabajo del estudiante
5	repositorio.unc.edu.pe	Fuente de Internet
6	repositorio.urp.edu.pe	Fuente de Internet
7	upc.aws.openrepository.com	Fuente de Internet
8	Submitted to Universidad Ricardo Palma	Trabajo del estudiante
9	Submitted to Universidad Tecnologica del Peru	Trabajo del estudiante
10	repositorio.continental.edu.pe	Fuente de Internet
11	ri.ues.edu.sv	Fuente de Internet
12	Submitted to uncedu	Trabajo del estudiante
13	Submitted to Universidad Santo Tomas	Trabajo del estudiante
14	Submitted to Universidad Católica de Santa María	Trabajo del estudiante
	repositorio.unal.edu.co	

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN 1

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 1

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 7

1.3. JUSTIFICACIÓN 7

1.4. HIPÓTESIS 8

1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 9

1.5.1. Objetivo general 9

1.5.2. Objetivos específicos 9

1.6. INDICADORES DE MEDICIÓN DEL PROBLEMA 9

CAPITULO 2. ESTADO DEL ARTE 11

CAPITULO 3. MARCO TEÓRICO 13

3.1. CONCRETO 13

3.1.1. Concreto simple 14

3.1.2. Concreto reforzado 14

3.1.3. Concreto permeable 14

3.1.4. Concreto sostenible 14

3.2. AGREGADOS 15

3.2.1. Agregado fino 15

3.2.2. Agregado grueso 15

3.2.3. Propiedades del agregado 15

3.3. MATERIALES ALTERNATIVOS EN CONCRETO 16

3.3.1. Humo de sílice 16

3.3.2. Vidrio molido reciclado 17

3.4. NORMATIVA TÉCNICA APLICABLE 18

3.4.1. Norma Técnica Peruana (NTP) 18

3.4.2. American Society for Testing and Materials (ASTM) 19

CAPITULO 4. METODOLOGÍA 20

4.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN 20

4.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN 20

4.3. PROCESO DE EXPERIMENTACIÓN 20

4.3.1. Recolección de materiales 21

4.3.2. Caracterización de materiales 21

4.3.3. Diseño de mezclas de concreto *21*
4.3.4. Ensayos en estado fresco y endurecido *22*
4.3.5. Análisis de resultados *23*

CAPITULO 5. DESARROLLO **25**
5.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES 25
5.1.1. Agregados *25*
5.1.2. Vidrio molido *33*
5.1.3. Cemento *35*
5.1.4. Aditivo superplastificante *36*
5.1.5. Humo de sílice *37*
5.2. PROCEDIMIENTO DE DOSIFICACIÓN 38
5.2.1. Diseño del concreto patrón *38*
5.2.2. Diseño V15 – 15% vidrio *43*
5.2.3. Diseño V20 – 20% vidrio *43*
5.2.4. Diseño V25 – 25% vidrio *44*
5.2.5. Diseño HS 10 – 10% humo de sílice *44*
5.2.6. Diseño HS 10 V15 – 10% humo de sílice + 15% vidrio *45*
5.2.7. Diseño HS 10 V20 – 10% humo de sílice + 20% vidrio *45*
5.3. ENSAYOS DE CONCRETO 46
5.3.1. Ensayos en estado fresco *47*
5.3.2. Ensayos en estado endurecido *58*

CAPITULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS **75**
6.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS TÉCNICO 75
6.1.1. Concreto fresco *75*
6.1.2. Concreto endurecido *80*
6.2. ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL 84
6.3. ANÁLISIS DEL IMPACTO ECONÓMICO 90

CAPITULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES **97**
7.1. CONCLUSIONES 97
7.2. RECOMENDACIONES 101

REFERENCIAS **105**
ANEXOS **113**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Indicadores de medición del problema 10

Tabla 2 Análisis granulométrico - Agregado Grueso 26

Tabla 3 Análisis granulométrico - Agregado fino 26

Tabla 4 Peso unitario suelto – Agregado grueso 30

Tabla 5 Peso unitario compactado – Agregado grueso 30

Tabla 6 Peso unitario suelto – Agregado fino 30

Tabla 7 Peso unitario compactado – Agregado fino 30

Tabla 8 Peso específico y porcentaje de absorción del agregado grueso 31

Tabla 9 Peso específico y porcentaje de absorción del agregado fino 32

Tabla 10 Contenido de humedad del agregado grueso 33

Tabla 11 Contenido de humedad del agregado fino 33

Tabla 12 Análisis granulométrico - Vidrio molido reciclado 34

Tabla 13 Caracterización del agregado grueso, fino y cemento 39

Tabla 14 Volumen unitario de agua 40

Tabla 15 Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto 41

Tabla 16 Volumen de material por metro cúbico sin considerar el agregado fino 42

Tabla 17 Proporciones de materiales para el diseño de concreto patrón 43

Tabla 18 Diseño de concreto con un reemplazo de 15% de vidrio molido 43

Tabla 19 Diseño de concreto con un reemplazo de 20% de vidrio molido 44

Tabla 20 Diseño de concreto con un reemplazo de 25% de vidrio molido 44

Tabla 21 Diseño de concreto con un reemplazo de 10% humo de sílice 45

Tabla 22 Diseño de concreto con un reemplazo de 10% humo de sílice y 15% vidrio 45

Tabla 23 Diseño de concreto con un reemplazo de 10% humo de sílice y 20% vidrio 46

Tabla 24 Dosificación de materiales corregidas humedad y absorción de los agregados 46

Tabla 25 Secuencia de mezclado para la elaboración de concreto 47

Tabla 26 Resultado de temperatura por la NTP 339.184 del concreto patrón 49

Tabla 27 Resultado de temperatura por la NTP 339.184 del concreto con 15% de vidrio 49

Tabla 28 Resultado de temperatura por la NTP 339.184 del concreto con 20% de vidrio ……..49

Tabla 29 Resultado de temperatura por la NTP 339.184 del concreto con 25% de vidrio ……..49

Tabla 30 Resultado de temperatura por la NTP 339.184 del concreto con 10% de humo de sílice ……..49

Tabla 31 Resultado de temperatura por la NTP 339.184 del concreto con 10% de humo de sílice y 15% de vidrio 50

Tabla 32 Resultado de temperatura por la NTP 339.184 del concreto con 10% de humo de sílice y 20% de vidrio 50

Tabla 33 Resumen de los datos de temperatura por la NTP 339.184 50

Tabla 34 Resultado del ensayo de asentamiento por la NTP 339.035 del concreto patrón ……..52

Tabla 35 Resultado del ensayo de asentamiento por la NTP 339.035 del concreto con 15% de vidrio ……..53

Tabla 36 Resultado del ensayo de asentamiento por la NTP 339.034 del concreto con 20% de vidrio ……..53

Tabla 37 Resultado del ensayo de asentamiento por la NTP 339.035 del concreto con 25% de vidrio ……..53

Tabla 38 Resultado del ensayo de asentamiento por la NTP 339.035 del concreto con 10% de humo de sílice.....53

Tabla 39 Resultado del ensayo de asentamiento por la NTP 339.035 del concreto con 10% de humo de sílice y 15% de vidrio 54

Tabla 40 Resultado del ensayo de asentamiento por la NTP 339.035 del concreto con 10% de humo de sílice y 20% de vidrio 54

Tabla 41 Resumen de los datos del ensayo de asentamiento por la NTP 339.035 54

Tabla 42 Resultado del ensayo de contenido de aire por la NTP 339.083 del concreto patrón ……..56

Tabla 43 Resultado del ensayo de contenido de aire por la NTP 339.083 del concreto con 15% de vidrio.....57

Tabla 44 Resultado del ensayo de contenido de aire por la NTP 339.083 del concreto con 20% de vidrio.....57

Tabla 45 Resultado del ensayo de contenido de aire por la NTP 339.083 del concreto con 25% de vidrio.....57

Tabla 46 Resultado del ensayo de contenido de aire por la NTP 339.083 del concreto con 10% de humo de sílice.....57

Tabla 47 Resultado del ensayo de contenido de aire por la NTP 339.083 del concreto con 10% de humo de sílice y 15 % de vidrio 58

Tabla 48 Resultado del ensayo de contenido de aire por la NTP 339.083 del concreto con 10% de humo de sílice y 20 % de vidrio 58

Tabla 49 Resumen de los datos del ensayo de contenido de aire por la NTP 339.08358

Tabla 50 Número de muestras elaborados.....62

Tabla 51 Resultados de los ensayos de resistencia a compresión - 7 días según la NTP 339.078 ……..64

Tabla 52 Resultados de los ensayos de resistencia a compresión - 14 días según la NTP 339.078 ……..65

Tabla 53 Resultados de los ensayos de resistencia a compresión - 28 días según la NTP 339.078 ……..66

Tabla 54 Resumen de resultados de los ensayos de resistencia a compresión según la NTP 339.078 ……..67

Tabla 55 Resultados de los ensayos de resistencia a flexión – 7 días según la NTP 339.078 ……..70

Tabla 56 Resultados de los ensayos de resistencia a flexión – 14 días según la NTP 339.078 ……..71

Tabla 57 Resultados de los ensayos de resistencia a flexión – 28 días según la NTP 339.078 ……..72

Tabla 58 Resumen de resultados de los ensayos de resistencia a flexión según la NTP 339.078 ……..73

Tabla 59 Disminución de arena y cemento en concreto de columnas con el diseño de mezcla HS10V15 tomando de referencia la obra “Vivienda Colectiva para el Adulto Mayor – Etapa 1” ……..89

Tabla 60 Disminución de cantidad de producción de arena y cemento si se implementara el diseño HS10V15 basado en estadística del INEI en 2023 en Lima Metropolitana. ……..90

Tabla 61 Precio de producción por m^3 del diseño patrón.....90

Tabla 62 Precio de producción por m^3 del diseño con 15% vidrio 91

Tabla 63 Precio de producción por m^3 del diseño con 20% vidrio 91

Tabla 64 Precio de producción por m^3 del diseño con 25% vidrio 92

Tabla 65 Precio de producción por m^3 del diseño con humo de sílice 10%.....93

Tabla 66 Precio de producción por m^3 del diseño con humo de sílice 10% + 15% vidrio ……..93

Tabla 67 Precio de producción por m^3 del diseño con humo de sílice 10% + 20% vidrio ……..94

Tabla 68 Comparativa de precios de producción por m^3 de los diseños 95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Contribución al crecimiento global de la construcción 2020-2030.....1

Figura 2 Producción de arena en Perú desde el 2020-2024 P/.....3

Figura 3 Producción de arena en Lima desde el 2020-2024 P/.....4

Figura 4 Producción de cemento en Lima desde el 2021-2024 P/.....6

Figura 5 Árbol del problema del consumo indiscriminado de arena y cemento.....7

Figura 6 Flujograma que resume las etapas del proceso de la investigación.....24

Figura 7 Curva granulométrica del agregado grueso – huso 6 27

Figura 8 Curva del análisis granulométrico de agregado fino 28

Figura 9 Curva del análisis granulométrico del vidrio molido reciclado.....35

Figura 10 Cemento portland tipo HS Andino Ultra 36

Figura 11 Aditivo plastificante Sikacem.....37

Figura 12 Microsilice Sikafume de 25kg.....38

Figura 13 Prueba de temperatura en el concreto fresco 48

Figura 14 Ensayo de asentamiento 52

Figura 15 Ensayo de contenido de aire en el concreto fresco.....56

Figura 16 Muestras de probetas y vigas de concreto para su posterior ensayo 61

Figura 17 Ensayo de resistencia a compresión de concreto.....63

Figura 18 Resultados de los ensayos de resistencia a compresión - 7 días según la NTP 339.07 ……..65

Figura 19 Resultados de los ensayos de resistencia a compresión - 14 días según la NTP 339.078 ……..66

Figura 20 Resultados de los ensayos de resistencia a compresión - 28 días según la NTP 339.078 ……..67

Figura 21 Ensayo de resistencia a flexión de concreto 69

Figura 22 Resultados de los ensayos de resistencia a flexión – 7 días según la NTP 339.078 ……..71

Figura 23 Resultados de los ensayos de resistencia a flexión – 14 días según la NTP 339.078 ……..72

Figura 24 Resultados de los ensayos de resistencia a flexión – 28 días según la NTP 339.078 ……..73

Figura 25 Temperatura de los cuatro diseños de concreto en estado fresco según la NTP 339.184 ……..76

Figura 26 Asentamiento de los cuatro diseños de concreto en estado fresco según la NTP 339.035 ……..77

Figura 27 Contenido de aire de los cuatro diseños de concreto en estado fresco según la NTP 339.083 ……..79

Figura 28 Resultados del ensayo a compresión de todos los diseños de concreto.....80

Figura 29 Resultados del ensayo de resistencia de flexión de todos los diseños de concreto ……..82

Figura 30 Cantidad de material usado en el diseño Patrón.....85

Figura 31 Cantidad de material reemplazado con el diseño V15 respecto el diseño Patrón ……..85

Figura 32 Cantidad de material reemplazado con el diseño V20 respecto el diseño Patrón ……..86

Figura 33 Cantidad de material reemplazado con el diseño V25 respecto el diseño Patrón ……..86

Figura 34 Cantidad de material reemplazado con el diseño HS10 respecto el diseño Patrón ……..86

Figura 35 Cantidad de material reemplazado con el diseño HS10V15 respecto el diseño Patrón ……..86

Figura 36 Cantidad de material reemplazado con el diseño HS10V20 respecto el diseño Patrón ……..87

Figura 37 Resumen de cantidad de material reemplazado en todos los diseños de mezcla ……..87

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Diseño de mezcla de concreto con reemplazo de vidrio reciclado (15%, 20% y 25%) en hoja de cálculo Excel. 113

Anexo 2 Ficha técnica del cemento Andino Ultra Tipo HS, proporcionada por UNACEM, que incluye sus propiedades físicas y químicas. 114

Anexo 3 Registro fotográfico del proceso de recolección de vidrio sodocálcico utilizado como material reciclado en la investigación. 114

Anexo 4 Registro fotográfico del proceso de pesaje de los materiales de acuerdo con el diseño de mezcla de concreto establecido. 115

Anexo 5 Registro fotográfico del proceso de preparación y mezclado del concreto. 116

Anexo 6 Registro fotográfico del ensayo de asentamiento (slump) del concreto. 116

Anexo 7 Registro fotográfico del ensayo de temperatura del concreto en estado fresco. .. 117

Anexo 8 Registro fotográfico del ensayo de contenido de aire del concreto en estado fresco…… 118

Anexo 9 Registro fotográfico de las muestras de concreto en laboratorio utilizadas en la investigación…… 119

Anexo 10 Registro fotográfico del proceso de ensayo de compresión del concreto endurecido…… 120

Anexo 11 Registro fotográfico del ensayo de resistencia a la flexión del concreto. 121

Anexo 12 Evidencia fotográfica del laboratorio de tecnología del concreto – UPC campus Villa…….. 121

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación busca abordar la problemática del consumo indiscriminado de materiales tradicionales, proponiendo alternativas sostenibles como el uso de vidrio molido reciclado y humo de sílice en la fabricación de concreto. A lo largo de este capítulo se plantea el problema de investigación, se describe su contexto, se formulan los objetivos, hipótesis e indicadores, y se justifica la relevancia del estudio tanto a nivel técnico como ambiental y social.

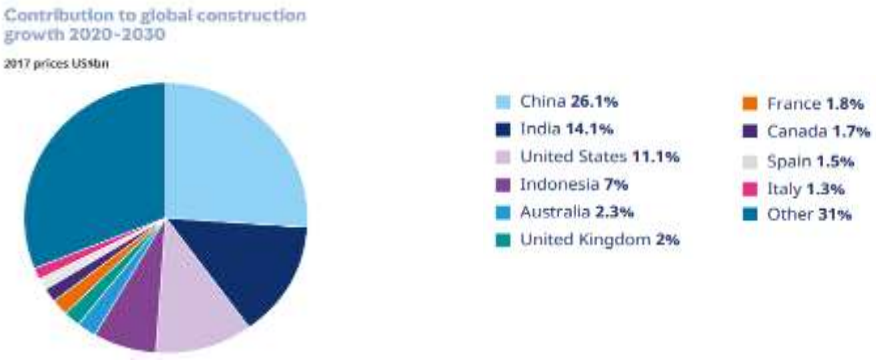
1.1. Descripción del problema

La creciente demanda de concreto en la industria de la construcción ha generado una sobreexplotación de agregados naturales como la arena y el cemento, provocando impactos ambientales significativos y riesgo de escasez futura (Aparicio, 2014).

La construcción es uno de los sectores más importantes a nivel mundial. Desde el comienzo de la década de 1980 la construcción vino desarrollándose a pasos agigantados, impulsando un aumento en la urbanización, desarrollo de infraestructuras y la expansión económica (Aparicio, 2014). Estos últimos años, el sector de la construcción representa aproximadamente el 13% del PBI mundial (Robinson et al., 2021). La contribución al crecimiento global de la construcción por países se puede apreciar en la Figura 1. Lo cual demuestra que la industria de la construcción es vital para el desarrollo económico y social.

Figura 1

Contribución al crecimiento global de la construcción 2020-2030



Nota. De "Future of construction", por G. Robinson, J. Leonard y T. Whittington, 2021 (https://www.marsh.com/es/industries/construction/insights/the-future-of-construction-report.html

Este trabajo originalmente fue publicado en Ccente, K., Tello, J., & Eyzaguirre, C. (2025). Ground Recycled Glass to Improve the Compressive Strength of Concrete. *International Journal of Civil Infrastructure (IJCI), 8*, 155–162. https://doi.org/10.11159/ijci.2025.016

El concreto se constituye como el material de construcción de mayor demanda global, compuesto esencialmente por cemento, agua y agregados. Su predominancia es tal que su consumo supera en una relación de diez a uno al del acero estructural, alcanzando una producción anual que sobrepasa los cinco mil millones de toneladas (Mehta & Monteiro, 2014). Esta cantidad demuestra la importancia del uso del material a nivel mundial. Sin embargo, su uso indiscriminado es preocupante porque está generando problemas en la adquisición de algunos de sus componentes.

El uso excesivo del concreto a nivel mundial nos está llevando a problemas de escasez de componentes como los agregados naturales, lo cual repercute en problemas medioambientales. Estos materiales son extraídos en grandes cantidades de canteras y lechos de ríos, lo cual está generando problemas de degradación de ecosistemas acuáticos y terrestres como la erosión del suelo y la pérdida de biodiversidad (International Resource Panel [IRP], 2024). En algunas partes del mundo, como en Dubái y Singapur, hay escasez de arena para el concreto, por la que es importada. Se estima que la producción de arena y grava en la construcción anualmente es entre 40 y 50 mil millones de toneladas en todo el mundo (United Nations Environment Programme [UNEP], 2019). A pesar de que contamos con gran cantidad de agregados a nivel mundial, con estas estadísticas alarmantes de consumo por año, debemos preocuparnos por su escasez y en buscar alternativas de solución.

En el entorno local, según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2025), la producción de arena a nivel nacional en el Perú ha mostrado un aumento considerable en los últimos años. En el año 2022, la producción total de arena alcanzó las 1 661 991 toneladas métricas, lo cual se expresa en la Figura 2. Este dato refleja la cantidad producida a nivel país, lo cual ha estado en constante crecimiento en los últimos años.

Figura 2

Producción de arena en Perú desde el 2020-2024 P/



Nota. El gráfico muestra la producción anual de arena a nivel nacional en el Perú. Adaptado de "Perú: Compendio Estadístico 2025", por INEI, 2025. (https://sl1nk.com/2povawu)

Respecto a Lima Metropolitana, la demanda de agregados también registra niveles elevados. De acuerdo con el INEI (2025), durante el año 2022 el volumen de arena extraída alcanzó las 930 439 toneladas métricas, dinámica que se detalla en la Figura 3. Asimismo, la extracción de este recurso en la capital evidenció variaciones significativas entre los años 2019 y 2023; destacando el periodo de 2020 a 2021, donde se registró un incremento drástico del 54.3 %, elevándose de 666 549 a 1 028 485 toneladas métricas (INEI, 2025). Este notable aumento refleja una mayor demanda y consumo de arena, lo que podría generar preocupaciones sobre la sostenibilidad de este recurso a largo plazo, debido al riesgo de escasez en el futuro. Además, los problemas medio ambientales están presentes por el incremento notorio de la minería ilegal, lo cual genera la explotación indiscriminada de los recursos naturales (Contreras, 2023). Todas estas problemáticas, según Contreras (2023), se debe a que se siguen eligiendo a autoridades incompetentes, no tener institucionalidad, profesionalización, legitimidad, ciencia y no contar con una población resiliente.

Figura 3

Producción de arena en Lima desde el 2020-2024 P/



Nota. El gráfico muestra la producción anual de arena en Lima desde el 2020 hasta 2024 P/. Adaptado de "Perú: Compendio Estadístico 2025", por INEI, 2025. (https://sl1nk.com/2povawu)

Lima Metropolitana albergaba 10 432 133 habitantes en 2025 (INEI, 2025), y este crecimiento demográfico no es un detalle secundario: es el motor que impulsa tanto la construcción residencial como la expansión de infraestructura urbana. El resultado es directo y preocupante: la demanda de materiales de construcción especialmente agregados finos como la arena ha alcanzado niveles que exceden la capacidad sostenible de reposición natural.

El sector privado lidera este crecimiento. En 2024, el mercado inmobiliario de Lima vendió 21 479 viviendas nuevas, un aumento del 30% respecto a 2023, con casi 4 900 unidades adicionales, según la Asociación de Empresas Inmobiliarias del Perú (ASEI, 2025). Lejos de estabilizarse, esta aceleración continuó en 2025: el primer trimestre registró 6 237 viviendas (30% más que el mismo período de 2024), y el segundo trimestre alcanzó 6 975 unidades, consolidando un crecimiento interanual del 41% (Cámara Peruana de la Construcción [CAPECO], 2025).

Se estima que cada vivienda demanda entre 25 y 35 toneladas de agregados para la elaboración de concretos y morteros (CAPECO, 2024). Al proyectar esta cifra frente a la construcción de más de 25,000 viviendas previstas para el año 2025, la presión ejercida

sobre las canteras de extracción se vuelve extrema, lo que subraya la urgencia de buscar materiales alternativos.

Pero el sector privado no actúa solo. El sector público también impulsa esta demanda con fuerza. El Banco Central de Reserva del Perú (BCRP, 2024) reportó que en agosto de 2024 la construcción creció 4.1%, impulsada principalmente por un aumento del 17.2% en obras públicas, una señal clara de que la inversión estatal está siendo decisiva. El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS, 2025) ejecutó el 96.4% de su presupuesto de inversión en 2024, lo que se tradujo en miles de intervenciones en agua, saneamiento, pistas, veredas y equipamientos urbanos. Paralelamente, gobiernos locales de Lima y Callao ejecutaron más del 80% de sus inversiones públicas (Ministerio de Economía y Finanzas [MEF], 2024), canalizándolas hacia pavimentación, parques, centros comunitarios, infraestructura vial y edificaciones.

El resultado es un escenario de expansión simultánea: demográfica, inmobiliaria y de infraestructura pública. La demanda combinada de agregados para viviendas, carreteras, obras de saneamiento, parques, centros comerciales, bibliotecas y equipamiento urbano supera ampliamente el ritmo de reposición natural, lo que ha intensificado la extracción de arena en canteras y cauces cercanos a Lima. Este desequilibrio entre extracción y regeneración abre la urgencia por alternativas sostenibles: agregados reciclados, adiciones puzolánicas, y otras soluciones que mitiguen la presión sobre recursos naturales cada vez más escasos.

Es imperativo adoptar medidas que frenen la excesiva depredación de los recursos naturales destinados a la construcción. En este contexto, la sustitución parcial o total de agregados convencionales por alternativas sostenibles se perfila como una solución óptima. La persistencia en el uso exclusivo de agregados naturales para la producción de concreto a nivel nacional responde, en gran medida, a la escasa divulgación y aplicación práctica de estudios sobre materiales ecológicos o reciclados. Esta barrera se agrava debido a que el Estado implementa con lentitud las políticas medioambientales restrictivas para el sector constructivo (Ibañez & Flores, 2023). A nivel internacional, existen diversas investigaciones que validan el reemplazo de insumos tradicionales por variantes ecológicas para mitigar la explotación constante de materia prima (Cárcel et al., 2022). Por tales motivos, resulta fundamental que a nivel local se desarrollen estudios enfocados en nuevos materiales que suplan a los agregados convencionales, disminuyendo así la extracción indiscriminada.

La industria cementera es un componente central de la cadena constructiva y, simultáneamente, una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero (Scrivener et al., 2018). Para la región Lima, los registros de producción muestran volúmenes significativos: la producción de cemento en la región fue de 3 889 468 t en 2022 (INEI, 2025), cifra que explica gran parte de la demanda local de materiales cementosos para obras públicas y privadas, como se muestra en la Figura 4. Debido al proceso de fabricación del clínker, la producción de cemento se asocia a emisiones directas de CO_2 a escala global, la industria aporta aproximadamente 7–8% de las emisiones antropogénicas de CO_2 por el uso de combustibles y reacciones químicas del clínker (Scrivener et al., 2018).

En este contexto, el consumo indiscriminado de arena y cemento en el sector construcción de Lima Metropolitana se configura como un problema ambiental y técnico de creciente relevancia, originado por factores como el crecimiento del sector construcción, la limitada investigación en materiales alternativos y la ausencia de políticas medioambientales eficaces, cuyas causas y efectos, entre ellos la sobreexplotación de recursos naturales, el incremento de emisiones de CO_2 y la degradación de ecosistemas, se sintetizan en el árbol del problema presentado en la Figura 5.

Figura 4

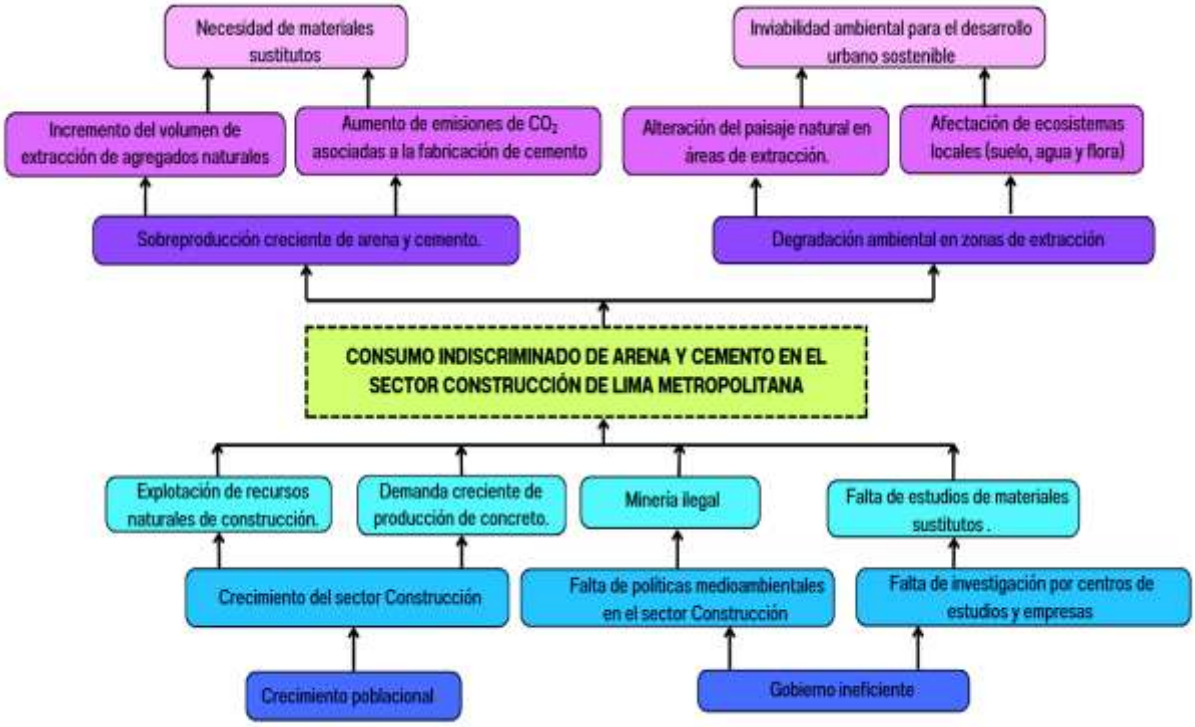
Producción de cemento en Lima desde el 2021-2024 P/



Nota. Adaptado de "Perú: Compendio estadístico 2025", por INEI, 2025 (https://sl1nk.com/2povawu).

Figura 5

Árbol del problema del consumo indiscriminado de arena y cemento



1.2. Formulación del problema

¿Cómo un diseño de concreto sostenible puede reducir el consumo indiscriminado de agregado fino y cemento en Lima Metropolitana?

1.3. Justificación

La presente investigación propone alternativas técnicas esenciales para impulsar prácticas constructivas más ecológicas y eficientes. Sustituir el agregado fino parcialmente por vidrio molido reciclado ofrece una solución dual: mitiga la sobreexplotación de canteras de arena y optimiza el manejo de desechos sólidos urbanos. Diversas investigaciones avalan que este material reciclado alcanza, e incluso supera, el rendimiento de los insumos tradicionales, garantizando la resistencia y durabilidad exigidas en las mezclas de concreto (Dadouch et al., 2024). De forma complementaria, la adición de humo de sílice resulta fundamental para densificar la microestructura del material y potenciar su comportamiento mecánico (Salas Montoya et al., 2023). Esta sinergia consolida un diseño estructural riguroso que responde directamente a los principios de la economía circular y la preservación de los recursos naturales.

Desde una perspectiva ambiental, mitigar el uso indiscriminado de agregados naturales genera beneficios ecológicos sustanciales. El empleo de materiales reciclados en la producción de concreto promueve la conservación de recursos no renovables y reduce drásticamente la huella ecológica derivada de la industria extractiva (IRP, 2024). En consecuencia, disminuir la sobreexplotación de canteras y lechos fluviales resulta vital para frenar la erosión del suelo, proteger la biodiversidad y evitar la contaminación hídrica, garantizando así la preservación integral de los ecosistemas.

En el ámbito económico, aunque el uso de vidrio molido reciclado y adiciones como el humo de sílice puede incrementar ligeramente los costos de producción debido a procesos adicionales de recolección, clasificación, trituración y control de calidad, este incremento se justifica ampliamente. Dichos materiales contribuyen a disminuir la presión sobre los agregados naturales, cuyo agotamiento progresivo genera riesgos de escasez y mayores impactos ambientales a mediano plazo (Contreras, 2023).

Socialmente, la adopción de estas prácticas fomenta una mayor conciencia ambiental y responsabilidad colectiva dentro del sector construcción. Su implementación en Lima Metropolitana puede impulsar un cambio significativo al demostrar que es viable utilizar materiales reciclados sin comprometer la calidad ni la seguridad estructural, posicionando a la región como un referente en innovación y sostenibilidad (Ibañez & Flores, 2023).

En conjunto, esta investigación se justifica plenamente debido a los beneficios ambientales, sociales y estratégicos que aporta el uso de vidrio molido reciclado y humo de sílice en la producción de concreto. Aunque implica un ligero incremento de costos, su aplicación promueve un desarrollo más sostenible, reduce la presión sobre los recursos naturales y contribuye a mejorar la calidad de vida de las futuras generaciones.

1.4. Hipótesis

El diseño de un concreto sostenible que incorpore vidrio molido reciclado como reemplazo parcial de la arena en una proporción del 15 % y humo de sílice como sustituto parcial del cemento en un 10 % contribuye a la reducción del consumo de arena natural y de cemento en Lima Metropolitana, a la vez que mejora las propiedades mecánicas del concreto.

1.5. Objetivos de la investigación

Los objetivos de esta investigación guían el desarrollo del estudio hacia la elaboración y evaluación de un concreto sostenible, mediante el uso de vidrio molido reciclado y humo de sílice. Se establecen los siguientes:

1.5.1. Objetivo general

Elaborar un diseño de concreto con resistencia f'c = 280 kg/cm² que emplee vidrio molido reciclado como reemplazo parcial de la arena y humo de sílice como sustituto parcial del cemento para ayudar a reducir el consumo indiscriminado de arena y cemento en Lima Metropolitana.

1.5.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los materiales utilizados para la elaboración del concreto sostenible, incluyendo arena, piedra chancada, plastificante, vidrio molido reciclado y humo de sílice.
- Realizar el diseño de mezclas de concreto, incluyendo un concreto patrón, mezclas con reemplazo de arena natural por vidrio molido reciclado en proporciones de 15 %, 20 % y 25 %, mezclas con reemplazo parcial del cemento por humo de sílice en 10 %, así como combinaciones de vidrio molido y humo de sílice, para evaluar su desempeño en estado fresco y endurecido, considerando su aplicación idónea para columnas.
- Realizar ensayos de concreto en estado fresco, incluyendo temperatura, asentamiento y contenido de aire, así como ensayos de concreto endurecido, tales como resistencia a la compresión y flexión de las muestras.
- Analizar comparativamente el desempeño técnico, económico y ambiental de los diseños de mezcla de concreto mediante la interpretación de los resultados obtenidos en los ensayos en estado fresco y endurecido.

1.6. Indicadores de medición del problema

Para evaluar el problema identificado, el uso intensivo de arena y cemento en la producción de concreto en Lima Metropolitana, se establecieron indicadores que permitan cuantificar el consumo de materiales y el desempeño mecánico del concreto. Estos indicadores, mostrados en la Tabla 1, facilitaron la comparación entre el diseño convencional y las mezclas sostenibles que incorporan vidrio molido reciclado y humo de sílice.

Tabla 1

Indicadores de medición del problema

Indicador	Unidad de Medida	Descripción
Cantidad de agregados	kg	Medir la cantidad de agregados naturales en la elaboración de un diseño de mezcla frente a uno con material sustituto.
Cantidad de cemento	kg	Medir la cantidad de cemento en la elaboración de un diseño de mezcla.
Resistencia a la compresión del concreto	kg/cm^2	Mide la resistencia a la comprensión del concreto convencional con el concreto sostenible.
Resistencia a la flexión del concreto	kg/cm^2	Mide la resistencia a la flexión del concreto convencional con el concreto sostenible.
Asentamiento (Slump)	cm	Mide la trabajabilidad del concreto fresco.
Temperatura del concreto	°C	Controla condiciones del concreto fresco.
Contenido de aire	%	Evalúa la cantidad de aire en la mezcla.

CAPITULO 2. ESTADO DEL ARTE

El auge de la industria de la construcción durante los últimos años ha acelerado de manera drástica el consumo global de cemento y agregados, lo cual intensifica la explotación de recursos naturales y agrava el impacto ambiental (Watari et al., 2023). Ante este escenario, resulta imperativo explorar materiales alternativos y sostenibles que mitiguen la dependencia de insumos convencionales y fomenten una ingeniería estructural más responsable con el entorno.

El vidrio molido reciclado ha emergido como un material relevante para el diseño de concretos sostenibles, empleado principalmente como reemplazo parcial del agregado fino debido a su disponibilidad y a su alto contenido de sílice amorfa (Dadouch et al., 2024). Cuando se utiliza como sustituto de arena, su contribución depende del ajuste granulométrico, del empaquetamiento y de la reducción de porosidad, siempre que se controle adecuadamente su tamaño de partícula (León Reyes & Rázuri Cueva, 2020). Estudios recientes indican que partículas menores a 150 μm mejoran la densificación de la pasta y disminuyen la porosidad, mientras que tamaños cercanos a 100 μm reducen la permeabilidad y la absorción de agua, fortaleciendo la durabilidad del concreto (Amin et al., 2023; Dadouch et al., 2024). Asimismo, diversas investigaciones señalan que granulometrías más gruesas también pueden emplearse favorablemente, siempre que se limite el porcentaje de reemplazo, se controle la distribución de tamaños y se incorporen adiciones puzolánicas o estrategias de mitigación de la reacción álcali–sílice (Du & Tan, 2014; Idir et al., 2010). En cuanto al comportamiento mecánico, reemplazos entre 10% y 20% han mostrado incrementos significativos en la resistencia a la compresión, atribuibles a un empaquetamiento más eficiente de partículas (León Reyes & Rázuri Cueva, 2020). Resultados similares fueron reportados por Huapaya Tenazoa y Valdivia Farromeque (2019), quienes observaron incrementos del 56% en resistencia a 14 días y del 19% a 28 días con un 15% de reemplazo. Sin embargo, porcentajes mayores al 20% o granulometrías excesivamente gruesas pueden producir ligeras disminuciones en la resistencia debido a reducciones en la cohesión interna (Premathilaka et al., 2024). Aun así, estos descensos pueden controlarse mediante un ajuste adecuado de la mezcla y selección óptima del vidrio reciclado, alcanzando concretos con absorciones inferiores al 5% (Gebremichael et al., 2023).

El humo de sílice, por su parte, es un subproducto ultrafino generado en la industria del silicio metálico y ferro-silicio, caracterizado por su alta reactividad puzolánica y su

tamaño extremadamente reducido, entre 0.1 a 0.5 μm (Nili & Salehi, 2023). Su incorporación en el concreto permite reducir el consumo de cemento Portland y, por ende, las emisiones de CO_2 asociadas a su fabricación (Salas-Montoya et al., 2023). El humo de sílice actúa tanto por actividad puzolánica como por efecto de relleno, formando geles adicionales de C-S-H y refinando la distribución de poros (Kim & Lee, 2024; Shan et al., 2021). A pesar de que su finura incrementa la demanda de agua y puede disminuir la trabajabilidad, el uso de superplastificantes permite corregir este efecto (He et al., 2022). En términos mecánicos, reemplazos entre 5% y 15% generan mejoras significativas en la resistencia a la compresión y flexión, así como una disminución de la permeabilidad y de la penetración de agentes agresivos (Karim & Qazi, 2023; Xie et al., 2024). Estudios recientes confirman que el humo de sílice mantiene su efectividad incluso cuando se combina con otras adiciones minerales altamente reactivas, logrando microestructuras densas y concretos de mayor durabilidad (Salas-Montoya et al., 2023).

A partir de los estudios revisados, se observa que tanto el vidrio molido reciclado como el humo de sílice aportan beneficios importantes al diseño de concretos sostenibles, aunque cada material presenta limitaciones específicas. El vidrio molido, cuando se utiliza en reemplazos superiores al 20 % o con granulometrías mayores a 150 μm, puede ocasionar ligeras disminuciones en la resistencia inicial y riesgos de reacción álcali–sílice si no se aplican estrategias de mitigación adecuadas (Du & Tan, 2014; Premathilaka et al., 2024). Por su parte, el humo de sílice aumenta la demanda de agua debido a su elevada finura, aunque su alta reactividad puzolánica y capacidad para densificar la matriz cementicia contrarrestan estos efectos cuando se emplean superplastificantes (He et al., 2022; Kim & Lee, 2024). Ambos materiales presentan mecanismos complementarios: el vidrio contribuye al empaquetamiento y refinamiento granulométrico, mientras que el humo de sílice forma geles de C-S-H y consume hidróxidos alcalinos, lo que puede reducir la expansión asociada a la reacción álcali–sílice. Esto sugiere que su combinación podría generar resultados muy favorables en términos de resistencia y durabilidad. Sin embargo, hasta ahora no se han reportado estudios que integren simultáneamente vidrio molido reciclado y humo de sílice en una misma mezcla, por lo que aún queda por explorar cómo interactúan sus mecanismos combinados dentro de la matriz cementicia y su potencial para el desarrollo de concretos más eficientes y sostenibles.

CAPITULO 3. MARCO TEÓRICO

Se desarrolla los conceptos fundamentales y antecedentes técnicos necesarios para sustentar la investigación. Se abordan temas relacionados con el concreto convencional y sostenible, el uso de materiales reciclados como el vidrio molido y el humo de sílice, así como las propiedades, normativas y ensayos relevantes para la evaluación del concreto.

3.1. Concreto

El concreto, también denominado hormigón, es un material compuesto esencial en la construcción civil, constituido principalmente por una mezcla de cemento, agua, agregados finos (arena), agregados gruesos (grava) y, en ocasiones, aditivos para mejorar su trabajabilidad o durabilidad (Neville, 2011). Su popularidad se debe a su capacidad para soportar cargas significativas y adaptarse a diversas aplicaciones estructurales. Las características más relevantes del concreto son:

a. **Resistencia a la compresión:** El concreto es notablemente resistente a la compresión, lo que lo hace ideal para aplicaciones estructurales como cimientos, columnas y muros. La resistencia a la compresión del concreto depende de la calidad de los materiales y la relación agua-cemento utilizada en su mezcla (Mehta & Monteiro, 2014).
b. **Durabilidad:** Su resistencia al desgaste, a condiciones ambientales agresivas (como la exposición a sulfatos, cloruros y ciclos de congelación y deshielo), y su longevidad hacen del concreto un material duradero y sostenible en el tiempo (Kosmatka et al., 2011).
c. **Versatilidad y plasticidad:** En su estado fresco, el concreto es altamente moldeable, permitiendo que se vierta en diferentes formas y tamaños, adaptándose a diseños arquitectónicos complejos y variados (Neville, 2011).
d. **Resistencia al fuego y aislamiento térmico:** El concreto ofrece una excelente resistencia al fuego, protegiendo las estructuras durante incendios (American Concrete Institute [ACI], 2007). Además, su capacidad de aislamiento térmico contribuye a la eficiencia energética de los edificios.
e. **Bajo costo relativo:** Comparado con otros materiales de construcción, el concreto es relativamente económico y su producción puede llevarse a cabo con materiales localmente disponibles, lo cual favorece su amplia utilización (Mehta & Monteiro, 2014).

3.1.1. Concreto simple

El concreto simple, también conocido como concreto no reforzado, carece de elementos de refuerzo como barras de acero o mallas. Se utiliza principalmente en estructuras que no están sometidas a esfuerzos de tracción significativos, tales como aceras, pavimentos, muros de contención de baja altura, y estructuras de albañilería (Kosmatka et al., 2011). Su aplicación es limitada debido a su baja resistencia a la tracción y flexión.

3.1.2. Concreto reforzado

El concreto reforzada combina el concreto con refuerzos de acero (barras o mallas), mejorando sustancialmente su resistencia a la tracción y la flexión. Esta combinación permite que ambos materiales trabajen juntos, aprovechando la alta resistencia a la compresión del concreto y la resistencia a la tracción del acero. El concreto reforzado es fundamental en la construcción de vigas, losas, columnas y otras estructuras sometidas a cargas complejas (ACI Committee 318, 2019). Su uso está ampliamente regulado por normas como el ACI 318 y las Normas Técnicas Peruanas (Instituto Nacional de Calidad [INACAL], 2019a).

3.1.3. Concreto permeable

El concreto permeable, o concreto poroso, está diseñado para permitir el paso del agua a través de su estructura. Su aplicación resulta altamente beneficiosa para el control de aguas pluviales, ya que disminuye significativamente la escorrentía superficial, facilita la recarga de mantos acuíferos y actúa como filtro purificador de contaminantes (American Concrete Institute [ACI], 2010). Es comúnmente utilizado en pavimentos, estacionamientos y áreas urbanas donde la gestión hídrica es crítica. El ensayo de infiltración en este tipo de superficies se evalúa mediante la norma ASTM C1701 (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2021a).

3.1.4. Concreto sostenible

La producción de concreto sostenible se fundamenta en la integración de insumos reciclados o adiciones minerales a la mezcla base. La sustitución estratégica del cemento portland por componentes como cenizas volantes, escoria de alto horno o vidrio molido tiene como objetivo primordial minimizar la huella ecológica de la industria constructiva (Mehta & Monteiro, 2014). Estas incorporaciones no solo optimizan las propiedades del material, sino que impulsan la economía circular al revalorizar desechos industriales que de otro modo terminarían en vertederos. De este modo, su uso responde a la urgencia

global de reducir las emisiones de carbono, alineando la ingeniería con el desarrollo sostenible.

3.2. Agregados

Los agregados representan aproximadamente entre el 60% y 75% del volumen total del concreto, y su función principal es proporcionar resistencia, estabilidad y durabilidad a la mezcla (ASTM International, 2023b).

Se dividen en dos tipos: agregado fino y agregado grueso, cuya selección y calidad influyen directamente en el comportamiento mecánico del concreto. Para esta investigación, se emplearon agregados naturales provenientes de la cantera "Lucho" ubicada en Cieneguilla, Lima, los cuales fueron evaluados mediante ensayos de caracterización.

3.2.1. Agregado fino

El agregado fino está compuesto por partículas que pasan por el tamiz N° 4 (4.75 mm) y generalmente corresponde a la arena. En esta investigación se utilizó arena natural, limpia y de procedencia silícea, la cual fue sometida a ensayos de granulometría, absorción, contenido de humedad y módulo de finura. El valor del módulo de finura obtenido fue de 3.097, lo que la ubica dentro del rango aceptable según la norma ASTM C33 (ASTM International, 2023d). Su adecuada distribución de tamaños garantiza una buena trabajabilidad de la mezcla y contribuye a un buen acabado superficial del concreto.

3.2.2. Agregado grueso

El agregado grueso está formado por partículas que quedan retenidas en el tamiz N° 4, siendo comúnmente piedra chancada o grava triturada. Se utilizó piedra chancada de tamaño máximo nominal de 19 mm, con forma angular y superficie rugosa, lo que favorece la adherencia con la pasta de cemento. Se realizaron ensayos de granulometría, absorción, peso unitario suelto y compactado, con resultados dentro de los parámetros establecidos por la norma ASTM C33 (ASTM International, 2023d). La calidad del agregado grueso influye directamente en la resistencia del concreto y en la estabilidad dimensional de los elementos estructurales.

3.2.3. Propiedades del agregado

Las propiedades físicas de los agregados determinan su influencia en la mezcla de concreto (ASTM International, 2023d).

Según ASTM International (2023d) entre las principales propiedades evaluadas están:

- **Granulometría:** permite conocer la distribución de tamaños y asegurar una buena compactación y trabajabilidad.
- **Módulo de finura:** en el agregado fino, ayuda a predecir la cantidad de pasta necesaria.
- **Absorción y contenido de humedad:** fundamentales para ajustar la cantidad de agua efectiva en la mezcla.
- **Peso unitario:** necesario para el cálculo de dosificación por volumen absoluto.
- **Forma y textura:** afectan la adherencia entre la pasta y el agregado, influyendo en la resistencia mecánica.

El cumplimiento de los agregados con las normas técnicas garantiza la calidad del concreto producido y minimiza problemas como segregación, exudación o pérdida de resistencia.

3.3. Materiales alternativos en concreto

Materiales finamente divididos que se incorporan al concreto para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, como el vidrio molido y humo de sílice.

3.3.1. Humo de sílice

El humo de sílice es una adición mineral en polvo compuesta por partículas extremadamente finas de dióxido de sílice (SiO_2) en estado amorfo (Sika Group, s.f.).

Estas partículas, de forma esférica, tienen un tamaño de aproximadamente 0.1 micrómetros, siendo hasta 100 veces más finas que las partículas de cemento Portland, lo que le otorga una altísima superficie específica y una notable reactividad puzolánica (Sika Group, s.f.).

a. Propiedades

El humo de sílice contiene más de 85% de dióxido de silicio, una humedad máxima del 3% y una superficie específica entre 15 y 30 m^2/g. Su peso específico varía entre 2.2 y 2.3 g/cm^3. Estas características lo hacen ideal como micro-relleno y como reactivo químico que mejora la microestructura del concreto (Sika Colombia, 2025).

b. Mecanismos de acción

Efecto de Relleno: Debido a su tamaño ultrafino, el humo de sílice actúa como micro-relleno al ocupar los espacios vacíos entre las partículas de cemento y los agregados, lo que contribuye a disminuir la porosidad y aumentar la compacidad del concreto (Sika Perú, 2022).

Reacción Puzolánica: Además del efecto físico, SikaFume actúa químicamente: reacciona con el hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) presente en la pasta de cemento, transformándolo en compuestos cementantes adicionales como el C-S-H (silicato cálcico hidratado), los cuales refuerzan la matriz del concreto y mejoran su resistencia y durabilidad (Sika Perú, 2022).

c. Beneficios del humo de sílice

Los beneficios de incorporar humo de sílice en mezclas de concreto son múltiples:

En estado fresco, mejora la cohesión interna, reduce la exudación y la segregación, y aumenta la adherencia del concreto al acero de refuerzo, algo clave en aplicaciones estructurales exigentes (Sika Ecuador, s.f.).

En estado endurecido, incrementa la resistencia a la compresión y flexión, reduce la permeabilidad al agua, mejora el comportamiento ante ciclos de congelación-deshielo y aumenta la durabilidad frente a agentes agresivos como cloruros o sulfatos (Sika México, 2025).

3.3.2. Vidrio molido reciclado

El vidrio es un material no cristalino, inorgánico y amorfo, compuesto principalmente por sílice (SiO_2), junto con otros óxidos como óxido de sodio y óxido de calcio, es conocido por su transparencia, dureza y estabilidad química (Federico & Chidiac, 2009).
La reutilización de vidrio molido como agregado en el concreto no solo reduce la cantidad de residuos sólidos, sino que también ofrece un enfoque innovador para mejorar las propiedades mecánicas y estéticas del concreto.

a. Propiedades

Inercia química: El vidrio es químicamente estable y no reacciona fácilmente con otros compuestos del concreto, lo que contribuye a su durabilidad (Park et al., 2004).

Alta resistencia a la compresión: Aunque el vidrio es frágil en tracción, su resistencia a la compresión lo hace adecuado como agregado fino en el concreto (Federico & Chidiac, 2009).

b. Beneficios como agregado fino

Sostenibilidad: Al utilizar vidrio reciclado, se disminuye la extracción de arena natural, reduciendo el impacto ambiental asociado con la minería de agregados (Jani & Hogland, 2014).

Efecto puzolánico: El vidrio molido finamente actúa como una puzolana, reaccionando con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento, mejorando la resistencia y reduciendo la permeabilidad del concreto (Shi & Zheng, 2007).

3.4. Normativa técnica aplicable

Las normas técnicas nacionales e internacionales que rigen los criterios de calidad, diseño y ensayo del concreto y sus materiales, las cuales sirven de referencia para el desarrollo experimental de esta investigación.

3.4.1. Norma Técnica Peruana (NTP)

- **NTP 400.011**: Concreto - Especificaciones para agregado fino y grueso para concreto. Esta norma establece los requisitos que deben cumplir los agregados para su uso en la producción de concreto, asegurando su idoneidad en términos de granulometría, pureza y resistencia (INACAL, 2019i).
- **NTP 334.009**: Cemento Pórtland - Requisitos. Define los requisitos mínimos para la calidad del cemento portland en Perú, abarcando aspectos como la composición química, propiedades físicas, y métodos de ensayo (INACAL, 2019b).
- **NTP 334.050**: Cementos adicionados con puzolanas - Especificaciones. Establece los estándares para cementos que incluyen materiales puzolánicos, que mejoran la durabilidad del concreto y reducen la cantidad de clinker, contribuyendo a un menor impacto ambiental (INACAL, 2019c).
- **NTP 400.037**: Concreto - Determinación de la resistencia a la compresión de probetas de concreto. Establece el procedimiento estándar para realizar ensayos de resistencia a la compresión en cilindros de concreto, un indicador clave de la calidad y durabilidad del material (INACAL, 2019m).

3.4.2. American Society for Testing and Materials (ASTM)

- **ASTM C33/C33M**: Especificaciones estándar para agregados utilizados en concreto. Define los requisitos de calidad y gradación para los agregados finos y gruesos usados en mezclas de concreto, asegurando que cumplan con los estándares para garantizar la durabilidad y resistencia del concreto (ASTM, 2023d).
- **ASTM C150/C150M**: Especificaciones estándar para cemento portland. Establece las propiedades químicas y físicas que deben cumplir los diferentes tipos de cemento portland para su uso en la construcción (ASTM, 2023c).
- **ASTM C618**: Especificaciones para cenizas volantes, humo de sílice y otras adiciones puzolánicas utilizadas en concreto. Define las características que deben cumplir estas adiciones para mejorar la durabilidad, trabajabilidad y resistencia del concreto (ASTM, 2023f).
- **ASTM C494/C494M**: Especificaciones para aditivos químicos para concreto. Proporciona los requisitos para aditivos utilizados para modificar las propiedades del concreto fresco o endurecido, como la aceleración o retraso del fraguado, la mejora en la trabajabilidad o la reducción del contenido de agua (ASTM, 2023e).
- **ASTM C595/C595M**: Especificaciones para cementos mezclados. Regula las características de cementos que contienen una mezcla de clínker de cemento portland y una o más formas de material puzolánico, caliza o escoria de alto horno, promoviendo la sostenibilidad en la producción de cemento (ASTM, 2023g).

CAPITULO 4. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque metodológico que permitió analizar el comportamiento del concreto modificado mediante la incorporación de materiales alternativos como el vidrio molido reciclado y el humo de sílice. Para ello, se definieron estrategias de experimentación en laboratorio, en las que se diseñaron y evaluaron distintas mezclas de concreto. A través de este enfoque, fue posible observar de manera objetiva cómo influye el reemplazo parcial de materiales convencionales sobre las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, así como en su viabilidad económica y ambiental.

4.1. Tipo de investigación

Esta investigación es de tipo cuantitativa y experimental, ya que se fundamenta en la recolección y análisis de datos numéricos obtenidos mediante ensayos de laboratorio. Se realizaron pruebas físicas y mecánicas al concreto elaborado con sustitución parcial de arena por vidrio molido reciclado y de cemento por humo de sílice, comparando su comportamiento con un diseño patrón. El enfoque experimental permitió controlar variables específicas y evaluar directamente el efecto de cada modificación en la mezcla sobre la resistencia y el desempeño del concreto.

4.2. Nivel de investigación

El nivel de la investigación es descriptivo y explicativo. A nivel descriptivo, se identificaron y documentaron las características físicas y mecánicas de los materiales utilizados (arena, piedra chancada, vidrio molido y humo de sílice), así como los resultados de los diferentes ensayos realizados. En el nivel explicativo, se analizó cómo la incorporación de estos materiales reciclados influye en las propiedades del concreto, especialmente en términos de resistencia y sostenibilidad. Este enfoque permitió entender la relación causa-efecto entre la variación en la composición de la mezcla y su impacto técnico, económico y ambiental.

4.3. Proceso de experimentación

El procedimiento seguido en esta investigación se desarrolló de forma experimental en laboratorio, con el objetivo de evaluar el comportamiento del concreto al incorporar materiales alternativos como el vidrio molido reciclado y el humo de sílice. Para ello, se llevaron a cabo una serie de etapas que incluyeron la recolección y caracterización de los materiales, el diseño de diversas mezclas de concreto, la ejecución de ensayos tanto en

estado fresco como endurecido, y finalmente el análisis comparativo de los resultados obtenidos. Estas acciones permitieron observar el impacto técnico, económico y ambiental de las sustituciones propuestas, en comparación con un diseño patrón convencional.

4.3.1. Recolección de materiales

El primer paso consistió en recolectar los materiales necesarios para la elaboración del concreto sostenible. Se obtuvo cemento Portland tipo HS, marca Andino Ultra, agregados naturales (arena y grava) provenientes de la cantera Lucho Cieneguilla, los cuales cumplían con las especificaciones técnicas para mezclas estructurales.

El vidrio molido reciclado, utilizado como reemplazo parcial de la arena, provino exclusivamente de vidrios monolíticos, seleccionándose el material pasante por el tamiz N° 8. El proceso de recolección del vidrio sodocálcico se realizó de forma manual, tal como se muestra en el Anexo 3.

El humo de sílice utilizado como adición mineral fue SikaFume, el cual sirvió como sustituto parcial del cemento. La calidad y disponibilidad de estos materiales fueron fundamentales para garantizar un desempeño adecuado en las mezclas.

4.3.2. Caracterización de materiales

Una vez recolectados los materiales, se procedió a su caracterización para evaluar sus propiedades físicas. El cemento fue analizado a partir de su ficha técnica para verificar su cumplimiento normativo. Los agregados fueron sometidos a ensayos de granulometría, módulo de finura, peso unitario (suelto y compactado), peso específico, absorción y contenido de humedad. El vidrio molido reciclado se caracterizó mediante análisis granulométrico y revisión de su origen. En el caso del humo de sílice y el aditivo SikaCem, se revisaron las fichas técnicas a fin de identificar propiedades como finura, contenido de SiO_2 y efectos esperados sobre la durabilidad y trabajabilidad del concreto. Esta etapa fue esencial para asegurar la compatibilidad entre componentes y la calidad de las mezclas.

4.3.3. Diseño de mezclas de concreto

En esta etapa se elaboraron distintos diseños de mezcla para comparar el comportamiento del concreto convencional con propuestas sostenibles que incorporan vidrio molido

reciclado y humo de sílice. En primer lugar, se preparó el diseño patrón, sin ningún tipo de adición ni reemplazo, que sirvió como referencia base.

Posteriormente, se desarrollaron los grupos de mezclas experimentales:

a. **Grupo 1 – Solo vidrio molido reciclado como reemplazo parcial de la arena:**
   V15: 15% de reemplazo de arena por vidrio molido.
   V20: 20% de reemplazo de arena por vidrio molido.
   V25: 25% de reemplazo de arena por vidrio molido.
b. **Grupos 2 – Solo humo de sílice como reemplazo parcial del cemento:**
   HS10: 10% de reemplazo de cemento por humo de sílice.
c. **Grupo 3 – Vidrio molido + humo de sílice como adición mineral:**
   V15 HS10: 15% de vidrio molido + 10% de humo de sílice.
   V20 HS10: 20% de vidrio molido + 10% de humo de sílice.

Todas las mezclas se elaboraron manteniendo una relación agua/cemento constante de 0.56. Las dosificaciones se realizaron mediante el método ACI 211, ajustando los contenidos de agregado fino, cemento, humo de sílice y vidrio reciclado según el porcentaje de reemplazo. Las proporciones de agregados gruesos y aditivo se definieron de forma que se cumplan las condiciones de trabajabilidad, resistencia y compatibilidad de materiales para cada mezcla.

Para la elaboración de las mezclas, los materiales fueron dosificados mediante el pesaje individual de cada componente, de acuerdo con las proporciones establecidas, tal como se muestra en el Anexo 4. Posteriormente, se realizó el proceso de preparación y mezclado del concreto, como se presenta en el Anexo 5. Asimismo, el registro fotográfico de las muestras de concreto elaboradas en esta etapa se presenta en el Anexo 9.

El desarrollo detallado de los diseños de mezcla con vidrio reciclado (15%, 20% y 25%) se presenta en el Anexo 1.

4.3.4. Ensayos en estado fresco y endurecido

Las mezclas de concreto elaboradas fueron sometidas a ensayos en estado fresco y endurecido con la finalidad de evaluar sus propiedades. En el estado fresco, se determinaron la temperatura, el asentamiento y el contenido de aire, parámetros fundamentales para analizar la trabajabilidad y las condiciones de colocación del concreto. En el estado endurecido, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión y

resistencia a la flexión en probetas cilíndricas y prismáticas, respectivamente, a edades de curado de 7, 14 y 28 días.

Todos los ensayos fueron realizados en el laboratorio de tecnología del concreto de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), campus Villa, el cual se documenta mediante registro fotográfico en el Anexo 12. Asimismo, el desarrollo de los ensayos en estado fresco y endurecido se complementa con el registro fotográfico correspondiente en los anexos respectivos.

4.3.5. Análisis de resultados

El análisis de resultados se desarrolló de manera integral, considerando los enfoques técnico, ambiental y económico, con el fin de evaluar la viabilidad del concreto sostenible propuesto en comparación con el concreto patrón.

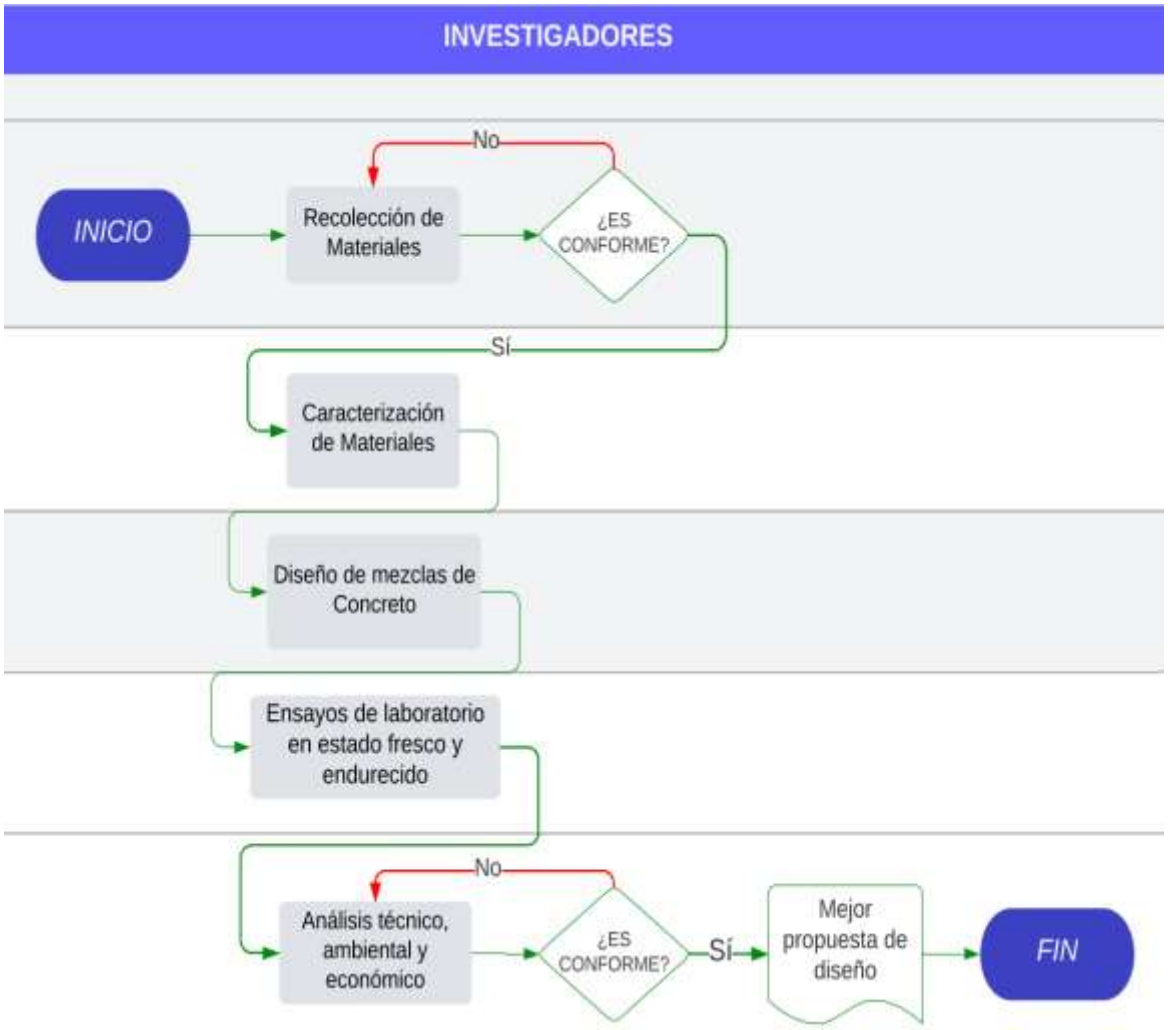
Desde el enfoque técnico, se analizaron los resultados de los ensayos en estado fresco y endurecido. En el estado fresco, se evaluaron la trabajabilidad y las condiciones de colocación del concreto mediante los ensayos de asentamiento, temperatura y contenido de aire. En el estado endurecido, se compararon las resistencias a la compresión y a la flexión de las mezclas experimentales y del concreto patrón a los 7, 14 y 28 días de curado, verificándose que las sustituciones propuestas mantuvieran propiedades mecánicas adecuadas para su aplicación en columnas.

En el enfoque ambiental, se evaluó la reducción del consumo de recursos naturales generada por el uso de vidrio molido reciclado como reemplazo parcial del agregado fino y humo de sílice como sustituto parcial del cemento. Para ello, se consideraron los porcentajes de reemplazo y el volumen de concreto analizado, evidenciándose una disminución en la demanda de arena natural y cemento.

Finalmente, desde el enfoque económico, se realizó una comparación de los costos unitarios de las mezclas diseñadas, considerando los materiales convencionales y alternativos empleados. A partir de la integración de los resultados técnicos, ambientales y económicos, se identificó y destacó el diseño de mezcla que presentó el mejor desempeño global, constituyéndose como la alternativa más viable para su aplicación en el sector construcción. En la Figura 6 se aprecia el flujograma del proceso de desarrollo de la tesis, donde se sintetizan de manera ordenada las etapas metodológicas seguidas desde el planteamiento del problema hasta el análisis y validación de resultados.

Figura 6

Flujograma que resume las etapas del proceso de la investigación



CAPITULO 5. DESARROLLO

Para validar la propuesta de concreto sostenible, se desarrolló un proceso experimental que incluyó la caracterización de los materiales empleados, el diseño y elaboración de mezclas, así como la ejecución de ensayos en estado fresco y endurecido. Se trabajó con agregados naturales, vidrio molido reciclado y humo de sílice, seleccionados por sus propiedades físicas y su potencial para sustituir parcialmente la arena y el cemento. La dosificación se realizó mediante el método del volumen absoluto, considerando distintas proporciones de reemplazo para evaluar su efecto sobre el comportamiento del concreto. Finalmente, se analizaron los resultados obtenidos y se evaluó el impacto ambiental asociado a la reducción del uso de recursos naturales, con la finalidad de determinar la viabilidad técnica y sostenible de las mezclas propuestas.

5.1. Caracterización de materiales

Se describió las pruebas realizadas para evaluar la calidad y las propiedades de los materiales que componen el concreto sostenible.

5.1.1. Agregados

Los agregados que se utilizaron en la elaboración del concreto incluyeron arena gruesa como agregado fino y piedra chancada como agregado grueso. Fue fundamental que ambos materiales cumplan con los requisitos establecidos en la NTP 400.037 (INACAL, 2019m) para asegurar la calidad del concreto.

a. Análisis granulométrico

Este ensayo emplea el método de tamizado estándar, conforme a las especificaciones de la norma ASTM C136 y la NTP 400.012 (ASTM International, 2023b; INACAL, 2019j). Su objetivo fue determinar cuantitativamente la distribución granulométrica del agregado utilizando tamices normalizados con aberturas cuadradas. El procedimiento del ensayo fue lo siguiente:

1. Se secó la muestra de agregado en un horno a una temperatura constante de 110°C durante un mínimo de 24 horas. Posteriormente, se registra el peso de la muestra seca.

2. Se colocó la muestra seca en un conjunto de tamices ordenados de mayor a menor tamaño. Para el agregado fino, se utiliza desde el tamiz #4 (4.75 mm) hasta el tamiz #200 (0.07 mm). En el caso del agregado grueso, se emplea desde el tamiz de 1 1/2" (38.1 mm) hasta el tamiz #200 (0.07 mm).

3. Se agitó el conjunto de tamices durante al menos 10 minutos, ya sea manualmente o mediante un equipo mecánico.

4. Se pesó el material retenido en cada tamiz y registrar los resultados para su posterior análisis.

Con los datos obtenidos, se continuó a procesar la información, calculando los porcentajes acumulados de material retenido y pasante para cada tamiz. Los resultados de este análisis se muestran en la Tabla 2 para el agregado grueso y en la Tabla 3 para el agregado fino.

Tabla 2

Análisis granulométrico - Agregado Grueso

N° Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
1 1/2	37.50	0.00	0.00	0.00	100.00
1	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4	19.00	22.40	1.12	1.12	98.88
1/2	12.50	1,174.10	58.68	59.80	40.20
3/8	9.50	599.30	29.95	89.76	10.24
N° 4	4.75	195.20	9.76	99.52	0.48
Fondo	-	9.70	0.48	100.00	0.00
Total		**2000.7**	**100.00**		

Tabla 3

Análisis granulométrico - Agregado fino

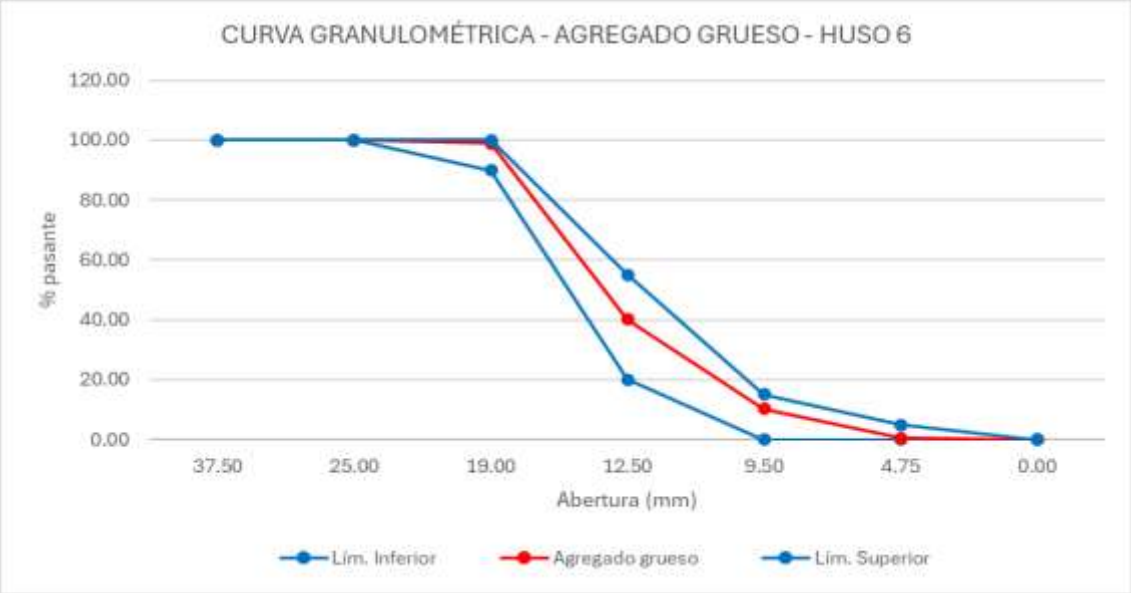
N° Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
3/8"	9.50	1.40	0.09	0.09	100
N° 4	4.75	44.80	2.99	3.08	97
N° 8	2.36	235.00	15.67	18.75	81
N° 16	1.18	339.20	22.62	41.37	59
N° 30	0.60	344.00	22.94	64.30	36
N° 50	0.30	326.40	21.76	86.06	14
N° 100	0.15	150.40	10.03	96.09	4
Fondo	-	58.60	3.91	100.00	0.00
Total		**1499.8**	**100.00**		

Finalmente, se elaboró la curva granulométrica de los agregados, representada en las gráficas correspondientes tanto para el agregado grueso como para el fino, mostradas en

la Figura 7 y 8, respectivamente. Estas curvas permiten visualizar de manera clara la distribución de los tamaños de las partículas, facilitando la evaluación de las características granulométricas del material.

Figura 7

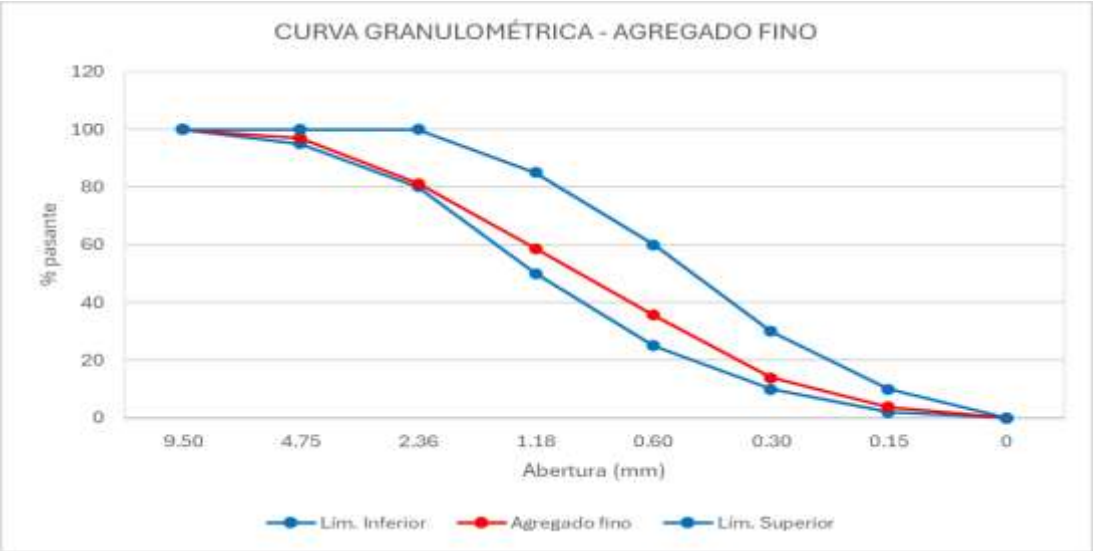
Curva granulométrica del agregado grueso – huso 6



El análisis granulométrico del agregado grueso según INACAL (2019m) en la NTP 400.037:2019, reveló que se clasifica en el huso granulométrico 6. Esto significa que el tamaño de las partículas del agregado se ajusta a los límites establecidos para este tipo de material. Además, se encontró que el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado es de 3/4" (19 mm). Este dato se obtuvo al identificar el primer tamiz que retuvo más del 10% de la muestra durante el análisis. Por lo tanto, el agregado cumple con los estándares requeridos, lo que es fundamental para garantizar la calidad en su uso.

Figura 8

Curva del análisis granulométrico de agregado fino



El análisis granulométrico del agregado fino indicó que su distribución de partículas se encuentra dentro de los límites establecidos por la norma NTP 400.037 (INACAL, 2019m). La curva granulométrica obtenida muestra que los porcentajes pasantes del material se ubican entre los límites inferior y superior especificados, evidenciando una gradación adecuada. En consecuencia, el agregado fino cumple con los requisitos normativos y resulta apto para su uso en la elaboración de concreto.

b. Módulo de Fineza

A partir del análisis granulométrico del agregado fino, se procedió a calcular el módulo de finura de acuerdo con la norma NTP 400.012, la cual determinó este valor como un indicador clave para evaluar la uniformidad del tamaño de las partículas de un agregado (INACAL, 2019j). El cálculo del módulo de finura se realizó sumando los porcentajes retenidos acumulados en una serie de tamices estandarizados y dividiendo este resultado entre 100, como indica la Ecuación (1):

$$MF = \frac{\sum \%\ Ret.\ acum\ [3,\ 1\ 1/2,\ 3/4,\ 3/8",\ \#4,\ \#8,\ \#16,\ \#30,\ \#50,\ \#100]}{100} \quad (1)$$

Donde:

MF = Módulo de finura

% Ret. Acum. = Porcentaje retenido acumulado de cada tamiz

Después se reemplazó los porcentajes retenidos de cada tamiz que se muestran en la Tabla 3 para calcular el módulo de fineza del agregado fino en la Ecuación (1). Posteriormente, reemplazando los valores experimentales en la Ecuación (1), se obtiene la Ecuación (2):

$$MF = \frac{0.09 + 3.08 + 18.75 + 41.37 + 64.30 + 86.06 + 96.09}{100} = 3.097 \qquad (2)$$

Se obtuvo un módulo de finura de 3.097, valor que se encuentra dentro del rango recomendado por la normativa para agregados finos, que oscila entre 2.3 y 3.1.

c. Peso unitario suelto y peso compactado

Este ensayo se llevó a cabo siguiendo los lineamientos establecidos en la NTP 400.017, con el objetivo de determinar tanto el peso unitario suelto como el peso unitario compactado de los agregados (INACAL, 2019k). A continuación, se describe el proceso:

1. Primero, la muestra de los agregados se secó en un horno a 110 °C durante 24 horas para asegurarse de eliminar toda la humedad.
2. Luego, se utilizó un recipiente cilíndrico, que tiene un volumen y peso conocidos. Para medir el peso unitario suelto, el material se introdujo en el recipiente de manera uniforme, sin compactarlo, mientras que, para medir el peso unitario compactado, se llenó en tres capas, compactando cada capa con 25 golpes de varilla.
3. Finalmente, una vez lleno, se niveló la superficie del material, retirando el exceso, y se procedió a pesar el recipiente lleno.

Los datos y los resultados obtenidos para el agregado grueso están disponibles en la Tabla 4 y 5, mientras que los del agregado fino se pueden consultar en la Tabla 6 y 7.

Tabla 4

Peso unitario suelto – Agregado grueso

Descripción	Valor	Unidad
Peso de recipiente	2.46	kg
Peso de recipiente + agregado	13.39	kg
Volumen del recipiente	0.0069	m^3
Peso del agregado	10.93	kg
Peso unitario suelto	**1582.74**	**kg/m^3**

Tabla 5

Peso unitario compactado – Agregado grueso

Descripción	Valor	Unidad
Peso de recipiente	2.46	kg
Peso de recipiente + agregado compactado	14.32	kg
Volumen del recipiente	0.0069	m^3
Peso del agregado compactado	11.86	kg
Peso unitario compactado	**1717.41**	**kg/m^3**

Tabla 6

Peso unitario suelto – Agregado fino

Descripción	Valor	Unidad
Peso de recipiente	1.43	kg
Peso de recipiente + agregado	5.94	kg
Volumen del recipiente	0.0029	m^3
Peso del agregado	4.51	kg
Peso unitario suelto	**1572.05**	**kg/m^3**

Tabla 7

Peso unitario compactado – Agregado fino

Descripción	Valor	Unidad
Peso de recipiente	1.43	kg
Peso de recipiente + agregado	6.56	kg
Volumen del recipiente	0.0029	m^3
Peso del agregado	5.14	kg
Peso unitario compactado	**1791.19**	**kg/m^3**

d. Peso específico y absorción:

Este ensayo se efectuó siguiendo el proceso descrito en la NTP 400.021 (INACAL, 2019l), y el proceso es el siguiente:

1. La muestra de agregado se secó en un horno a una temperatura constante de 110°C durante un periodo de 24 horas.

2. Posteriormente, la muestra completamente seca se sumergió en agua por 24 horas.

3. Luego de este tiempo, se secó la muestra con paños absorbentes hasta alcanzar el estado de saturación superficialmente seco (SSS) y se procedió a pesarla.

4. En el caso del agregado grueso, se colocó la muestra en estado SSS sobre una rejilla y se sumergió en un recipiente con agua a 23 °C, registrando su peso mientras está sumergida, sin considerar el peso de la rejilla.

5. Para el agregado fino, la muestra en estado SSS se introdujo en una fiola, que se completó con agua destilada a 23 °C; luego se eliminó todo el aire atrapado y se registró la masa.

6. Finalmente, las muestras se secaron nuevamente en el horno a 110 °C y se anotó su peso seco.

Con los datos obtenidos, se realizaron los cálculos correspondientes para determinar el peso específico y la capacidad de absorción de los agregados. Los resultados de dichos cálculos están consignados en la Tabla 8 y 9.

Tabla 8

Peso específico y porcentaje de absorción del agregado grueso

Descripción	Valor	Unidad
Peso de muestra seca	1985.30	gr
Peso de la muestra SSS	2000.10	gr
Peso de la muestra sumergida	1247.20	gr
Peso específico de masa	**2.64**	**gr/cm^3**
Porcentaje de absorción	**0.75**	**%**

Tabla 9

Peso específico y porcentaje de absorción del agregado fino

Descripción	Valor	Unidad
Peso de bandeja	188.50	gr
Peso de bandeja + muestra seca	682.80	gr
Peso de bandeja + muestra SSS	688.70	gr
Peso de fiola + agua	662.30	gr
Peso fiola + muestra sss + agua	973.20	gr
Peso de muestra seca	494.30	gr
Peso de la muestra SSS	500.20	gr
Volumen de masa + volumen de vacíos	189.30	gr
Volumen de masa	183.40	gr
Peso específico de masa	**2.61**	**gr/cm^3**
Porcentaje de absorción	**1.19**	**%**

e. Contenido de Humedad:

Para entender cuánta agua contienen los agregados antes de usarlos en la mezcla de concreto, realizamos un ensayo siguiendo la norma NTP 339.185 (INACAL, 2019h). Este paso es importante porque la cantidad de humedad que traen los materiales afecta el comportamiento del concreto tanto cuando está fresco como cuando se endurece.

El procedimiento que se sigue es bastante sencillo:

1. Primero, se tomó una muestra del agregado tal como se encontraba en el ambiente y pesamos 500 gramos.

2. Luego, se colocó la muestra en un horno a una temperatura constante de 110°C durante 24 horas. Después de este tiempo, la muestra perdió toda su humedad y registramos su peso seco.

La diferencia entre el peso inicial y el peso seco nos indicó la cantidad de agua evaporada. Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 10 y 11, que proporcionan una visión precisa del contenido de humedad de los agregados en este ensayo.

Tabla 10

Contenido de humedad del agregado grueso

Descripción	Valor	Unidad
Peso de bandeja	0.673	kg
Peso de bandeja + muestra seca	2.9956	kg
Peso de muestra húmeda	2.3226	kg
Peso de muestra seca	2.319	kg
Contenido de agua	0.0036	L
Porcentaje de humedad	**0.16**	**%**

Tabla 11

Contenido de humedad del agregado fino

Descripción	Valor	Unidad
Peso de bandeja	183.00	kg
Peso de bandeja + muestra húmeda	701.00	kg
Peso de bandeja + muestra seca	694.40	kg
Peso de muestra húmeda	518.00	kg
Peso de muestra seca	511.40	kg
Contenido de agua	6.60	L
Porcentaje de humedad	**1.29**	**%**

5.1.2. Vidrio molido

El vidrio de ventana, utilizado ampliamente en la construcción, es un tipo de vidrio sodocálcico compuesto principalmente por sílice (SiO_2), óxidos de sodio (Na_2O) y calcio (CaO). Estas composiciones le otorgan propiedades físicas y químicas que lo hacen ideal para su reutilización en aplicaciones de concreto. Su densidad promedio es de alrededor de 2500 kg/m³, lo que contribuye a la estabilidad del concreto cuando se usa como reemplazo parcial de agregados finos (Tamanna et al., 2020).

Una de las características clave del vidrio de ventana es su baja absorción de agua, lo que lo convierte en un material inerte que no compromete la trabajabilidad del concreto. Esta propiedad es crucial, ya que permite mantener la consistencia y durabilidad de las mezclas de concreto reciclado (Ashish, 2018)

Para su empleo en concreto reciclado, el vidrio debe pasar por un proceso de trituración y tamizado hasta obtener partículas con una granulometría similar a la de los agregados finos tradicionales. Este proceso no solo asegura una adecuada distribución del material dentro de la mezcla, sino que también permite un control preciso de las propiedades mecánicas del concreto (Tamanna et al., 2020).

a. Granulometría:

Se realizó el ensayo granulométrico del vidrio molido empleado, tomando en cuenta la misma normativa empleado para el agregado fino, ASTM C136 y la NTP 400.012 (ASTM International, 2023b; INACAL, 2019j). El objetivo de este ensayo fue determinar la distribución granulométrica del vidrio molido para reemplazar al agregado fino en el diseño del concreto sostenible. El procedimiento fue la misma que se realizó para el agregado fino, como indica en el ítem 5.1.1. A continuación, se muestra el resultado de la granulometría del vidrio molido en la Tabla 12 y la curva de análisis granulométrico, en la Figura 9.

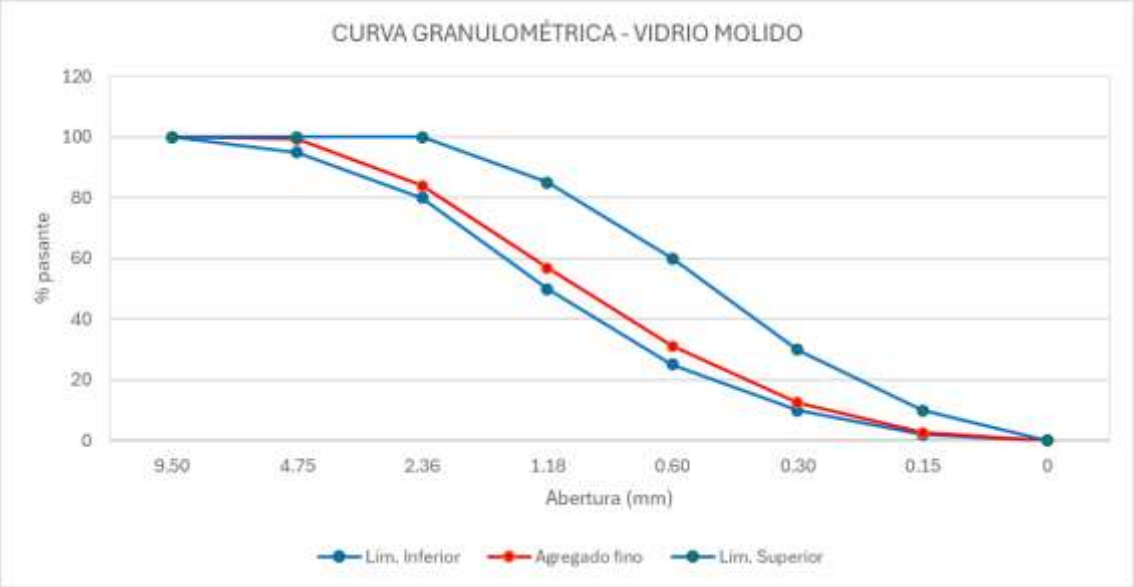
Tabla 12

Análisis granulométrico - Vidrio molido reciclado

N° Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
N° 4	4.75	14.39	0.72	0.72	99.28
N° 8	2.36	305.61	15.29	16.01	83.99
N° 16	1.18	542.30	27.13	43.14	56.86
N° 30	0.60	514.00	25.72	68.86	31.14
N° 50	0.30	371.90	18.61	87.47	12.53
N° 100	0.15	198.40	9.93	97.39	2.61
Fondo	-	52.10	2.61	100.00	0.00
	Total	**1998.7**	**100.00**		

Figura 9

Curva del análisis granulométrico del vidrio molido reciclado



5.1.3. Cemento

El cemento utilizado en el diseño del concreto fue un cemento Portland hidráulico de alta resistencia a los sulfatos, conocido como cemento tipo Ultra HS. En esta investigación se empleó cemento de la marca Andino, el cual presenta una densidad de 2.98 g/cm³ y cumple con la NTP 334.082 y la ASTM C1157, garantizando la calidad y desempeño del material (ASTM International, 2023a; INACAL, 2019d).

Adicionalmente, este cemento se caracteriza por su resistencia a la humedad y al salitre, así como por su adecuado comportamiento frente a agregados potencialmente álcali-reactivos. Asimismo, contiene adiciones que contribuyen a mejorar la impermeabilidad del concreto, lo que favorece su durabilidad, especialmente en ambientes agresivos. Las propiedades físicas y químicas del cemento fueron obtenidas de la ficha técnica proporcionada por el fabricante (UNACEM Peru, 2022), la cual se presenta en el Anexo 2. En la Figura 10 se muestra el cemento utilizado en la presente investigación.

Figura 10

Cemento portland tipo HS Andino Ultra



Nota: De "Ficha Técnica Cemento Andino Tipo HS", por UNACEM Peru, 2022 (https://n9.cl/o5cp2).

5.1.4. Aditivo superplastificante

Para el diseño del concreto se utilizó el aditivo superplastificante SikaCem de la reconocida marca Sika, que presenta un peso específico de 1200 kg/m³. La dosificación sugerida para este aditivo se sitúa en un rango de 250 ml a 500 ml por cada 42.5 kg de cemento, lo que corresponde a entre el 0.7% y el 1.4% del peso del cemento, dependiendo de los requisitos específicos del proyecto. En la Figura 11 se muestra el aditivo superplastificante utilizado en la presente investigación.

Figura 11

Aditivo plastificante Sikacem



Nota: De “SikaCem® Plastificante”, por Sika Peru, 2025 (https://n9.cl/o6n19a).

5.1.5. Humo de sílice

El humo de sílice utilizado en esta investigación corresponde al producto comercial Sikafume, de la marca Sika, el cual se emplea como adición mineral de carácter cementante. Este material presenta un peso específico de 2200 kg/m³ y se caracteriza por su elevada finura y alto contenido de sílice amorfa, lo que le confiere un comportamiento altamente puzolánico (Sika Peru, 2022). De acuerdo con las recomendaciones del fabricante, la dosificación del humo de sílice varía entre 5% y 10% del peso del cemento, rango dentro del cual se optimizan las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto (Sika Peru, 2022). Su incorporación contribuye a la densificación de la microestructura, la reducción de la permeabilidad y la mejora del desempeño del concreto frente a ambientes agresivos. La Figura 12 muestra la apariencia del producto utilizado en la presente investigación.

Figura 12

Microsilice Sikafume de 25kg



Nota: De "SikaFume® Adición mineral – Microsílice", por Sika Peru, 2025 (https://n9.cl/en44z).

5.2. Procedimiento de dosificación

Se diseñaron diversas formulaciones que incluyeron un diseño patrón sin adiciones y mezclas experimentales con reemplazo parcial de la arena por vidrio molido reciclado y del cemento por humo de sílice. Cada diseño fue elaborado manteniendo constante la relación agua/cemento, con el propósito de comparar su desempeño bajo condiciones similares. La dosificación consideró aspectos como la trabajabilidad, resistencia esperada y compatibilidad entre materiales, buscando optimizar el uso de recursos sin comprometer la calidad del concreto.

5.2.1. Diseño del concreto patrón

Para la elaboración de todos los diseños de mezcla fue necesario contar previamente con la caracterización física y mecánica de los materiales empleados. En ese sentido, se determinaron las propiedades del cemento, del agregado fino y del agregado grueso, las cuales constituyen insumos fundamentales para el proceso de dosificación.

El diseño del concreto patrón se realizó siguiendo el método del American Concrete Institute (ACI 211), el cual establece procedimientos estandarizados para la selección de proporciones adecuadas de los materiales en función de la resistencia requerida, la trabajabilidad y las características de los agregados (ACI Committee 211, 2002). Este método permite obtener una mezcla base confiable y reproducible, que sirve como

referencia para evaluar el efecto de las sustituciones parciales propuestas en los diseños alternativos.

En la Tabla 13 se presentan los resultados de la caracterización del cemento, del agregado fino y del agregado grueso utilizados en el diseño patrón, los cuales fueron empleados posteriormente en el cálculo de las proporciones de todos los diseños de concreto evaluados en la presente investigación.

Tabla 13

Caracterización del agregado grueso, fino y cemento

Datos	Agregado Fino	Agregado Grueso	Cemento	Unidad
Peso unitario suelto seco	1,572.05	1,582.74	-	kg/m^3
Peso unitario compactado seco	1,791.19	1,717.41	-	kg/m^3
Peso específico	2.61	2.64	2.98	gr/cm^3
Porcentaje de absorción	1.19	0.75	-	%
Contenido de humedad	1.33	0.16	-	%
Módulo de fineza	3.10	-	-	-
Tamaño máximo nominal (TNM)	-	1/2	-	in

Contenido de agua

Para el diseño del concreto, el contenido de agua es un factor crucial, ya que depende tanto del asentamiento deseado como del tamaño nominal del agregado grueso. En este caso, se utilizó como guía la Tabla 14 obtenida del ACI, la cual sugiere un volumen inicial de 228 L/m^3 de agua considera 6” de asentamiento y 1/2” de TMN del agregado grueso. Sin embargo, al incorporar el aditivo superplastificante SikaCem, que mejora la trabajabilidad sin necesidad de añadir más agua, se decidió ajustar el contenido a 216 L/m^3.

Dado que la densidad del agua es de 1000 kg/L, esto se traduce en que para obtener 1 m^3 de concreto, se requieren 216 kg de agua. Este ajuste garantizó una mezcla manejable y de calidad, evitando un exceso innecesario de agua en la mezcla.

Tabla 14

Volumen unitario de agua

Agua en L/m³, para los TMN de los agregados gruesos y consistencias indicados								
Asentamiento	**3/8”**	**1/2”**	**3/4”**	**1”**	**1 ½”**	**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"	216	216	197	184	174	166	154	-

Nota. De “Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete”, por ACI Committee 211, 2002. (https://acortar.link/JMnneO)

Contenido de aditivo superplastificante

El concreto diseñado incluyó un 1% del superplastificante Sika Cem en relación con el peso del cemento. Este aditivo se incorporó con el propósito de mejorar la trabajabilidad de la mezcla, evitando la necesidad de añadir más agua para lograr una consistencia adecuada.

Contenido de cemento

Para determinar la cantidad de cemento en cada metro cúbico de concreto, se tomó en cuenta la relación agua-cemento (R a/c). Según lo especificado en la sección 4.3.3., la relación a considerar fue de 0.56, resultado del diseño de mezcla con el método ACI 211. El cálculo del contenido de cemento se realizó utilizando la ecuación correspondiente a la relación agua-cemento, la Ecuación (3):

$$R_{a/c} = \frac{a}{C} \tag{3}$$

Donde $R_{a/c}$ expresa la relación de agua y cemento, a, la cantidad de agua y C la cantidad de cemento en la mezcla. De acuerdo con lo especificado en la sección 5.2.1., el contenido de agua para 1 m³ de concreto es de 216 kg. Utilizando este valor en la Ecuación 2, se pudo calcular la cantidad de cemento necesaria. Utilizando este valor en la Ecuación (2), se calculó la cantidad de cemento necesaria. A continuación, se muestra el desarrollo del cálculo, el cual se resume en la Ecuación (4):

$$0.56 = \frac{216}{C} \implies C = \frac{216}{0.56} = 385.71\ kg \quad (4)$$

Por lo tanto, de acuerdo con este cálculo, se obtuvo que para 1 m^3 de concreto con $R_{a/c}$ 0.56 se requiere 385.71 kg de cemento.

Contenido de agregado grueso

El contenido de agregado grueso en el concreto fue calculado empleando la Tabla 15 obtenido del ACI 211. Para utilizar dicha tabla de manera precisa, fue necesario contar con las propiedades específicas de los agregados, las cuales se encuentran detalladas en la tabla de propiedades. Según esta información, el agregado fino tuvo un módulo de fineza de 3.097, mientras que el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado grueso fue de ½".

Tabla 15

Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto

TMN	Módulo de fineza del agregado fino			
(Agregado grueso)	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
1"	0.71	0.69	0.67	0.65
1 ½"	0.76	0.74	0.72	0.70
2"	0.78	0.76	0.74	0.72
3"	0.81	0.79	0.77	0.75
4"	0.87	0.85	0.83	0.81

Nota. De "Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete", por ACI Committee 211, 2002. (https://acortar.link/JMnneO)

Considerando el tamaño máximo nominal (TMN) de ½" y un módulo de fineza de 3.10 de los agregados usados, se realizó una extrapolación de los valores proporcionados en la tabla, determinando que el volumen del agregado grueso es de 0.52 m^3. Basado en su peso unitario compactado seco, esto corresponde a 893.05 kg de agregado grueso por metro cúbico de concreto.

Contenido de agregado fino

El volumen de agregado fino en el diseño del concreto se calculó restando de 1 m^3 de concreto la suma de los volúmenes correspondientes al agua, cemento, agregado grueso

y aditivo superplastificante. Los detalles de los volúmenes de cada uno de estos componentes se encuentran en la Tabla 16.

Tabla 16

Volumen de material por metro cúbico sin considerar el agregado fino

R a/c	Materiales	Peso específico (kg/m^3)	Cantidad (kg)	Volumen (m^3)
0.56	Cemento Portland Ultra	2,980.00	385.71	0.129
0.56	Agregado grueso	2,636.87	893.05	0.339
0.56	Sika cem	1,200.00	3.86	0.003
0.56	Agua	1,000.00	216.00	0.216
	Volumen Total			**0.712**

Tomando en cuenta los volúmenes presentados, se calculó el volumen del agregado fino necesario para un metro cúbico de concreto. Para ello, se consideró la relación agua-cemento de 0.56. A continuación, se muestra el cálculo mediante la Ecuación (5):

$$1\,m^3 - 0.712\,m^3 = 0.288\,m^3 \tag{5}$$

A continuación, utilizando el peso específico del agregado fino, se determinó la cantidad requerida para un metro cúbico de concreto. Para ello, se multiplicó la masa unitaria del material por el volumen correspondiente obtenido previamente, como se muestra en la Ecuación (6):

$$2611.20\,\frac{kg}{m^3} \times 0.288\,m^3 = 751.17\,kg \tag{6}$$

El resultado obtenido fue de 751.17 kg, correspondiente a una relación agua-cemento de 0.56.

Proporciones de mezcla de concreto patrón

Después del cálculo de cada componente del concreto, se obtuvo la Tabla 17 en la cual se muestran las proporciones en kg y en volumen para un metro cubico de concreto.

Tabla 17

Proporciones de materiales para el diseño de concreto patrón

R a/c	Componentes	Peso Específico (kg/m^3)	Peso seco (kg)	Volumen (m^3)
0.56	Cemento Portland Ultra	2,980.00	385.71	0.129
0.56	Agregado fino	2,611.20	751.17	0.288
0.56	Agregado grueso	2,636.87	893.05	0.339
0.56	Sika Cem	1,200.00	3.86	0.003
0.56	Agua	1,000.00	216.00	0.216
0.56	Aire	-	-	0.025
	Total Vol.			**1.000**

5.2.2. Diseño V15 – 15% vidrio

Este diseño experimental incorpora un 15% de vidrio molido reciclado como reemplazo parcial del agregado fino (arena). Se mantuvo la relación agua/cemento en 0.56 y el resto de los componentes se ajustaron utilizando el método del volumen absoluto. La Tabla 18 muestra la dosificación correspondiente por metro cúbico de concreto.

Tabla 18

Diseño de concreto con un reemplazo de 15% de vidrio molido

R a/c	Componentes	Peso seco (kg/m^3)
0.56	Cemento Portland Ultra	385.71
0.56	Agregado fino	638.49
0.56	Agregado grueso	893.05
0.56	Sika Cem	4.63
0.56	Agua	216.00
0.56	Vidrio molido	112.42

5.2.3. Diseño V20 – 20% vidrio

En esta mezcla se reemplazó el 20% de la arena por vidrio molido reciclado. El objetivo fue analizar cómo un mayor porcentaje de sustitución influye en las propiedades del concreto. Se mantuvo la proporción de agua y cemento, y se calcularon los volúmenes de cada componente según el método de dosificación. A continuación, en la Tabla 19 se detalla la composición del diseño por m^3.

Tabla 19

Diseño de concreto con un reemplazo de 20% de vidrio molido

R a/c	Componentes	Peso seco (kg/m^3)
0.56	Cemento Portland Ultra	385.71
0.56	Agregado fino	600.94
0.56	Agregado grueso	893.05
0.56	Sika Cem	4.63
0.56	Agua	216.00
0.56	Vidrio molido	150.23

5.2.4. Diseño V25 – 25% vidrio

Este diseño contempla un 25% de vidrio molido reciclado como reemplazo parcial de la arena, siendo la mezcla con mayor nivel de sustitución evaluada. Con este porcentaje se buscó explorar el límite de reemplazo manteniendo características aceptables de resistencia y trabajabilidad. La Tabla 20 resume la dosificación aplicada.

Tabla 20

Diseño de concreto con un reemplazo de 25% de vidrio molido

R a/c	Componentes	Peso seco (kg/m^3)
0.56	Cemento Portland Ultra	385.71
0.56	Agregado fino	563.38
0.56	Agregado grueso	893.05
0.56	Sika Cem	4.63
0.56	Agua	216.00
0.56	Vidrio molido	187.79

5.2.5. Diseño HS 10 – 10% humo de sílice

En este diseño se realiza una sustitución parcial del 10% del cemento Portland por humo de sílice, con el objetivo de evaluar la influencia de este material puzolánico en las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto. Se mantuvo la misma relación agua/cemento empleado en el concreto patrón y en los demás diseños. La dosificación correspondiente se presenta en la Tabla 21.

Tabla 21

Diseño de concreto con un reemplazo de 10% humo de sílice

R a/c	Componentes	Peso seco (kg/m^3)
0.56	Cemento Portland Ultra	347.14
0.56	Agregado fino	751.17
0.56	Agregado grueso	893.05
0.56	Sika Cem	4.17
0.56	Agua	216.00
0.56	Vidrio molido	-
0.56	Humo de sílice	38.57

5.2.6. Diseño HS 10 V15 – 10% humo de sílice + 15% vidrio

En este diseño se combinan dos sustituciones: el 15% de arena es reemplazada por vidrio molido reciclado y el 10% del cemento por humo de sílice. Esta combinación busca mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto. Se utilizó la misma relación agua/cemento que, en los otros diseños, y se ajustaron las cantidades con base en el método del volumen absoluto. La dosificación se presenta en la Tabla 22.

Tabla 22

Diseño de concreto con un reemplazo de 10% humo de sílice y 15% vidrio

R a/c	Componentes	Peso seco (kg/m^3)
0.56	Cemento Portland Ultra	347.14
0.56	Agregado fino	638.49
0.56	Agregado grueso	893.05
0.56	Sika Cem	4.17
0.56	Agua	216.00
0.56	Vidrio molido	112.68
0.56	Humo de sílice	38.57

5.2.7. Diseño HS 10 V20 – 10% humo de sílice + 20% vidrio

Este diseño representa una de las propuestas más sostenibles del estudio, con un reemplazo simultáneo del 20% de la arena por vidrio molido y del 10% del cemento por humo de sílice. Se buscó determinar el efecto combinado de ambos materiales reciclados sobre la resistencia y comportamiento general del concreto. La Tabla 23 muestra las proporciones detalladas por metro cúbico.

Tabla 23

Diseño de concreto con un reemplazo de 10% humo de sílice y 20% vidrio

R a/c	Componentes	Peso seco (kg/m^3)
0.56	Cemento Portland Ultra	347.14
0.56	Agregado fino	600.94
0.56	Agregado grueso	893.05
0.56	Sika Cem	4.17
0.56	Agua	216.00
0.56	Vidrio molido	150.23
0.56	Humo de sílice	38.57

5.3. Ensayos de concreto

Para la implementación del prototipo, se realizó el mezclado de los concretos diseñados en la sección 5.4. Primero, se ajustaron las proporciones para corregir los efectos de humedad y absorción de los agregados. Los resultados se presentan en la Tabla 24.

Tabla 24

Dosificación de materiales corregidas humedad y absorción de los agregados

		Dosificación corregida (kg)						
R a/c	**Materiales**	**P**	**V15**	**V20**	**V25**	**HS10**	**HS10V15**	**HS10V20**
0.56	Cemento Andino Ultra HS	385.71	385.71	385.71	385.71	347.14	347.14	347.14
	Agregado Fino	761.19	647.01	608.95	570.89	761.19	647.01	608.95
	Agregado Grueso	894.44	894.44	894.44	894.44	894.44	894.44	894.44
	Sika Cem	3.86	4.63	4.63	4.63	4.17	4.17	4.17
	Agua	224.02	223.61	223.47	223.34	224.02	223.61	223.47
	Humo de sílice	0	0	0	0	38.57	38.57	38.57
	Vidrio	0	112.68	150.23	187.79	0	112.68	150.23

Una vez obtenidas las dosificaciones corregidas, se procedió de la siguiente manera:

1. **Preparar los materiales**: Se realizó el pesaje de todos los componentes según las dosificaciones ajustadas.
2. **Humedecer las herramientas**: Se humedecieron todas las herramientas antes de su uso para evitar la pérdida de agua de la mezcla.

3. **Mezclar los materiales**: Se siguió la secuencia de mezclado del concreto descrita en la Tabla 25.

Tabla 25

Secuencia de mezclado para la elaboración de concreto

Secuencia de mezclado	Tiempo (min)
Agua 30%	0.30
Agregado grueso 100%	0.30
Agregado fino 100%	0.30
Vidrio Molido 100%	0.30
Agua 40%	0.30
Cemento 100%	0.30
Agua 30%	0.30
Aditivo superplastificante	0.40
Mezclado final	4.00

Vaciado y reposo de la mezcla: Tras obtener una mezcla homogénea, se descargó el concreto de la mezcladora y se dejó reposar para realizar los ensayos en estado fresco y la toma de muestras.

5.3.1. Ensayos en estado fresco

Se describen los ensayos realizados al concreto en estado fresco, con el objetivo de evaluar su trabajabilidad y condiciones de colocación. Las pruebas incluyeron los siguientes ensayos:

a. Temperatura

La medición de la temperatura del concreto fresco es esencial para verificar que se encuentre dentro de los rangos aceptables, lo cual asegura una adecuada hidratación del cemento y un rendimiento óptimo del concreto. Usualmente, la temperatura del concreto fresco debe oscilar entre 10°C y 32°C, siendo ideal que se mantenga cerca de 20°C para favorecer la hidratación del cemento y reducir el riesgo de fisuras por diferencias térmicas.

Este proceso se realiza siguiendo la normativa NTP 339.184, que establece el uso de un termómetro con una precisión de 0.5°C y un rango de medición de 0°C a 50°C (INACAL, 2019g). El procedimiento consistió en introducir el termómetro a una profundidad mínima de 75 mm en la masa de concreto, esperando alrededor de 2 minutos hasta que la

lectura se estabilice para poder registrar la temperatura. En la Figura 13 se muestra una fotografía correspondiente a la realización del ensayo de temperatura del concreto fresco durante el proceso experimental. El registro fotográfico de este ensayo se presenta en el Anexo 7.

Figura 13

Prueba de temperatura en el concreto fresco



Resultados de la prueba de temperatura

Los ensayos realizados para caracterizar el concreto en estado fresco incluyeron la medición del asentamiento (slump), la temperatura y el contenido de aire. Estas propiedades son fundamentales para identificar el impacto de las sustituciones en el comportamiento del concreto fresco.

Se registro las temperaturas de las distintas muestras, después de haber realizado la mezcla para los cuatro diseños, esta prueba se realizó utilizando un termómetro digital. Esto permitió determinar si había alguna diferencia o similitud entre los diseños. En las Tablas 26, 27, 28, 29, 30, 31 y 32 se presentan los resultados de la prueba de temperatura

correspondientes a cada uno de los diseños de mezcla evaluados, mientras que en la Tabla 33 se muestra el resumen comparativo de los resultados obtenidos para todos los diseños.

Tabla 26

Resultado de temperatura por la NTP 339.184 del concreto patrón

TEMPERATURA NTP 339.184 (°C)
20.60

Tabla 27

Resultado de temperatura por la NTP 339.184 del concreto con 15% de vidrio

TEMPERATURA NTP 339.184 (°C)
21.45

Tabla 28

Resultado de temperatura por la NTP 339.184 del concreto con 20% de vidrio

TEMPERATURA NTP 339.184 (°C)
21.30

Tabla 29

Resultado de temperatura por la NTP 339.184 del concreto con 25% de vidrio

TEMPERATURA NTP 339.184 (°C)
21.19

Tabla 30

Resultado de temperatura por la NTP 339.184 del concreto con 10% de humo de sílice

TEMPERATURA NTP 339.184 (°C)
27.90

Tabla 31

Resultado de temperatura por la NTP 339.184 del concreto con 10% de humo de sílice y 15% de vidrio

TEMPERATURA NTP 339.184 (°C)
26.80

Tabla 32

Resultado de temperatura por la NTP 339.184 del concreto con 10% de humo de sílice y 20% de vidrio

TEMPERATURA NTP 339.184 (°C)
21.19

A continuación, se muestra la tabla de resumen de temperatura de los diseños de mezcla.

Tabla 33

Resumen de los datos de temperatura por la NTP 339.184

TEMPERATURA NTP 339.184 (°C)							
Diseño de Mezcla	Concreto Patrón	Concreto con 15% de vidrio	Concreto con 20% de vidrio	Concreto con 25% de vidrio	Concreto 10% de HS	Concreto 15% de vidrio y 10% de HS	Concreto con 20% de vidrio y 10% de HS
Temperatura del concreto (°C)	20.6	21.45	21.3	21.19	27.9	26.8	21.19

b. Asentamiento (Slump)

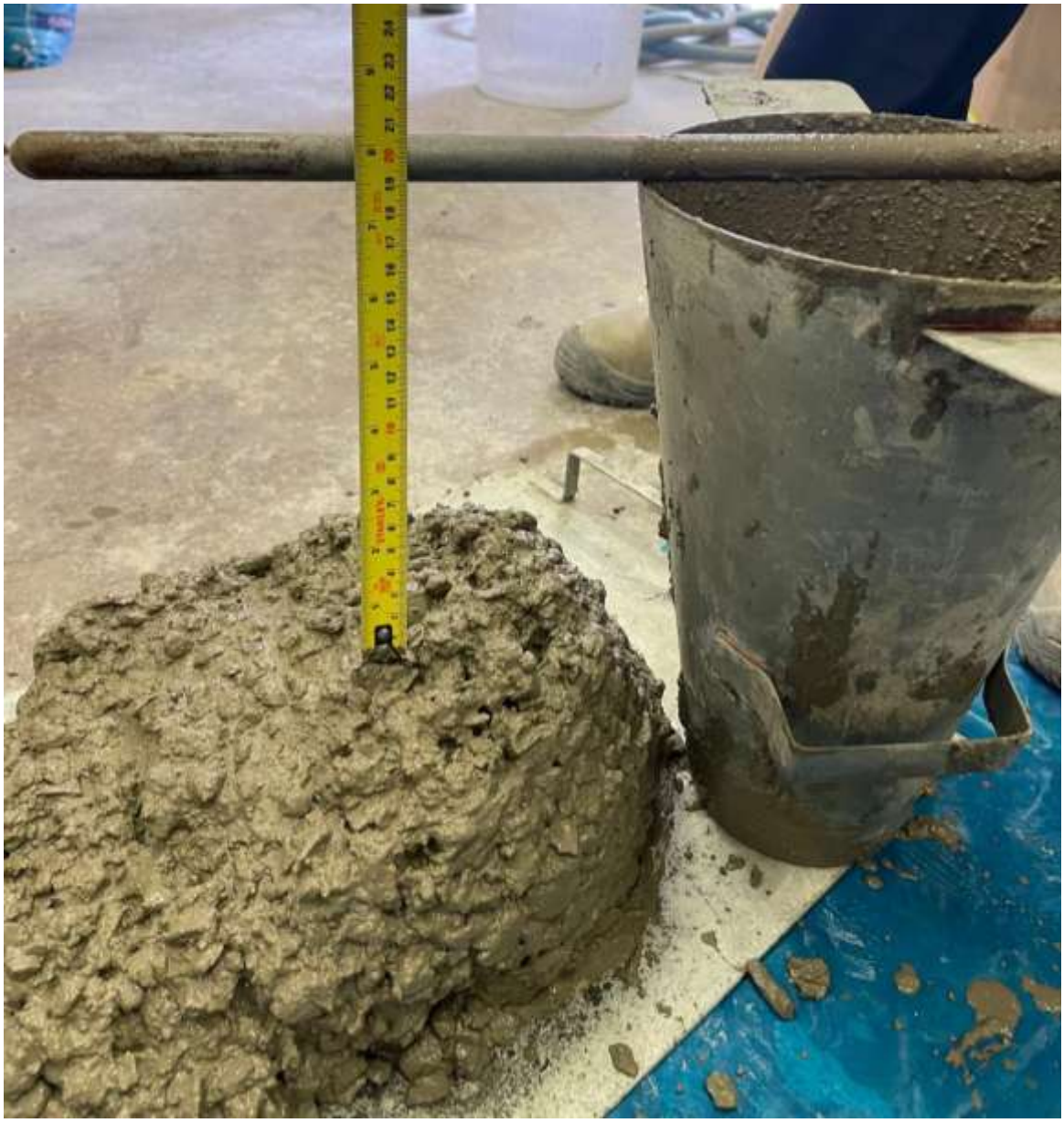
El ensayo de asentamiento, conocido como *slump*, se utilizó para evaluar la consistencia y la trabajabilidad del concreto fresco. Como se observa en la Figura 14, este ensayo se realizó durante el proceso experimental para verificar el comportamiento del concreto en estado fresco. Para su ejecución, se siguió lo establecido en la NTP 339.035, la cual detalla el procedimiento correspondiente (INACAL, 2019e):

1. **Humedecer los materiales**: Se humedeció previamente todos los materiales para evitar la pérdida de humedad durante la prueba.
2. **Preparar el cono de Abrams**: Se colocó el cono de Abrams sobre una base metálica no absorbente.
3. **Estabilizar el cono**: Se paró sobre las orejas del cono de Abrams para evitar movimientos durante la prueba.
4. **Llenar el cono**: Se rellenó el cono con la mezcla de concreto en tres capas, compactando cada una con 25 golpes de una varilla de acero.
5. **Nivelar la superficie**: Se utilizó la varilla metálica para nivelar la parte superior del concreto.
6. **Retirar el cono**: Se levantó el cono de Abrams de manera cuidadosa, vertical, y constante, sin movimientos bruscos.
7. **Medir el desplazamiento**: Se invirtió el cono de Abrams al lado de la mezcla desplazada y se colocó la varilla metálica de forma horizontal sobre el cono, para medir la diferencia entre la altura original del cono y la altura alcanzada por el concreto desplazado.

En las Tablas 34, 35, 36, 37, 38, 39 y 40 se presentan los resultados de la prueba de asentamiento (slump) correspondientes a cada uno de los diseños de mezcla evaluados, mientras que en la Tabla 41 se muestra el resumen comparativo de los resultados obtenidos para todos los diseños. El registro fotográfico del ensayo de asentamiento (slump) del concreto se presenta en el Anexo 6.

Figura 14

Ensayo de asentamiento



Resultados del ensayo de asentamiento

Tabla 34

Resultado del ensayo de asentamiento por la NTP 339.035 del concreto patrón

SLUMP NTP 339.035 (in)
6.00

Tabla 35

Resultado del ensayo de asentamiento por la NTP 339.035 del concreto con 15% de vidrio

SLUMP NTP 339.035 (in)
6.40

Tabla 36

Resultado del ensayo de asentamiento por la NTP 339.034 del concreto con 20% de vidrio

SLUMP NTP 339.035 (in)
6.80

Tabla 37

Resultado del ensayo de asentamiento por la NTP 339.035 del concreto con 25% de vidrio

SLUMP NTP 339.035 (in)
7.50

Tabla 38

Resultado del ensayo de asentamiento por la NTP 339.035 del concreto con 10% de humo de sílice

SLUMP NTP 339.035 (in)
4.50

Tabla 39

Resultado del ensayo de asentamiento por la NTP 339.035 del concreto con 10% de humo de sílice y 15% de vidrio

SLUMP NTP 339.035 (in)
5.00

Tabla 40

Resultado del ensayo de asentamiento por la NTP 339.035 del concreto con 10% de humo de sílice y 20% de vidrio

SLUMP NTP 339.035 (in)
7.00

Resumen de resultados del ensayo de asentamiento

Tabla 41

Resumen de los datos del ensayo de asentamiento por la NTP 339.035

SLUMP NTP 339.035 (in)							
Diseño de mezcla	Concreto Patrón	Concreto con 15% de vidrio	Concreto con 20% de vidrio	Concreto con 25% de vidrio	Concreto con 10% de HS	Concreto con 10% de HS y 15% de vidrio	Concreto con 10% de HS y 20% de vidrio
Slump medido (in)	6.00	6.40	6.80	7.50	4.50	5.00	7.00

c. Contenido de aire

La prueba de contenido de aire en el concreto se realizó siguiendo la NTP 339.083, y su objetivo fue determinar la cantidad de aire atrapado dentro de la masa de concreto, un aspecto crucial debido a sus efectos en las propiedades del material (INACAL, 2019f). Como se observa en la Figura 15, se presenta una vista representativa del ensayo de contenido de aire en el concreto en estado fresco. El procedimiento completo se encuentra documentado mediante registro fotográfico en el Anexo 8. A continuación, se describe el procedimiento:

1. **Llenar el recipiente**: Se vertió la mezcla de concreto en el recipiente en tres capas, compactando cada capa con 25 varilladas y aplicando de 10 a 15 golpes alrededor del recipiente usando un martillo de goma.
2. **Nivelar y limpiar**: Se niveló la superficie del concreto y limpiar los bordes del recipiente.
3. **Colocar la tapa**: Se aseguró la tapa con el medidor de aire, fijándola firmemente con las grapas en cruz.
4. **Cerrar la válvula de purga de aire**.
5. **Purgar con agua**: Se abrió las llaves de purga de agua, llenar el medidor hasta que el agua salga limpia y libre de burbujas.
6. **Cerrar la purga de agua y presurizar**: Se cerró la llave de purga de agua y bombeó aire hasta que el manómetro indique un valor de 0.
7. **Medir y registrar**: Se liberó la presión y se registró la lectura del manómetro para conocer el contenido de aire en el concreto.

Figura 15

Ensayo de contenido de aire en el concreto fresco



Resultados del ensayo de contenido de aire

Para cada uno de los 4 diseños de mezcla se realizó la prueba de contenido de aire, para realizar esta prueba, se siguió lo establecido en la NTP 339.083 (INACAL, 2019f). A continuación, se presentarán los resultados de este ensayo según el diseño de la mezcla. En las Tablas 42, 43, 44, 45, 46, 47 y 48 se muestran los resultados del contenido de aire correspondientes a cada uno de los diseños evaluados, mientras que en la Tabla 49 se presenta el resumen comparativo de los resultados obtenidos en todos los ensayos de contenido de aire.

Tabla 42

Resultado del ensayo de contenido de aire por la NTP 339.083 del concreto patrón

CONTENIDO DE AIRE NTP 339.083 (%)
1.98

Tabla 43

Resultado del ensayo de contenido de aire por la NTP 339.083 del concreto con 15% de vidrio

CONTENIDO DE AIRE NTP 339.083 (%)
2.10

Tabla 44

Resultado del ensayo de contenido de aire por la NTP 339.083 del concreto con 20% de vidrio

CONTENIDO DE AIRE NTP 339.083 (%)
2.30

Tabla 45

Resultado del ensayo de contenido de aire por la NTP 339.083 del concreto con 25% de vidrio

CONTENIDO DE AIRE NTP 339.083 (%)
2.50

Tabla 46

Resultado del ensayo de contenido de aire por la NTP 339.083 del concreto con 10% de humo de sílice

CONTENIDO DE AIRE NTP 339.083 (%)
2.00

Tabla 47

Resultado del ensayo de contenido de aire por la NTP 339.083 del concreto con 10% de humo de sílice y 15 % de vidrio

CONTENIDO DE AIRE NTP 339.083 (%)
2.10

Tabla 48

Resultado del ensayo de contenido de aire por la NTP 339.083 del concreto con 10% de humo de sílice y 20 % de vidrio

CONTENIDO DE AIRE NTP 339.083 (%)
2.50

Resumen de resultados del contenido de aire

Tabla 49

Resumen de los datos del ensayo de contenido de aire por la NTP 339.083

CONTENIDO DE AIRE NTP 339.083 (%)							
Diseño de Mezcla	Concreto Patrón	Concreto con 15% de vidrio	Concreto con 20% de vidrio	Concreto con 25% de vidrio	Concreto con 10% de HS	Concreto con 10% de HS y 15% de vidrio	Concreto con 10% de HS y 20% de vidrio
Contenido de Aire obtenido (%)	1.98	2.10	2.30	2.50	2.00	2.10	2.50

5.3.2. Ensayos en estado endurecido

Esta sección presenta los ensayos aplicados al concreto una vez fraguado, enfocados en determinar su comportamiento mecánico. Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión y a la flexión a los 7, 14 y 28 días de curado.

a. Obtención de muestras

La obtención de muestras representativas fue esencial para realizar las pruebas en estado endurecido del concreto, asegurando la calidad y el desempeño de las estructuras. Este

proceso se llevó a cabo principalmente a través de la preparación de probetas y vigas. La NTP 339.033 proporciona los lineamientos para la preparación y curado de estas muestras, garantizando su representatividad y la confiabilidad de los resultados obtenidos en las pruebas (INACAL, 2019a). En la Figura 16 se muestran las muestras de probetas y vigas de concreto en laboratorio, preparadas para la ejecución de los ensayos correspondientes.

Para asegurar resultados confiables, las muestras fueron representativas del concreto utilizado en el diseño, lo cual es crucial para evaluar con precisión sus propiedades. Siguiendo los procedimientos indicados en la normativa, que garantizan que las pruebas en estado endurecido reflejen con fidelidad el comportamiento real del concreto empleado, estas muestras se obtuvieron a través de probetas y vigas:

Probetas: Para la elaboración de probetas, existen dos tamaños de moldes estandarizados: uno pequeño, con un diámetro de 4 pulgadas y una altura de 8 pulgadas**,** y otro grande, con un diámetro de 6 pulgadas y una altura de 12 pulgadas. Al utilizar moldes pequeños, es necesario extraer 3 muestras por cada prueba, mientras que con moldes grandes solo se requieren 2 muestras. El procedimiento para la obtención de las probetas fue lo siguiente:

1. Preparación de los moldes: Se aplicó desmoldante en los moldes para facilitar el desmolde.
2. Llenado de los moldes: Se vertió el concreto en 3 capas en moldes pequeños, compactando cada capa con 25 varilladas y aplicando 10 a 15 golpes con un martillo de goma para eliminar el aire atrapado.
3. Nivelación de la superficie: Se alisó la superficie del concreto utilizando la varilla para enrasar sobre el borde del molde.
4. Secado y desmolde: Se dejó que el concreto se seque durante 24 horas antes de desmoldar las probetas.
5. Rotulado de probetas: Se identificó las probetas con el número de muestra, fecha de vaciado y el código del diseño.
6. Curado de probetas: Se sumergió las probetas en agua saturada con cal en un ambiente controlado hasta la edad del ensayo.

Vigas: El molde estandarizado para la elaboración de vigas tiene unas dimensiones de 51 cm de largo, 15 cm de alto y 15 cm de ancho. Se deben obtener al menos 2 vigas para cada ensayo. El procedimiento para la elaboración de estas muestras fue lo siguiente:

1. **Preparación de los moldes**: Se aplicó desmoldante en los moldes para facilitar el desmolde.
2. **Llenado de los moldes**: Se vertió el concreto en 2 capas, compactando cada capa con 25 varilladas y aplicando de 10 a 15 golpes con un martillo de goma para eliminar el aire atrapado.
3. **Nivelación de la superficie**: Se alisó la parte superior del concreto utilizando la varilla para enrasar sobre el borde del molde.
4. **Secado y desmolde**: Se dejó que el concreto se seque durante 24 horas antes de desmoldar las vigas.
5. **Rotulado de las vigas**: Se identificó las vigas con el número de muestra, fecha de vaciado y el código del diseño.
6. **Curado de las vigas**: Se sumergió las vigas en agua saturada con cal en un ambiente controlado hasta la edad del ensayo.

Figura 16

Muestras de probetas y vigas de concreto para su posterior ensayo



El número de muestras a elaborar para la investigación se definió teniendo en cuenta que se realizó 4 diseños y 2 ensayos para edades de 7, 14 y 28 días. En resumen, se realizó 36 probetas y 24 vigas como se muestra en la tabla 25. En la Tabla 50 se muestra la cantidad de muestras elaboradas para cada diseño y tipo de ensayo.

Tabla 50

Número de muestras elaborados

R a/c	Sustitución	Probetas	Vigas
0.56	Vidrio 0%	9	6
0.56	Vidrio 15%	9	6
	Vidrio 20%	9	6
	Vidrio 25%	9	6
0.56	Humo de sílice 10%	9	6
	Vidrio 15% y humo de sílice 10%	9	6
	Vidrio 20% y humo de sílice 10%	9	6

b. Ensayo de resistencia a la compresión

El ensayo de resistencia a la compresión se realizó con el objetivo de determinar la capacidad mecánica del concreto endurecido frente a cargas axiales, siguiendo los lineamientos establecidos en la normativa técnica correspondiente. Como se observa en la Figura 17, este ensayo se llevó a cabo en laboratorio mediante la aplicación de carga sobre una probeta de concreto hasta provocar su falla.

En la Figura 17 se presenta una vista representativa del ensayo de compresión realizado. Asimismo, en el Anexo 10 se muestra una fotografía adicional del mismo ensayo como evidencia complementaria.

1. Medición de dimensiones: Se midió el diámetro superior, el diámetro inferior y la altura de las probetas que se van a ensayar.
2. Colocación en la máquina: Se colocó las probetas en la máquina de compresión, donde se aplicó una carga axial continua hasta que ocurra la falla.
3. Registro de carga: Registrar la carga máxima soportada por la probeta durante el ensayo.
4. Cálculo de resistencia: Calcular la resistencia a la compresión dividiendo la carga máxima soportada entre el área de la sección transversal de la probeta.

Figura 17

Ensayo de resistencia a compresión de concreto



Resultados del ensayo de resistencia a la compresión

Luego de la preparación de las mezclas de concreto patrón y de los otros tres diseños con reemplazo parcial de la arena por vidrio molido, se procedió a elaborar las probetas y vigas necesarias para realizar los ensayos de compresión y flexión del concreto en estado endurecido.

Se elaboraron nueve probetas y seis vigas para cada uno de los diseños propuestos, lo que sumó un total de 36 probetas y 24 vigas. Estos elementos fueron curados mediante inmersión en agua con adición de cal durante periodos de 7, 14 y 28 días, y posteriormente se les aplicaron cargas para obtener los valores de resistencia correspondientes a cada tipo de ensayo.

Una vez cumplidos los periodos de curado, se realizaron los ensayos de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días. Los resultados obtenidos a los 7 días de curado se presentan en la Tabla 51, mientras que su representación gráfica se muestra en la Figura 18. De igual forma, los resultados correspondientes a los 14 días de curado se muestran en la Tabla 52 y en la Figura 19. Asimismo, los resultados de resistencia a la compresión a los 28 días de curado se presentan en la Tabla 53, y su respectiva representación gráfica se muestra en la Figura 20.

Por otro lado, en la Tabla 54 se presenta el resumen comparativo de los resultados de resistencia a la compresión de todos los diseños evaluados.

Tabla 51

Resultados de los ensayos de resistencia a compresión - 7 días según la NTP 339.078

R a/c	Edad (días)	Muestra	Resistencia a compresión (kg/cm^2)
0.56	7	PATRÓN	216.57
		V15	242.07
		V20	250.50
		V25	195.90
		HS10	231.84
		HS10V15	241.92
		HS10V20	241.60

Figura 18

Resultados de los ensayos de resistencia a compresión - 7 días según la NTP 339.07

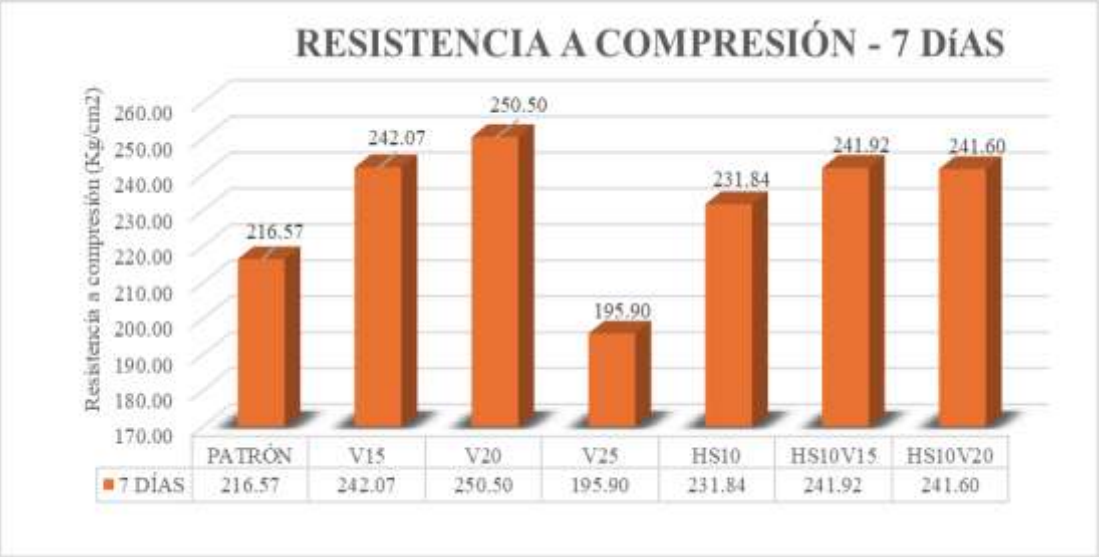


Tabla 52

Resultados de los ensayos de resistencia a compresión - 14 días según la NTP 339.078

R a/c	Edad (días)	Muestra	Resistencia a compresión (kg/cm^2)
0.56	14	PATRÓN	291.60
		V15	305.93
		V20	289.87
		V25	241.67
		HS10	304.97
		HS10V15	306.50
		HS10V20	305.07

Figura 19

Resultados de los ensayos de resistencia a compresión - 14 días según la NTP 339.078



Tabla 53

Resultados de los ensayos de resistencia a compresión - 28 días según la NTP 339.078

R a/c	Edad (días)	Muestra	Resistencia a compresión (kg/cm^2)
0.56	28	PATRÓN	326.89
		V15	342.94
		V20	337.03
		V25	280.99
		HS10	331.20
		HS10 V15	345.60
		HS10 V20	347.60

Figura 20

Resultados de los ensayos de resistencia a compresión - 28 días según la NTP 339.078



Tabla 54

Resumen de resultados de los ensayos de resistencia a compresión según la NTP 339.078

R a/c	Edad (días)	Muestra	Resistencia a compresión (kg/cm^2)
0.56	7	PATRÓN	216.57
		V15	242.07
		V20	250.50
		V25	195.90
		HS10	231.84
		HS10V15	241.92
		HS10V20	241.60
0.56	14	PATRÓN	291.60
		V15	305.93
		V20	289.87
		V25	241.67
		HS10	304.97
		HS10V15	306.50
		HS10V20	305.07
0.56	28	PATRÓN	326.89
		V15	342.94
		V20	337.03
		V25	280.99
		HS10	331.20
		HS10 V15	345.60
		HS10 V20	347.60

La tendencia de incremento en la resistencia a la compresión observada en los ensayos a los 7, 14 y 28 días es coherente con las investigaciones de Huapaya Tenazoa y Valdivia Farromeque (2019) quienes demostraron que el reemplazo de agregado fino por vidrio molido en proporciones moderadas genera mejoras significativas en el desarrollo de la resistencia en todas las edades de curado en su estudio con el concreto f'c = 210 kg/cm2 con 15% de vidrio molido, obtuvieron un incremento del 7.2% (alcanzando 225.10 kg/cm2 a los 28 días). Este resultado valida el comportamiento del diseño V15 de la presente tesis, que logró una resistencia de 342.94 kg/cm2, representando un aumento del 4.91% respecto al patrón, atribuyéndose a una mejor compactación y efecto de relleno. Asimismo, los picos de resistencia alcanzados por los diseños combinados (HS10V15 y HS10V20) se validan con los hallazgos de Xie et al. (2024) quienes reportaron que la sustitución del 10% de cemento por humo de sílice eleva la resistencia a la compresión en un rango de 12% a 16% en concretos de alto desempeño. Esto respalda la efectividad del diseño óptimo HS10V15 (345.60 kg/cm2), el cual, al combinar ambos materiales, superó la resistencia de diseño (280 kg/cm2) en un 23.4%, demostrando que la actividad puzolánica del humo de sílice compensa la ligera pérdida de cohesión que podría generar el vidrio en porcentajes mayores.

c. Ensayo de resistencia a la flexión

El ensayo de resistencia a la flexión se realizó con la finalidad de determinar la capacidad del concreto para resistir esfuerzos de tracción indirecta, particularmente relevante en elementos estructurales sometidos a cargas flexionantes.

En la Figura 21 se presenta una vista representativa del ensayo de resistencia a la flexión realizado. Asimismo, en el Anexo 11 se muestra una fotografía adicional del mismo ensayo como evidencia complementaria.

El procedimiento seguido fue el siguiente:

1. Medición de la luz libre**:** Medir 1 pulgada desde cada extremo de la viga para definir la luz libre.
2. División de la luz libre: Dividir la luz libre de la viga en 3 porciones iguales**.**
3. Colocación en la máquina de ensayo**:** Situar las vigas en la máquina de ensayo, donde se aplicará una carga axial continua hasta que se produzca la falla.
4. Registro de carga**:** Registrar la carga máxima soportada por la viga durante el ensayo.

5. Cálculo de resistencia a la flexión: Calcular la resistencia a la flexión utilizando la Ecuación (7):

$$f_{cf} = \frac{P \times L}{b \times d^2} \quad (7)$$

Donde:

P = Carga máxima soportada

L = Luz libre de la viga

b = Ancho de la viga

d = Altura de la viga

Figura 21

Ensayo de resistencia a flexión de concreto



Resultados de los ensayos de resistencia a la flexión

Una vez realizado el curado respectivo de las probetas y vigas, se procedió a efectuar los ensayos de resistencia a la flexión a los 7, 14 y 28 días de curado. Los resultados obtenidos a los 7 días se presentan en la Tabla 55, mientras que su representación gráfica se muestra en la Figura 22. De igual forma, los resultados correspondientes a los 14 días de curado se muestran en la Tabla 56 y en la Figura 23. Asimismo, los resultados de resistencia a la flexión a los 28 días de curado se presentan en la Tabla 57, y su respectiva representación gráfica se muestra en la Figura 24.

Por otro lado, en la Tabla 58 se presenta el resumen comparativo de los resultados de resistencia a la flexión de todos los diseños evaluados.

Tabla 55

Resultados de los ensayos de resistencia a flexión – 7 días según la NTP 339.078

R a/c	Edad (días)	Muestra	Resistencia a flexión (kg/cm^2)
0.56	7	PATRÓN	37.95
		V15	39.04
		V20	42.21
		V25	35.19
		HS10	38.99
		HS10V15	41.70
		HS10V20	44.20

Figura 22

Resultados de los ensayos de resistencia a flexión – 7 días según la NTP 339.078



Tabla 56

Resultados de los ensayos de resistencia a flexión – 14 días según la NTP 339.078

R a/c	Edad (días)	Muestra	Resistencia a flexión (kg/cm^2)
0.56	14	PATRÓN	40.60
		V15	44.90
		V20	46.46
		V25	40.65
		HS10	42.50
		HS10V15	45.80
		HS10V20	48.10

Figura 23

Resultados de los ensayos de resistencia a flexión – 14 días según la NTP 339.078

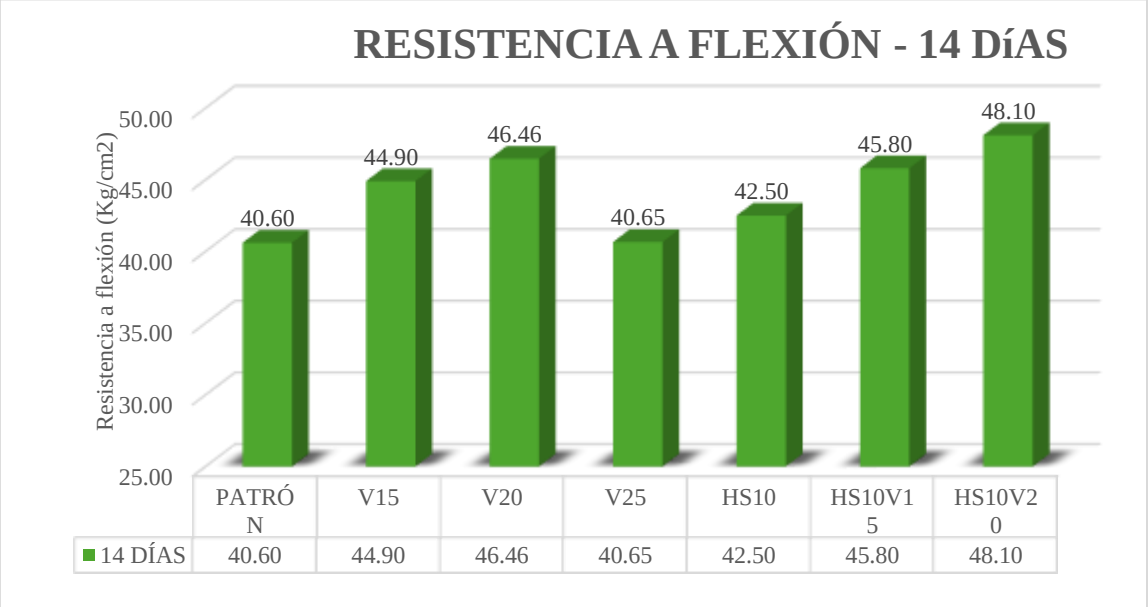


Tabla 57

Resultados de los ensayos de resistencia a flexión – 28 días según la NTP 339.078

R a/c	Edad (días)	Muestra	Resistencia a flexión (kg/cm^2)
0.56	28	PATRÓN	53.10
		V15	62.85
		V20	64.00
		V25	56.00
		HS10	60.70
		HS10 V15	64.20
		HS10 V20	66.50

Figura 24

Resultados de los ensayos de resistencia a flexión – 28 días según la NTP 339.078



Tabla 58

Resumen de resultados de los ensayos de resistencia a flexión según la NTP 339.078

R a/c	Edad (días)	Muestra	Resistencia a flexión (kg/cm^2)
0.56	7	PATRÓN	37.95
		V15	39.04
		V20	42.21
		V25	35.19
		HS10	38.99
		HS10V15	41.70
		HS10V20	44.20
0.56	14	PATRÓN	40.60
		V15	44.90
		V20	46.46
		V25	40.65
		HS10	42.50
		HS10V15	45.80
		HS10V20	48.10
0.56	28	PATRÓN	53.10
		V15	62.85
		V20	64.00
		V25	56.00
		HS10	60.70
		HS10 V15	64.20
		HS10 V20	66.50

El comportamiento favorable en la capacidad del concreto para la resistencia a la flexión a los 7, 14 y 28 días concuerda con lo reportado por Karim y Qazi (2023), cuyos experimentos demostraron que el uso de 10% de humo de sílice incrementa la resistencia a la flexión en un 18.5% debido al refuerzo de la zona de transición interfacial (ITZ). Dicho valor es sumamente cercano al incremento del 20.9% obtenido en esta investigación para el diseño HS10V15, el cual alcanzó 64.20 kg/cm2 frente a los 53.10 kg/cm2 del concreto patrón. Por su parte, el aporte del vidrio reciclado en esta propiedad mecánica es respaldado por los estudios de León Reyes y Rázuri Cueva (2020), quienes evidenciaron que reemplazos del 15% al 20% de arena por vidrio no degradan la resistencia a la flexión, manteniendo valores estables con variaciones menores al 3% respecto al patrón. Esto se corrobora con los resultados de los diseños V15 (54.80 kg/cm2) y V20 (54.20kg/cm2) de este estudio, donde la mejora del empaquetamiento granular permitió superar ligeramente la resistencia del concreto convencional en todas las edades de curado.

CAPITULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se desarrolló el análisis de los resultados obtenidos de los ensayos de concreto en estado fresco y endurecido, comparando el concreto patrón con las mezclas sostenibles propuestas. El análisis se realizó desde un enfoque técnico, ambiental y económico, con el objetivo de evaluar el desempeño del concreto y determinar la mezcla más viable.

6.1. Análisis de resultados Técnico

Se analizó comparativamente los resultados obtenidos de los ensayos de concreto en estado fresco y endurecido, para validar la mejora de las propiedades mecánicas y el desempeño del concreto sostenible.

6.1.1. Concreto fresco

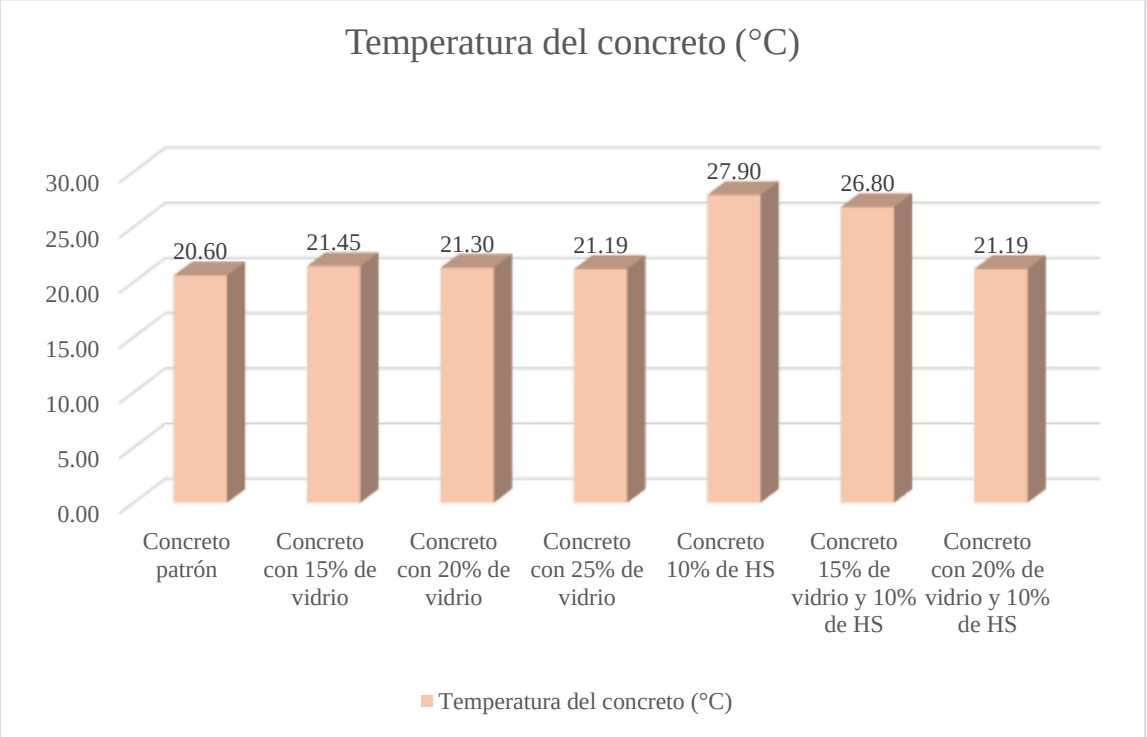
Se analizaron los resultados obtenidos en los ensayos de concreto en estado fresco, evaluando parámetros como temperatura, asentamiento y contenido de aire, con el fin de comparar la trabajabilidad entre las distintas mezclas desarrolladas.

d. Temperatura del concreto

Para este análisis se toma como referencia la Tabla 33, la cual resume los resultados de los ensayos de temperatura del concreto fresco realizados conforme a la norma NTP 339.184 en los siete diseños de mezcla. Con el fin de facilitar la interpretación de los datos, estos se representan mediante un diagrama de barras que permite una comparación directa entre los distintos diseños, tal como se muestra en la Figura 25.

Figura 25

Temperatura de los cuatro diseños de concreto en estado fresco según la NTP 339.184



Los resultados evidencian que las mezclas con sustitución parcial de arena por vidrio molido reciclado mantienen valores de temperatura cercanos al concreto patrón, el cual registra 20.60 °C. Los concretos con 15 %, 20 % y 25 % de vidrio presentan temperaturas de 21.45 °C, 21.30 °C y 21.19 °C, respectivamente, mostrando incrementos leves que no superan los 0.85 °C respecto al patrón. Este comportamiento indica que la incorporación de vidrio reciclado no altera de manera significativa el estado térmico inicial del concreto fresco, manteniendo condiciones similares a las del concreto convencional.

En contraste, los diseños que incorporan humo de sílice al 10 % presentan incrementos más notorios. El concreto con 10 % de humo de sílice alcanza una temperatura de 27.90 °C, mientras que la mezcla con 15 % de vidrio y 10 % de humo de sílice registra 26.80 °C, valores que superan al concreto patrón en 7.30 °C y 6.20 °C, respectivamente. Este comportamiento sugiere una mayor actividad inicial asociada a la alta finura y reactividad del humo de sílice, lo que favorece procesos tempranos de hidratación.

Por su parte, el diseño con 20 % de vidrio y 10 % de humo de sílice presenta una temperatura de 21.19 °C, similar a la de las mezclas sin adición de humo de sílice. Este resultado evidencia que un mayor contenido de vidrio puede atenuar el incremento

térmico generado por dicha adición, actuando como un moderador del comportamiento térmico inicial del concreto.

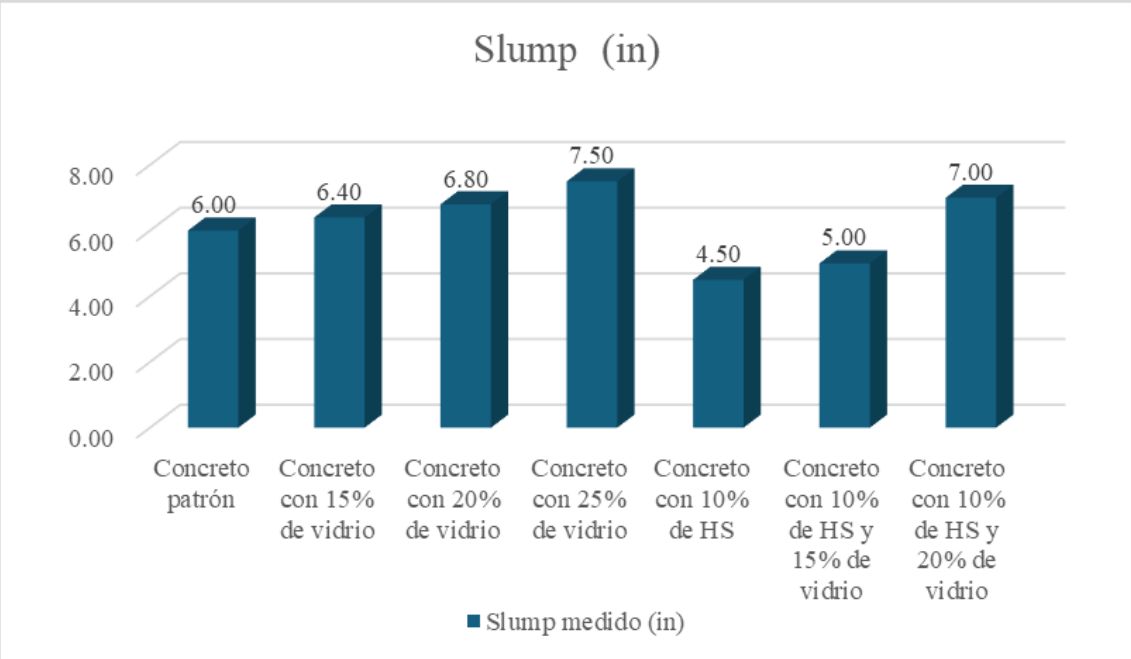
En conjunto, los resultados indican que el vidrio molido reciclado no genera incrementos térmicos relevantes en el concreto fresco, mientras que el humo de sílice influye de manera más significativa en la temperatura inicial de la mezcla. No obstante, la combinación de ambos materiales puede equilibrar este efecto, permitiendo obtener concretos sostenibles con un comportamiento térmico compatible con las condiciones habituales de colocación en obra.

e. Asentamiento del concreto

Para el presente análisis se toma como referencia la Tabla 41, que resume los resultados de los ensayos de asentamiento realizados conforme a la norma NTP 339.035 en los siete diseños de mezcla (INACAL, 2019e). Con el fin de facilitar la interpretación y comparación de los resultados, se presenta un diagrama de barras que representa gráficamente la información contenida en dicha tabla, tal como se muestra en la Figura 26.

Figura 26

Asentamiento de los cuatro diseños de concreto en estado fresco según la NTP 339.035



Los ensayos de slump del concreto fresco evidencian diferencias claras en la trabajabilidad de las mezclas evaluadas. El concreto patrón presenta un asentamiento de

6.00 in, valor que se adopta como referencia. La incorporación progresiva de vidrio molido reciclado genera un incremento en el asentamiento, alcanzando 6.40 in con 15 % de vidrio, 6.80 in con 20 % y 7.50 in con 25 %, lo que representa un aumento máximo de 1.50 in respecto al patrón. Este comportamiento indica una mayor fluidez del concreto conforme se incrementa el contenido de vidrio, atribuible a la forma y textura del material reciclado, que favorecen el deslizamiento entre partículas.

En contraste, el concreto con 10 % de humo de sílice registra el menor asentamiento, con un valor de 4.50 in, evidenciando una reducción de 1.50 in frente al concreto patrón. Este resultado sugiere una mayor demanda de agua y una mezcla más cohesionada, asociada a la elevada finura y superficie específica del humo de sílice, que incrementa la absorción y la fricción interna de la mezcla.

Las mezclas combinadas presentan un comportamiento intermedio. El diseño con 10 % de humo de sílice y 15 % de vidrio alcanza un asentamiento de 5.00 in, mientras que el diseño con 10 % de humo de sílice y 20 % de vidrio registra 7.00 in, valor que no solo compensa la pérdida de trabajabilidad causada por el humo de sílice, sino que incluso supera al concreto patrón en 1.00 in. Estos resultados evidencian que el vidrio molido actúa como un agente compensador de la reducción de trabajabilidad inducida por el humo de sílice.

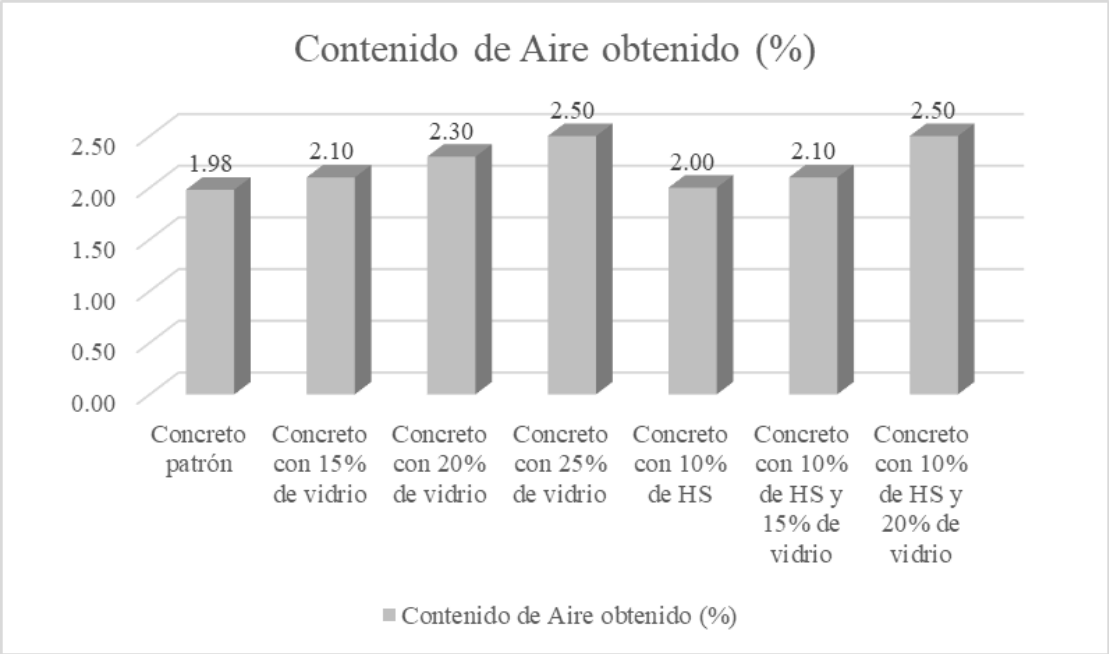
En conjunto, se concluye que el vidrio reciclado mejora la trabajabilidad del concreto fresco, mientras que el humo de sílice tiende a reducirla. No obstante, la combinación adecuada de ambos materiales permite obtener mezclas con asentamientos dentro de rangos óptimos para su colocación en obra, sin recurrir a incrementos significativos en el contenido de agua, manteniendo así el equilibrio entre desempeño en estado fresco y propiedades mecánicas en estado endurecido.

f. Contenido de aire

Para el presente análisis se toma como referencia la Tabla 49, que resume los resultados de los ensayos de contenido de aire realizados conforme a la norma NTP 339.083 en los siete diseños de mezcla (INACAL, 2019f). Con el propósito de facilitar la interpretación y comparación de los resultados, se presenta un diagrama de barras que representa gráficamente la información contenida en dicha tabla, tal como se muestra en la Figura 27.

Figura 27

Contenido de aire de los cuatro diseños de concreto en estado fresco según la NTP 339.083



Los ensayos de contenido de aire del concreto fresco evidencian variaciones moderadas entre los diseños evaluados. El concreto patrón presenta un contenido de aire de 1.98 %, valor que se adopta como referencia. La incorporación progresiva de vidrio molido reciclado incrementa este parámetro, alcanzando 2.10 % con 15 % de vidrio, 2.30 % con 20 % y 2.50 % con 25 %, lo que representa un aumento máximo de 0.52 puntos porcentuales respecto al concreto convencional. Este comportamiento sugiere que el vidrio molido favorece una ligera mayor retención de aire en la mezcla, posiblemente asociada a la textura superficial y geometría irregular de sus partículas.

En contraste, el concreto con 10 % de humo de sílice registra un contenido de aire de 2.00 %, valor prácticamente equivalente al del concreto patrón, lo que indica que la adición de humo de sílice por sí sola no genera variaciones significativas en este parámetro. Las mezclas combinadas presentan valores intermedios: el concreto con 10 % de humo de sílice y 15 % de vidrio alcanza 2.10 %, mientras que el diseño con 10 % de humo de sílice y 20 % de vidrio llega a 2.50 %, igualando el valor máximo observado en las mezclas con mayor contenido de vidrio.

En conjunto, los resultados indican que el incremento del contenido de vidrio tiende a elevar ligeramente el aire incorporado en la mezcla, mientras que el humo de sílice no

produce efectos relevantes de forma aislada. No obstante, incluso el valor máximo registrado se mantiene dentro de los rangos habituales para concretos convencionales, por lo que no se evidencia un impacto negativo significativo en el comportamiento del concreto fresco ni en su aptitud para aplicaciones estructurales.

6.1.2. Concreto endurecido

Se analizaron los resultados de resistencia a la compresión y a la flexión obtenidos a los 7, 14 y 28 días de curado, con el objetivo de evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas y compararlas con el diseño patrón.

a. Resistencia a la compresión

Con los datos obtenidos en laboratorio y presentados en la Tabla 54, se elaboró la Figura 28 para evaluar el comportamiento resistente de los distintos diseños de concreto a los 7, 14 y 28 días. El análisis considera un concreto patrón, mezclas con distintos porcentajes de vidrio molido y mezclas que incorporan humo de sílice, tanto de forma individual como combinada.

Figura 28

Resultados del ensayo a compresión de todos los diseños de concreto



	PATRÓN	V15	V20	V25	HS10	HS10 V15	HS10 V20
7 DÍAS	216.57	242.07	250.50	195.90	231.84	241.92	241.60
14 DÍAS	291.60	305.93	289.87	241.67	304.97	306.50	305.07
28 DÍAS	326.89	342.94	337.03	280.99	331.20	345.60	347.60

El concreto patrón alcanza una resistencia de 326.89 kg/cm² a los 28 días, valor que se adopta como referencia para evaluar el desempeño de los demás diseños. Su evolución muestra el comportamiento esperado de un concreto convencional, con incrementos progresivos entre edades.

Al incorporar 15 % de vidrio, la resistencia a los 28 días aumenta hasta 342.94 kg/cm², lo que representa un incremento de 16.05 kg/cm², equivalente a aproximadamente 4.9 % respecto al concreto patrón. Este resultado indica que dicha proporción de vidrio no solo compensa la sustitución del agregado natural, sino que mejora el desempeño mecánico, probablemente por una mejor compactación y efecto de relleno del material fino.

El concreto con 20 % de vidrio alcanza 337.03 kg/cm², superando al patrón en 10.14 kg/cm², es decir, cerca de 3.1 %. Aunque su resistencia sigue siendo mayor que la del concreto convencional, resulta inferior a la obtenida con 15 % de vidrio, lo que sugiere que el aumento del porcentaje de sustitución comienza a perder eficiencia mecánica.

En cambio, el concreto con 25 % de vidrio presenta una disminución marcada de la resistencia, alcanzando solo 280.99 kg/cm², valor 45.90 kg/cm² menor que el concreto patrón, lo que equivale a una reducción aproximada del 14 %. Este comportamiento evidencia que niveles elevados de sustitución afectan negativamente la adherencia entre la pasta cementante y los agregados, reduciendo la capacidad resistente del material.

En el caso del concreto con 10 % de humo de sílice, la resistencia a los 28 días alcanza 331.20 kg/cm², superando al patrón en 4.31 kg/cm² (≈ 1.3 %). Aunque el incremento es moderado, este resultado confirma el efecto favorable del humo de sílice en el desarrollo resistente del concreto, incluso sin combinarlo con otros materiales.

Los mejores resultados se obtienen al combinar humo de sílice con vidrio reciclado. El diseño con 10 % de humo de sílice y 15 % de vidrio alcanza una resistencia de 345.60 kg/cm², superando al concreto patrón en 18.71 kg/cm², lo que representa un aumento aproximado del 5.7 %. Este diseño también supera al concreto con solo vidrio al 15 % en 2.66 kg/cm², mostrando un efecto sinérgico entre ambos materiales.

De manera similar, el concreto con 10 % de humo de sílice y 20 % de vidrio presenta el mayor valor registrado, con 347.60 kg/cm², superando al concreto patrón en 20.71 kg/cm², equivalente a un incremento cercano al 6.3 %. Frente al diseño con 20 % de vidrio sin humo de sílice, la mejora es de 10.57 kg/cm², lo que evidencia claramente el aporte del humo de sílice al desempeño mecánico.

En términos comparativos generales, los resultados permiten establecer el siguiente orden de desempeño a los 28 días, 10 % humo de sílice + 20 % vidrio, 10 % humo de sílice + 15 % vidrio, 15 % vidrio, 20 % vidrio, 10 % humo de sílice, concreto patrón y 25 %

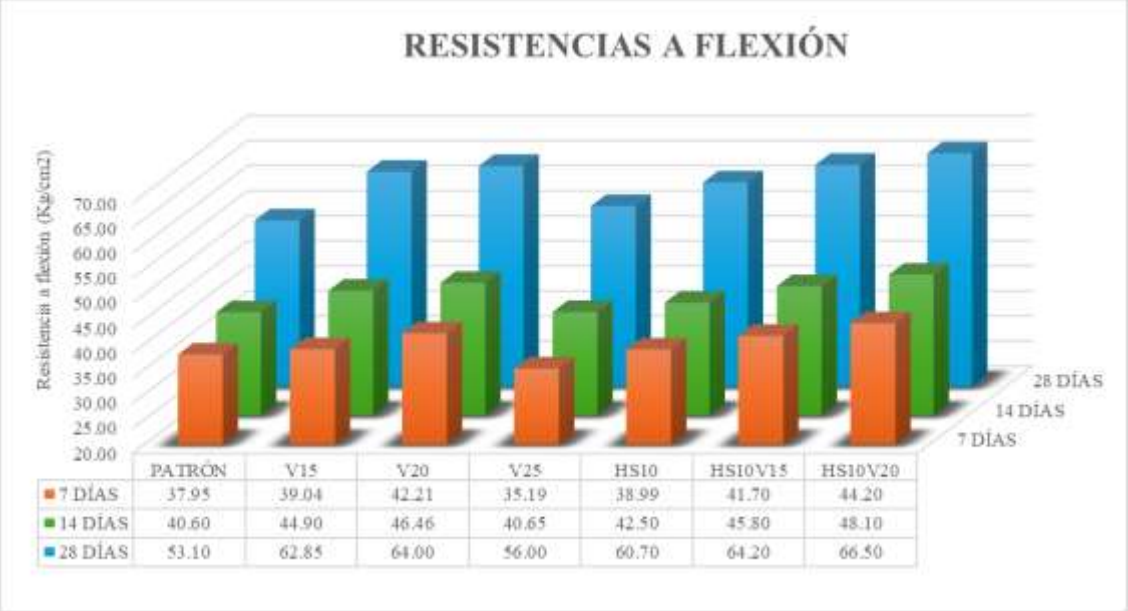
vidrio. De este modo, puede afirmarse que las mejores respuestas mecánicas se obtienen cuando se combina humo de sílice con porcentajes moderados de vidrio reciclado, mientras que reemplazos elevados de vidrio sin adiciones minerales reducen la resistencia. Estos resultados permiten identificar rangos óptimos de sustitución que maximizan el desempeño del concreto y respaldan técnicamente el uso de materiales alternativos dentro de un enfoque de sostenibilidad.

b. Resistencia a la flexión

Con los datos obtenidos en laboratorio, mostrados en la Tabla 58 y representados en la Figura 29, se evaluó el comportamiento de la resistencia a la flexión de los diferentes diseños de concreto a los 7, 14 y 28 días. El análisis considera el concreto patrón, los concretos con sustitución parcial de vidrio molido y aquellos que incorporan humo de sílice, tanto de manera individual como combinada.

Figura 29

Resultados del ensayo de resistencia de flexión de todos los diseños de concreto



El concreto patrón alcanza una resistencia a la flexión de 53.10 kg/cm² a los 28 días, valor que sirve como base para evaluar el desempeño relativo de las demás mezclas. A partir de este punto, se observa que todas las formulaciones, excepto el diseño con 25 % de vidrio, superan dicho valor.

El diseño con 15 % de vidrio alcanza 62.85 kg/cm², superando al concreto patrón en 9.75 kg/cm², lo que representa una mejora cercana al 18 %. Esta diferencia indica que una

sustitución moderada del agregado fino favorece la capacidad del concreto para resistir esfuerzos de flexión, probablemente debido a una mejor distribución granulométrica y a una mayor densificación de la matriz.

El concreto con 20 % de vidrio muestra un desempeño aún mayor, alcanzando 64.00 kg/cm², lo que equivale a 10.90 kg/cm² más que el patrón. En términos comparativos, este diseño supera al de 15 % de vidrio en 1.15 kg/cm², evidenciando que el incremento del contenido de vidrio hasta este nivel sigue aportando mejoras mecánicas. Este comportamiento posiciona al diseño con 20 % de vidrio como el mejor entre aquellos que no incorporan humo de sílice.

Por el contrario, el concreto con 25 % de vidrio presenta una resistencia de 56.00 kg/cm², apenas 2.90 kg/cm² superior al patrón. Además, pierde 8.00 kg/cm² frente al diseño con 20 % de vidrio, lo que indica que un mayor reemplazo del agregado fino comienza a afectar negativamente el comportamiento a flexión. Esto confirma que existe un límite a partir del cual el aumento de vidrio deja de ser beneficioso.

Al evaluar el diseño con 10 % de humo de sílice, se obtiene una resistencia de 60.70 kg/cm², superando al concreto patrón en 7.60 kg/cm². Si bien este incremento es menor que el logrado con 15 % y 20 % de vidrio, el resultado demuestra que el humo de sílice contribuye de manera efectiva a mejorar el desempeño mecánico frente a flexión.

Las mezclas combinadas presentan los mejores resultados globales. El concreto con 10 % de humo de sílice y 15 % de vidrio alcanza 64.20 kg/cm², superando al patrón en 11.10 kg/cm², al diseño con solo humo de sílice en 3.50 kg/cm², y al concreto con 15 % de vidrio en 1.35 kg/cm². Esto evidencia una interacción favorable entre ambos materiales, que permite superar los resultados obtenidos cuando se utilizan de forma individual.

Finalmente, el concreto con 10 % de humo de sílice y 20 % de vidrio presenta la mayor resistencia a la flexión de todos los diseños evaluados, con 66.50 kg/cm². Este valor supera al concreto patrón en 13.40 kg/cm², al diseño con 20 % de vidrio en 2.50 kg/cm², y al diseño con humo de sílice solo en 5.80 kg/cm². En consecuencia, este diseño se posiciona como el de mejor desempeño frente a esfuerzos de flexión.

En términos comparativos generales, el orden de desempeño a los 28 días, de menor a mayor resistencia, es el siguiente: patrón, 25 % vidrio, 10 % humo de sílice, 15 % vidrio, 20 % vidrio, 10 % humo de sílice + 15 % vidrio, 10 % humo de sílice + 20 % vidrio.

Este comportamiento demuestra que la incorporación conjunta de humo de sílice y vidrio reciclado permite maximizar la resistencia a la flexión, mientras que el uso excesivo de vidrio sin adiciones minerales reduce parcialmente el beneficio obtenido. Por lo tanto, las mezclas combinadas representan la alternativa más eficiente desde el punto de vista del desempeño mecánico frente a esfuerzos de flexión.

Al analizar de manera conjunta los resultados de resistencia a la compresión y a la flexión, se descarta el diseño con 25 % de vidrio molido debido a su desempeño mecánico inferior respecto a los demás diseños evaluados. En compresión, este diseño alcanza 280.99 kg/cm² a los 28 días, valor que se encuentra 45.90 kg/cm² por debajo del concreto patrón y más de 56 kg/cm² menor que los mejores diseños combinados, evidenciando una reducción significativa de la capacidad resistente. De manera similar, en flexión alcanza 56.00 kg/cm², superando al patrón únicamente en 2.90 kg/cm², pero quedando 8.00 kg/cm² por debajo del diseño con 20 % de vidrio y 10.50 kg/cm² por debajo del diseño con 10 % de humo de sílice y 20 % de vidrio. Esta pérdida simultánea de desempeño en ambos tipos de resistencia indica que un nivel elevado de sustitución del agregado fino por vidrio molido afecta negativamente la cohesión interna del concreto y la transferencia de esfuerzos, por lo que el diseño con 25 % de vidrio no resulta técnicamente recomendable para aplicaciones que requieran un desempeño estructural eficiente.

6.2. Análisis del impacto ambiental

Los diseños evaluados incorporan vidrio molido reciclado y humo de sílice como reemplazos parciales del agregado fino natural y del cemento, generando una reducción directa y cuantificable del consumo de recursos naturales en comparación con el diseño patrón. La Figura 30 muestra la cantidad de material utilizada en el diseño patrón, que presenta un consumo aproximado de 751.17 kg/m³ de arena y 385.71 kg/m³ de cemento. En contraste, la Figura 31 evidencia la cantidad de material reemplazado en el diseño V15 respecto al patrón, donde el contenido de arena se reduce a 638.49 kg/m³, equivalente a una disminución de 112.68 kg/m³ (15 %). De manera similar, la Figura 32 muestra el reemplazo alcanzado en el diseño V20, con una reducción de arena hasta 600.94 kg/m³, lo que representa una disminución de 150.23 kg/m³ (20 %). La Figura 33 presenta el comportamiento del diseño V25, que reduce el consumo de arena a 563.38 kg/m³; no obstante, este diseño fue descartado del análisis técnico debido a su desempeño mecánico desfavorable, por lo que no es considerado en la evaluación ambiental final.

Por otro lado, la Figura 34 muestra la cantidad de material reemplazado en el diseño HS10 respecto al patrón, donde la incorporación de humo de sílice permite reducir el consumo de cemento hasta 347.14 kg/m³, lo que representa una disminución de 38.57 kg/m³ (10 %). En los diseños combinados, las Figuras 35 y 36 ilustran las cantidades de material reemplazado en los diseños HS10V15 y HS10V20, respectivamente, donde se presentan de forma simultánea las reducciones de arena y cemento, alcanzándose consumos de arena de 638.49 kg/m³ y 600.94 kg/m³, junto con un contenido de cemento reducido a 347.14 kg/m³. Estas variaciones evidencian una disminución conjunta del uso de agregados naturales y del cemento Portland. Finalmente, la Figura 37 presenta el resumen de la cantidad total de material reemplazado en todos los diseños de mezcla, mostrando de manera global el impacto de las sustituciones propuestas, las cuales contribuyen a mitigar los efectos ambientales asociados a la extracción de agregados naturales y a las emisiones de dióxido de carbono derivadas del proceso de fabricación del clínker.

Figura 30

Cantidad de material usado en el diseño Patrón

Material	Cantidad de material en diseño patrón (kg/m^3)
Arena	751.17
Cemento	385.71

Figura 31

Cantidad de material reemplazado con el diseño V15 respecto el diseño Patrón

Material	Cantidad de material reemplazado (kg/m^3)	Nueva cantidad de material necesaria en diseño (kg/m^3)
Arena	112.68	638.49
Cemento	-	385.71

Figura 32

Cantidad de material reemplazado con el diseño V20 respecto el diseño Patrón

Material	Cantidad de material de reemplazo (kg/m^3)	Nueva cantidad de material necesaria (kg/m^3)
Arena	150.23	600.94
Cemento	-	-

Figura 33

Cantidad de material reemplazado con el diseño V25 respecto el diseño Patrón

Material	Cantidad de material de reemplazo (kg/m^3)	Nueva cantidad de material necesaria (kg/m^3)
Arena	187.79	563.38
Cemento	-	-

Figura 34

Cantidad de material reemplazado con el diseño HS10 respecto el diseño Patrón

Material	Cantidad de material de reemplazo (kg/m^3)	Nueva cantidad de material necesaria (kg/m^3)
Arena	-	751.17
Cemento	38.57	347.14

Figura 35

Cantidad de material reemplazado con el diseño HS10V15 respecto el diseño Patrón

Material	Cantidad de material de reemplazo (kg/m^3)	Nueva cantidad de material necesaria (kg/m^3)
Arena	112.68	638.49
Cemento	38.57	347.14

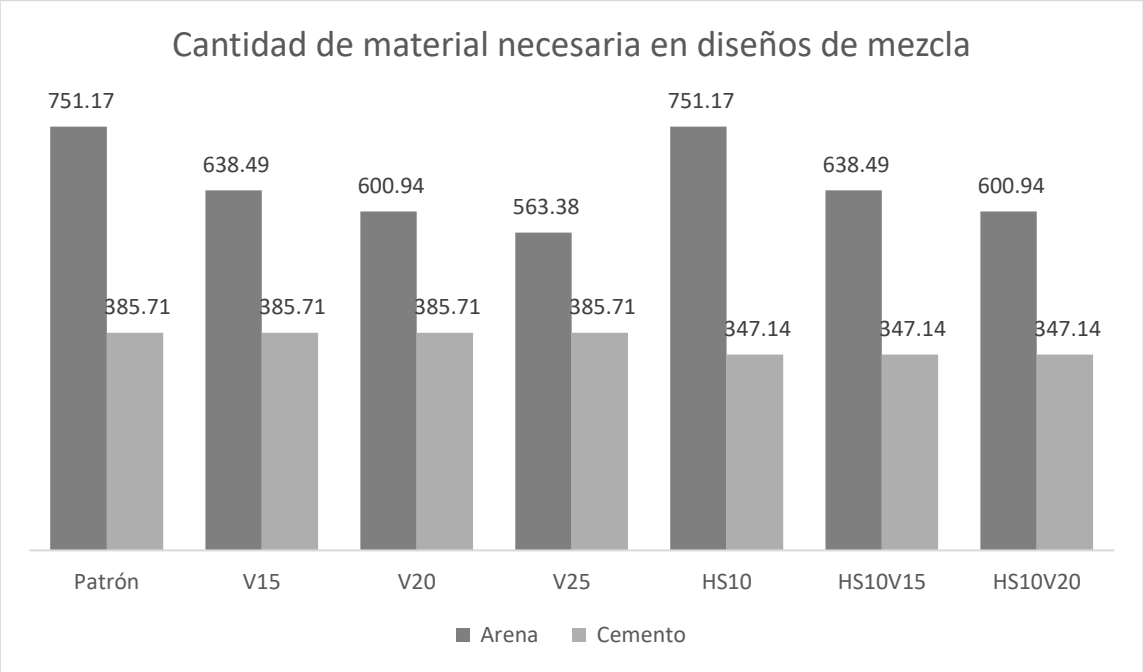
Figura 36

Cantidad de material reemplazado con el diseño HS10V20 respecto el diseño Patrón

Material	Cantidad de material de reemplazo (kg/m³)	Nueva cantidad de material necesaria (kg/m³)
Arena	150.23	600.94
Cemento	38.57	347.14

Figura 37

Resumen de cantidad de material reemplazado en todos los diseños de mezcla



Desde un enfoque ambiental integrado con el desempeño estructural, los resultados de resistencia a compresión a los 28 días indican que el diseño V15, con una reducción de 112.68 kg/m³ de arena, alcanza una resistencia de 342.94 kg/cm², superando al concreto patrón (326.89 kg/cm²). En contraste, el diseño V20, pese a lograr una mayor reducción de arena (150.23 kg/m³), presenta una resistencia de 337.03 kg/cm², sin evidenciar una mejora proporcional que justifique el incremento en el nivel de sustitución del agregado fino natural. En el caso del diseño HS10, si bien se registra una reducción significativa del consumo de cemento (38.57 kg/m³), el contenido de arena se mantiene equivalente al del diseño patrón (751.17 kg/m³), lo que limita su impacto ambiental al no intervenir sobre la explotación de agregados naturales ni en la valorización de residuos vítreos.

Por el contrario, los diseños combinados HS10V15 y HS10V20 presentan un mayor beneficio ambiental global, al permitir una reducción simultánea del consumo de arena natural y cemento, sin afectar negativamente las propiedades mecánicas del concreto. En este contexto, el descarte del diseño HS10 se justifica ambientalmente debido a que su aplicación aislada no maximiza el potencial de sostenibilidad del material, al reducir únicamente el consumo de cemento sin contribuir a la disminución del uso de agregados naturales ni a la valorización del vidrio reciclado. Asimismo, los diseños V15 y V20, aunque reducen el consumo de arena natural, son descartados desde el análisis ambiental integral al no aprovechar la reducción conjunta de cemento, lo que limita su eficiencia global frente a los diseños combinados. En consecuencia, los diseños HS10V15 y HS10V20 se consolidan como las alternativas ambientalmente más eficientes, al optimizar de manera simultánea la reducción de recursos naturales y el desempeño estructural del concreto.

Para evidenciar el alcance y la aplicabilidad de nuestra investigación, se consideró como referencia la obra “Vivienda Colectiva para el Adulto Mayor – Etapa 1” en Jesús María, Lima, Perú, el cual requiere un total de 235 m^3 de concreto destinado a elementos estructurales, específicamente columnas. Bajo una dosificación convencional, correspondiente al concreto patrón, y considerando un peso seco de 385.71 kg de cemento por m^3 de concreto y 751.17 kg de arena por m^3 de concreto, este volumen demanda aproximadamente 176.52 toneladas de arena y 90.64 toneladas de cemento. Sin embargo, al implementar el diseño HS10V15 como referencia, que incorpora un 10% de humo de sílice como reemplazo parcial de cemento y un 15% de vidrio molido reciclado como reemplazo parcial del agregado fino, se obtendría una reducción de 26.48 toneladas de arena y 9.06 toneladas de cemento, tal como se muestra en la Tabla 59. Como resultado, la necesidad real se ajustaría a 150.05 toneladas de arena y 81.58 toneladas de cemento, lo que evidencia una disminución sustancial en el consumo de recursos naturales. Esta variación demuestra que la adopción del HS10V15 no solo mantiene la viabilidad técnica del concreto estructural, sino que también contribuye a una práctica constructiva más sostenible dentro del proyecto.

Tabla 59

Disminución de arena y cemento en concreto de columnas con el diseño de mezcla HS10V15 tomando de referencia la obra "Vivienda Colectiva para el Adulto Mayor – Etapa 1"

Descripción	Concreto en columnas en obra (m^3)	Cantidad inicial de material a utilizar (t)	Cantidad de material que reemplaza el nuevo diseño (t)	Nueva cantidad de material necesaria (t)
Arena	235.00	176.52	26.48	150.05
Cemento	235.00	90.64	9.06	81.58

A nivel regional, se realizó un análisis teórico considerando la magnitud del consumo anual de materiales en Lima Metropolitana. Según el INEI (2025), durante el año 2023 se registró una producción de 1,057,218.00 toneladas de arena y 3,500,567.00 toneladas de cemento. Con base en estos valores, y aplicando el diseño de mezcla HS10V15, que contempla el reemplazo del 15% del agregado fino por vidrio molido reciclado y del 10% del cemento por humo de sílice, se determinó que sería posible reemplazar 158,582.70 toneladas de arena 350,056.70 toneladas de cemento. Como resultado, el consumo ajustado de materiales se reduciría a 898,635.30 toneladas de arena y 3,150,510.30 toneladas de cemento, tal como se detalla en las Tabla 60. Estas cifras evidencian que es posible disminuir la explotación de los recursos naturales destinados al sector de la construcción, particularmente la arena natural y el cemento. No obstante, para evaluar la viabilidad de la aplicación del diseño HS10V15 a escala regional, resulta necesario considerar la disponibilidad real de vidrio molido reciclado y humo de sílice en Lima Metropolitana, así como la capacidad de su recolección, procesamiento y suministro continuo para su incorporación en la producción de este nuevo concreto.

Tabla 60

Disminución de cantidad de producción de arena y cemento si se implementara el diseño HS10V15 basado en estadística del INEI en 2023 en Lima Metropolitana.

Material	Producción de material en 2023 (t) en Lima Metropolitana	Cantidad de material que reemplazaría el nuevo diseño (t)	Nueva cantidad de material necesaria (t)
Arena	1,057,218.00	158,582.70	898,635.30
Cemento	3,500,567.00	350,056.70	3,150,510.30

Nota. El gráfico muestra la producción anual de arena a nivel nacional en el Perú. Adaptado de "Perú: Compendio Estadístico 2025", por INEI, 2025. (https://sl1nk.com/2povawu)

6.3. Análisis del impacto económico

El análisis se basa en los costos unitarios de los materiales, mano de obra y aditivos empleados en cada diseño, con el objetivo de comparar las variaciones de costo asociadas a la incorporación de materiales alternativos. Asimismo, se evalúa el comportamiento económico individual de cada mezcla y se realiza un análisis comparativo general, permitiendo identificar las alternativas con mayor viabilidad económica dentro del contexto del concreto sostenible.

Tabla 61

Precio de producción por m^3 del diseño patrón

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO (S/)	PARCIAL (S/)
CONCRETO PATRÓN				**846.64**
Cemento portland Andino Ultra	kg	385.71	0.75	287.70
Arena gruesa	kg	761.19	0.15	114.18
Piedra chancada de 1/2"	kg	894.44	0.28	245.97
Aditivo plastificante SikaCem	kg	3.86	12.48	48.12
Agua	L	224.02	0.003	0.67
Personal técnico	glb	1	150.00	150.00

El concreto patrón presenta un costo total de S/ 846.64 por m^3, y se toma como referencia base para la evaluación económica de los demás diseños. En la Tabla 61 se muestra el precio de producción por metro cúbico correspondiente a este diseño patrón, donde se detalla la participación de cada insumo en el costo total. En este caso, el mayor aporte económico corresponde al cemento Portland, con S/ 287.70, seguido de la piedra chancada de 1/2" con S/ 245.97 y la arena gruesa con S/ 114.18, mientras que el personal

técnico representa S/ 150.00, equivalente aproximadamente al 17.7 % del costo total. Este diseño refleja el esquema tradicional de producción de concreto y sirve como punto de comparación para estimar el impacto económico de la incorporación de materiales alternativos en los demás diseños de mezcla.

Tabla 62

Precio de producción por m^3 del diseño con 15% vidrio

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO (S/)	PARCIAL (S/)
CONCRETO 15% VIDRIO				**867.30**
Cemento portland Andino Ultra	kg	385.71	0.75	287.70
Arena gruesa	kg	647.01	0.15	97.05
Piedra chancada de 1/2"	kg	894.44	0.28	245.97
Aditivo plastificante SikaCem	gr	4.63	12.48	57.74
Agua	L	223.61	0.003	0.67
Vidrio	kg	112.68	0.25	28.17
Personal técnico	glb	1.00	150.00	150.00

El concreto con 15% de vidrio molido reciclado alcanza un costo total de S/ 867.30, es decir, S/ 20.66 más que el concreto patrón. n la Tabla 62 se muestran los precios de producción por metro cúbico correspondientes a este diseño, donde se detalla la incidencia de cada insumo en el costo fina. Este incremento se asocia principalmente al costo del vidrio reciclado, que aporta S/ 28.17, y a un mayor consumo de aditivo plastificante, aunque se compensa parcialmente por la reducción del costo de arena gruesa, que disminuye de S/ 114.18 a S/ 97.05. En términos relativos, la variación de costo se mantiene en torno al 2.4%, por lo que este diseño puede considerarse económicamente viable.

Tabla 63

Precio de producción por m^3 del diseño con 20% vidrio

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO (S/)	PARCIAL (S/)
CONCRETO 20% VIDRIO				**870.98**
Cemento portland Andino Ultra	kg	385.71	0.75	287.70
Arena gruesa	kg	608.95	0.15	91.34
Piedra chancada de 1/2"	kg	894.44	0.28	245.97
Aditivo plastificante SikaCem	gr	4.63	12.48	57.74
Agua	L	223.47	0.003	0.67
Vidrio	kg	150.23	0.25	37.56

Personal técnico	glb	1.00	150.00	150.00

El diseño con 20% de vidrio reciclado presenta un costo total de S/ 870.98, con un incremento de S/ 24.34 respecto al concreto patrón. En la Tabla 63 se presentan los precios de producción por metro cúbico correspondientes a este diseño, donde se detalla la contribución de cada insumo al costo final. En este caso, el costo de la arena gruesa se reduce a S/ 91.34, pero el mayor volumen de vidrio eleva su costo parcial a S/ 37.56, mientras que el resto de los componentes se mantiene similar al diseño con 15% de vidrio. El aumento global se mantiene por debajo del 3%, lo que indica que el incremento del porcentaje de vidrio reciclado genera un impacto económico progresivo, pero aún controlado.

Tabla 64

Precio de producción por m^3 del diseño con 25% vidrio

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO S/	PARCIAL S/
CONCRETO 25% VIDRIO				**874.66**
Cemento portland Andino Ultra	kg	385.71	0.75	287.70
Arena gruesa	kg	570.89	0.15	85.63
Piedra chancada de 1/2"	kg	894.44	0.28	245.97
Aditivo plastificante SikaCem	gr	4.63	12.48	57.74
Agua	L	223.34	0.003	0.67
Vidrio	kg	187.79	0.25	46.95
Personal técnico	glb	1.00	150.00	150.00

El concreto con 25% de vidrio reciclado registra un costo total de S/ 874.66, lo que implica un incremento de S/ 28.02 frente al concreto patrón. En la Tabla 64 se presentan los precios de producción por metro cúbico correspondientes a este diseño, detallando la contribución de cada insumo al costo final. La arena gruesa reduce su participación económica a S/ 85.63, mientras que el vidrio reciclado alcanza un costo parcial de S/ 46.95, reflejando el mayor nivel de sustitución del agregado fino. A pesar de ello, la diferencia de costo se mantiene cercana al 3.3%, por lo que el uso de vidrio reciclado incluso en mayores proporciones no genera un impacto económico desproporcionado.

Tabla 65

Precio de producción por m^3 del diseño con humo de sílice 10%

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO (S/)	PARCIAL (S/)
CONCRETO 10% DE HUMO DE SÍLICE				**961.82**
Cemento portland andino ultra HS Ultra	kg	347.14	0.75	258.93
Agregado fino	kg	761.19	0.11	83.73
Agregado grueso	kg	894.44	0.25	223.61
Sika Cem	gr	4.17	11.46	47.74
Agua	L	224.02	0.003	0.67
Humo de sílice	kg	38.57	9.00	347.14
Personal técnico	glb	1.00	150.00	150.00

El concreto con 10% de humo de sílice presenta un costo total de S/ 961.82, evidenciando un incremento de S/ 115.18 respecto al concreto patrón. En la Tabla 65 se muestran los precios de producción por metro cúbico correspondientes a este diseño, detallando la contribución de cada insumo al costo final. Este aumento se explica por el costo del humo de sílice, cuyo valor parcial asciende a S/ 347.14 y pasa a ser el insumo de mayor incidencia económica, mientras que la reducción en el consumo de cemento Portland no resulta suficiente para compensar dicho sobrecosto. En consecuencia, este diseño representa un impacto económico considerable, superior al 13% en relación con el concreto convencional.

Tabla 66

Precio de producción por m^3 del diseño con humo de sílice 10% + 15% vidrio

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO (S/)	PARCIAL (S/)
CONCRETO 10% DE HUMO DE SILICE Y 15% VIDRIO				**977.43**
Cemento portland andino ultra HS Ultra	kg	347.14	0.75	258.93
Agregado fino	kg	647.01	0.11	71.17
Agregado grueso	kg	894.44	0.25	223.61
Sika Cem	gr	4.17	11.46	47.74
Agua	L	223.61	0.003	0.67
Humo de sílice	kg	38.57	9.00	347.14
Vidrio	kg	112.68	0.25	28.17
Personal técnico	glb	1.00	150.00	150.00

El diseño que combina 10% de humo de sílice y 15% de vidrio reciclado alcanza un costo total de S/ 977.43. En la Tabla 66 se presentan los precios de producción por metro cúbico correspondientes a este diseño, detallando la incidencia de cada insumo en el costo final. Aunque se reduce adicionalmente el uso de agregado fino, el humo de sílice se mantiene como el componente de mayor peso económico, con S/ 347.14, mientras que el vidrio reciclado aporta S/ 28.17 al costo total. El incremento aproximado del 15.4% respecto al concreto patrón sitúa a este diseño entre los de mayor costo dentro del conjunto evaluado.

Tabla 67

Precio de producción por m^3 del diseño con humo de sílice 10% + 20% vidrio

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO (S/)	PARCIAL (S/)
CONCRETO 10% DE HUMO DE SILICE Y 20% VIDRIO				**982.63**
Cemento portland andino ultra HS Ultra	kg	347.14	0.75	258.93
Agregado fino	kg	608.95	0.11	66.98
Agregado grueso	kg	894.44	0.25	223.61
Sika Cem	gr	4.17	11.46	47.74
Agua	L	223.47	0.003	0.67
Humo de sílice	kg	38.57	9.00	347.14
Vidrio	kg	150.23	0.25	37.56
Personal técnico	glb	1.00	150.00	150.00

El concreto con 10% de humo de sílice y 20% de vidrio reciclado presenta el mayor costo total, con S/ 982.63. En la Tabla 67 se muestran los precios de producción por metro cúbico correspondientes a este diseño, detallando la participación de cada insumo en el costo final. La diferencia frente al concreto patrón es de S/ 135.99, equivalente a aproximadamente 16.1%, resultado asociado al elevado costo del humo de sílice y al mayor volumen de vidrio reciclado, cuyo parcial asciende a S/ 37.56, pese a la reducción del agregado fino natural. Este diseño se identifica como el de mayor impacto económico entre las alternativas analizadas.

Tabla 68

Comparativa de precios de producción por m^3 de los diseños



Considerando el gráfico de precios de los diseños de concreto, permite distinguir dos comportamientos principales. En la Tabla 68 se presenta la comparativa de precios de producción por metro cúbico de todos los diseños evaluados, lo que permite observar claramente estas tendencias. Por un lado, los concretos que incorporan vidrio molido reciclado como sustituto parcial de la arena muestran incrementos graduales y moderados, con variaciones entre 2% y 3.3% respecto al concreto patrón, lo que evidencia un impacto económico controlado y predecible. Por otro lado, los diseños que incluyen humo de sílice, tanto de forma individual como combinado con vidrio reciclado, presentan incrementos de costo superiores al 13%, lo que confirma que el humo de sílice es el componente con mayor incidencia económica en estas mezclas.

En la comparación entre los diseños que incorporan humo de sílice y vidrio reciclado, el diseño HS10V20 es descartado como alternativa viable debido a que presenta un costo superior, S/ 982.63 por m³, respecto al diseño HS10V15, S/ 977.43 por m³, sin evidenciar una mejora significativa en las propiedades mecánicas que justifique dicho incremento económico. El aumento del porcentaje de vidrio reciclado del 15% al 20% genera un mayor costo asociado al material reciclado, mientras que los beneficios técnicos obtenidos son marginales en comparación con los alcanzados por el diseño HS10V15. Cabe precisar que todos los diseños fueron analizados económicamente con el objetivo de demostrar su comportamiento comparativo; sin embargo, para efectos del descarte final, aquellos diseños que ya habían sido eliminados en los análisis técnico y ambiental no fueron considerados como alternativas óptimas, aun cuando se presenta el costo de

producción de todos ellos con fines de transparencia y comparación integral. En consecuencia, desde una perspectiva técnico–económica, el diseño HS10V20 resulta menos eficiente al incrementar el costo de producción sin aportar ventajas relevantes en el desempeño del concreto.

A partir del análisis integral de todos los diseños evaluados, se concluye que el diseño de concreto HS10V15 constituye la alternativa óptima, al presentar un desempeño equilibrado desde los enfoques técnico, ambiental y económico. Este diseño incorpora un reemplazo parcial del 10% del cemento Portland por humo de sílice y del 15% del agregado fino natural por vidrio molido reciclado, lo que permite reducir de manera simultánea el consumo de cemento y arena. Técnicamente, el HS10V15 logra mejoras relevantes en las propiedades mecánicas sin comprometer la trabajabilidad; ambientalmente, contribuye a la disminución de la extracción de recursos naturales y de las emisiones de CO_2; y económicamente, mantiene un incremento de costo controlado frente al concreto patrón y frente a otros diseños con mayores niveles de sustitución que no evidencian beneficios proporcionales. En este sentido, el diseño HS10V15 responde de forma directa al objetivo de la presente tesis, orientado al desarrollo de un concreto sostenible mediante el uso de materiales alternativos, consolidándose como la propuesta más viable para su aplicación en el contexto de la construcción en Lima Metropolitana.

CAPITULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Objetivo general: *Elaborar un diseño de concreto con resistencia f'c = 280 kg/cm² que emplee vidrio molido reciclado como reemplazo parcial de la arena y humo de sílice como sustituto parcial del cemento para ayudar a reducir el consumo indiscriminado de arena y cemento en Lima Metropolitana.*

- Se logró elaborar un diseño de concreto sostenible que incorpora 15% de vidrio molido reciclado y 10% de humo de sílice, alcanzando una resistencia a compresión de 345.60 kg/cm² a los 28 días, valor que supera en 65.60 kg/cm² (23.4%) la resistencia de diseño de 280 kg/cm², cumpliendo y excediendo el objetivo planteado.
- El diseño propuesto permitió sustituir parcialmente los materiales tradicionales mediante la incorporación de 15% de vidrio molido como reemplazo de agregado fino y 10% de humo de sílice como sustituto del cemento, evidenciando la viabilidad técnica del uso de materiales reciclados en la producción de concreto estructural.
- La aplicación del diseño HS10V15 permitió reducir el consumo de arena en 112.68 kg/m³ y de cemento en 38.57 kg/m³, demostrando una disminución cuantificable en el uso de recursos naturales, lo cual responde directamente al objetivo de mitigar su consumo indiscriminado en Lima Metropolitana.

Objetivo 1: *Caracterizar los materiales utilizados para la elaboración del concreto sostenible, incluyendo arena, piedra chancada, plastificante, vidrio molido reciclado y humo de sílice.*

- La caracterización de los agregados convencionales determinó que la arena presenta un peso específico de 2.61 g/cm³ y un módulo de finura de 3.097, mientras que la piedra chancada presenta un peso específico de 2.64 g/cm³, valores que se encuentran dentro de los rangos establecidos por la normativa. Asimismo, los pesos unitarios de 1572.05 kg/m³ (suelto) y 1791.19 kg/m³ (compactado) para el agregado fino, y 1582.74 kg/m³ (suelto) y 1717.41 kg/m³ (compactado) para el agregado grueso, evidencian condiciones adecuadas para su uso en concreto estructural.

- La caracterización granulométrica del vidrio molido reciclado evidenció que su distribución de partículas se encuentra dentro del rango del agregado fino, mostrando un comportamiento similar al de la arena natural según la curva granulométrica obtenida. Esta compatibilidad permitió su incorporación en la mezcla sin generar discontinuidades en la matriz granular, siendo empleado como reemplazo parcial en proporciones de hasta 187.79 kg/m³ de agregado fino
- La caracterización del humo de sílice evidenció su comportamiento como material cementante suplementario, siendo incorporado en una proporción del 10% en reemplazo del cemento, lo que permitió reducir su contenido de 385.71 kg/m³ a 347.14 kg/m³. Asimismo, sus características de elevada finura y alto contenido de sílice amorfa favorecen su integración en la pasta de cemento, lo que respalda su uso como material alternativo dentro del diseño de mezcla.

Objetivo 2: *Realizar el diseño de mezclas de concreto, incluyendo un concreto patrón, mezclas con reemplazo de arena natural por vidrio molido reciclado en proporciones de 15 %, 20 % y 25 %, mezclas con reemplazo parcial del cemento por humo de sílice en 10 %, así como combinaciones de vidrio molido y humo de sílice, para evaluar su desempeño en estado fresco y endurecido, considerando su aplicación idónea para columnas.*

- El diseño de mezclas de concreto, desarrollado mediante el método ACI, permitió establecer dosificaciones consistentes para un f'c de 280 kg/cm², definiéndose un concreto patrón con 385.71 kg/m³ de cemento, 216 L de agua, 761.19 kg/m³ de agregado fino y 894.00 kg/m³ de agregado grueso. A partir de esta base, se realizaron variaciones controladas en el contenido de materiales, garantizando la comparabilidad entre las mezclas evaluadas.
- Se diseñaron mezclas con reemplazo de arena natural por vidrio molido reciclado en proporciones de 15%, 20% y 25%, lo que permitió reducir el contenido de agregado fino desde 761.19 kg/m³ hasta 570.89 kg/m³, representando una disminución de 190.30 kg/m³. Asimismo, se incorporó humo de sílice en un 10% en sustitución del cemento, reduciendo su contenido de 385.71 kg/m³ a 347.14 kg/m³, equivalente a una disminución de 38.57 kg/m³. Estas variaciones fueron integradas manteniendo el equilibrio volumétrico del concreto, asegurando la coherencia en la dosificación.
- La combinación de sustituciones en el diseño HS10V15, correspondiente a 10% de humo de sílice (347.14 kg/m³ de cemento) y 15% de vidrio molido reciclado

(reducción de 761.19 kg/m³ a 646.01 kg/m³ de agregado fino), permitió establecer una dosificación equilibrada de los componentes del concreto, manteniendo una trabajabilidad adecuada para su colocación en elementos estructurales tipo columna. En contraste, el incremento del vidrio molido hasta 25% (570.89 kg/m³ de agregado fino) evidenció limitaciones en la estabilidad de la mezcla, permitiendo definir un rango óptimo de sustitución desde la etapa de diseño.

Objetivo 3: *Realizar ensayos de concreto en estado fresco, incluyendo temperatura, asentamiento y contenido de aire, así como ensayos de concreto endurecido, tales como resistencia a la compresión y flexión de las muestras.*

- Los ensayos en estado fresco evidenciaron que la incorporación de vidrio molido reciclado incrementa la trabajabilidad del concreto, elevando el asentamiento desde 6.00 in en el concreto patrón hasta 7.50 in con 25% de reemplazo, mientras que la incorporación de 10% de humo de sílice reduce el slump a 4.50 in. Las combinaciones HS10V15 y HS10V20 alcanzaron valores de 5.00 in y 7.00 in, respectivamente, demostrando que el vidrio molido compensa parcialmente la pérdida de fluidez generada por el humo de sílice.

- En cuanto a la temperatura, las mezclas con solo vidrio molido mantuvieron valores cercanos al concreto patrón (20.60 °C), con variaciones menores a 1 °C, mientras que las mezclas con humo de sílice alcanzaron temperaturas de hasta 27.90 °C. Asimismo, el contenido de aire se mantuvo dentro de rangos convencionales entre 1.98% y 2.50%, sin evidenciar efectos adversos en la estabilidad de la mezcla, lo que confirma la viabilidad técnica de las dosificaciones evaluadas en estado fresco.

- En estado endurecido, las mezclas con vidrio molido y humo de sílice presentaron desempeños superiores al concreto patrón. A los 28 días, el concreto patrón alcanzó 326.89 kg/cm² en compresión, mientras que las mezclas V15 y V20 lograron 342.94 kg/cm² y 337.03 kg/cm², y las combinaciones HS10V15 y HS10V20 alcanzaron 345.60 kg/cm² y 347.60 kg/cm², superando el f’c de diseño de 280 kg/cm². En resistencia a flexión, el patrón registró 53.10 kg/cm², frente a 64.20 kg/cm² y 66.50 kg/cm² en HS10V15 y HS10V20, respectivamente. En contraste, la mezcla V25 presentó una reducción a 280.99 kg/cm², evidenciando

que reemplazos elevados de vidrio afectan el desempeño mecánico, estableciendo como rango óptimo de sustitución entre 15% y 20%.

Objetivo 4: *Analizar comparativamente el desempeño técnico, económico y ambiental de los diseños de mezcla de concreto mediante la interpretación de los resultados obtenidos en los ensayos en estado fresco y endurecido.*

- El análisis técnico evidenció que los diseños combinados HS10V15 y HS10V20 presentan el mejor desempeño estructural, al alcanzar resistencias a compresión de 345.60 kg/cm² y 347.60 kg/cm², respectivamente, superiores al concreto patrón (326.89 kg/cm²) y al f'c de diseño (280 kg/cm²). Asimismo, en resistencia a flexión, estos diseños alcanzaron 64.20 kg/cm² y 66.50 kg/cm², superando el valor del patrón (53.10 kg/cm²), lo que confirma que la incorporación combinada de vidrio molido y humo de sílice no solo mantiene, sino mejora el comportamiento mecánico del concreto.

- El análisis técnico evidenció que los diseños combinados HS10V15 y HS10V20 presentan el mejor desempeño estructural, al alcanzar resistencias a compresión de 345.60 kg/cm² y 347.60 kg/cm², respectivamente, superiores al concreto patrón (326.89 kg/cm²) y al f'c de diseño (280 kg/cm²). Asimismo, en resistencia a flexión, estos diseños alcanzaron 64.20 kg/cm² y 66.50 kg/cm², superando el valor del patrón (53.10 kg/cm²), lo que confirma que la incorporación combinada de vidrio molido y humo de sílice no solo mantiene, sino mejora el comportamiento mecánico del concreto.

- Desde el enfoque ambiental, el diseño HS10V15 permitió reducir el consumo de 112.68 kg/m³ de arena (15%) y 38.57 kg/m³ de cemento (10%), lo que representa una disminución significativa en el uso de recursos naturales. A escala de proyecto, para 235 m³ de concreto, esto equivale a una reducción de 26.48 t de arena y 9.06 t de cemento. A nivel de Lima Metropolitana, su implementación podría disminuir hasta 158,582.70 t de arena y 350,056.70 t de cemento anualmente, evidenciando su alto potencial para mitigar el impacto ambiental en la industria de la construcción.

7.2. Recomendaciones

Objetivo general: *Elaborar un diseño de concreto con resistencia f'c = 280 kg/cm² que emplee vidrio molido reciclado como reemplazo parcial de la arena y humo de sílice como sustituto parcial del cemento para ayudar a reducir el consumo indiscriminado de arena y cemento en Lima Metropolitana.*

- Se recomienda que el diseño de concreto con 15% de vidrio molido reciclado y 10% de humo de sílice (HS10V15) sea considerado como alternativa técnica en proyectos estructurales de Lima Metropolitana, especialmente en elementos como columnas. Este diseño alcanza una resistencia a compresión de 345.60 kg/cm² y a flexión de 64.20 kg/cm², superiores al concreto patrón, permitiendo además reducir 112.68 kg/m³ de arena (15%) y 38.57 kg/m³ de cemento (10%), contribuyendo a la optimización del uso de recursos y a la disminución del impacto ambiental.
- Se recomienda que futuras investigaciones y aplicaciones en obra evalúen el desempeño del diseño HS10V15 a escala real, incorporando ensayos de durabilidad, comportamiento a largo plazo y control de calidad en campo. Asimismo, se sugiere desarrollar análisis económicos integrales que incluyan costos indirectos y beneficios ambientales, con el fin de validar su viabilidad técnica y económica en condiciones reales y facilitar su incorporación en especificaciones técnicas y normativas locales.
- Se recomienda promover la incorporación progresiva del uso de vidrio molido reciclado y humo de sílice en la industria de la construcción de Lima Metropolitana, mediante lineamientos técnicos y normativos que incentiven la reducción del consumo de materiales tradicionales. Considerando que el diseño HS10V15 permite disminuir hasta 112.68 kg/m³ de arena y 38.57 kg/m³ de cemento, su aplicación a gran escala podría generar un impacto significativo en la reducción de la explotación de recursos naturales y en las emisiones asociadas a la producción de cemento.

Objetivo 1: *Caracterizar los materiales utilizados para la elaboración del concreto sostenible, incluyendo arena, piedra chancada, plastificante, vidrio molido reciclado y humo de sílice.*

- Se recomienda complementar la caracterización del vidrio molido reciclado mediante la evaluación de la forma, angularidad y textura superficial de sus partículas, en adición a la granulometría determinada, con el fin de analizar con mayor precisión su influencia en la adherencia pasta–agregado y en el comportamiento del concreto.
- Se recomienda complementar la caracterización del humo de sílice mediante el análisis de su contribución a la densificación de la matriz cementante, con el fin de comprender mejor su efecto en la reducción de vacíos y en el desarrollo de las propiedades mecánicas del concreto.
- Se recomienda complementar la caracterización de los agregados (arena y piedra chancada) mediante la evaluación de la absorción de agua, con el fin de determinar con mayor precisión el contenido de agua efectiva en la mezcla y mejorar la exactitud en el diseño de concreto.

Objetivo 2: *Realizar el diseño de mezclas de concreto, incluyendo un concreto patrón, mezclas con reemplazo de arena natural por vidrio molido reciclado en proporciones de 15 %, 20 % y 25 %, mezclas con reemplazo parcial del cemento por humo de sílice en 10 %, así como combinaciones de vidrio molido y humo de sílice, para evaluar su desempeño en estado fresco y endurecido, considerando su aplicación idónea para columnas.*

- Se recomienda que en el diseño de mezclas de concreto sostenible se prioricen rangos de sustitución de vidrio molido reciclado entre 15% y 20%, debido a que en el presente estudio dichos porcentajes permitieron mantener la coherencia del diseño sin afectar la estabilidad de la mezcla, a diferencia del 25%, que evidenció limitaciones en su comportamiento.
- Se recomienda que en el diseño de mezclas de concreto sostenible se prioricen rangos de sustitución de vidrio molido reciclado entre 15% y 20%, debido a que en el presente estudio dichos porcentajes permitieron mantener la coherencia del diseño sin afectar la estabilidad de la mezcla, a diferencia del 25%, que evidenció limitaciones en su comportamiento.

- Se recomienda que el contenido de humo de sílice sea incorporado de manera controlada en el diseño de mezclas, considerando valores cercanos al 10% como referencia, debido a que en el presente estudio permitió reducir el contenido de cemento sin comprometer la coherencia de la dosificación ni el equilibrio entre los componentes del concreto.

Objetivo 3: *Realizar ensayos de concreto en estado fresco, incluyendo temperatura, asentamiento y contenido de aire, así como ensayos de concreto endurecido, tales como resistencia a la compresión y flexión de las muestras.*

- Para aplicaciones estructurales como columnas, se recomienda emplear las dosificaciones HS10V15 y HS10V20 como referencia de selección, debido a que presentan un equilibrio adecuado entre propiedades en estado fresco y endurecido, con asentamientos entre 5.00 in y 7.00 in, temperaturas controladas y resistencias a compresión de hasta 347.60 kg/cm² y a flexión de 66.50 kg/cm² a los 28 días, superando al concreto patrón.

- No se recomienda utilizar sustituciones del 25 % de arena por vidrio molido en elementos estructurales primarios, debido a la disminución de resistencia observada (280.99 kg/cm² a 28 días), valor cercano al f'c de diseño. En estos casos, su uso debería restringirse a elementos no estructurales o ajustarse mediante rediseño de mezcla para asegurar márgenes adecuados de resistencia.
- Se recomienda considerar el efecto de la incorporación del humo de sílice en la variación de la trabajabilidad del concreto, evidenciado en la reducción del asentamiento respecto al concreto patrón, por lo que resulta necesario prever ajustes en la dosificación para garantizar condiciones adecuadas de colocación en elementos estructurales.

Objetivo 4: *Analizar comparativamente el desempeño técnico, económico y ambiental de los diseños de mezcla de concreto mediante la interpretación de los resultados obtenidos en los ensayos en estado fresco y endurecido.*

- Se recomienda priorizar el uso de la dosificación HS10V15 en aplicaciones estructurales, debido a que en el presente estudio permitió reducir aproximadamente 112.68 kg/m³ de arena natural y 38.57 kg/m³ de cemento,

alcanzando resistencias superiores al concreto patrón, lo que evidencia su viabilidad técnica y su aporte a la reducción del impacto ambiental.

- Se recomienda optimizar el uso del humo de sílice dentro del diseño de mezclas, considerando que, si bien permite reducir el contenido de cemento en aproximadamente 38.57 kg/m³, su incorporación incrementa el costo del concreto en más del 13 %, por lo que su aplicación debe evaluarse en función del tipo de proyecto y del nivel de exigencia estructural requerido.
- Se recomienda seleccionar las dosificaciones de concreto sostenible considerando un análisis integral de los resultados técnicos, económicos y ambientales, tomando como referencia que alternativas como HS10V15 permiten reducir hasta 112.68 kg/m³ de arena y 38.57 kg/m³ de cemento, con incrementos de costo controlados, lo que evidencia su mayor eficiencia frente a otras combinaciones evaluadas.

REFERENCIAS

ACI Committee 211. (2002). *Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete*. American Concrete Institute. https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=211191&Format=DOWNLOAD&Language=English&Units=US_Units

ACI Committee 216. (2007). *Fire resistance and fire protection of structures*. American Concrete Institute. https://www.concrete.org/getinvolved/committees/directoryofcommittees/acommitteehome.aspx?committee_code=C0021600

ACI Committee 318. (2019). *Building code requirements for structural concrete*. American Concrete Institute. https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=318U19&Language=English&Units=US_Units

American Concrete Institute. (2010). *Report on pervious concrete (ACI 522R-10)*. https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=52210

Amin, M., Agwa, I. S., Mashaan, N., Mahmood, S., & Abd-Elrahman, M. H. (2023). Investigation of the physical mechanical properties and durability of sustainable ultra-high performance concrete with recycled waste glass. *Sustainability, 15*(4), Artículo 3085. https://doi.org/10.3390/su15043085

Aparicio, A. (2014). Historia económica mundial 1950-1990. *Economía Informa, 1*(385), 70-83. https://www.elsevier.es/es-revista-economia-informa-114-pdf-S0185084914704207

Ashish, D. K. (2018). Feasibility of waste marble powder in concrete as partial substitution of cement and sand amalgam for sustainable growth. *Journal of Building Engineering, 15*. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.11.024

Asociación de Empresas Inmobiliarias del Perú. (2025). *Mercado inmobiliario en Lima Metropolitana creció 30 % en 2024*. Recuperado el 02 de marzo de 2026, de https://aspai.pe/2025/02/10/el-mercado-inmobiliario-de-lima-metropolitana-crecio-un-30-en-2024-impulsado-por-la-vivienda-de-interes-social/

ASTM International. (2021a). *Standard test method for infiltration rate of in place pervious concrete* (ASTM C1701/C1701M-17ar23). https://store.astm.org/c1701_c1701m-17ar23.html

ASTM International. (2021b). *American Society for Testing and Materials*. https://www.astm.org/

ASTM International. (2023a). *Standard performance specification for hydraulic cement* (ASTM C1157/C1157M-23). https://store.astm.org/c1157_c1157m-23.html

ASTM International. (2023b). *Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates* (ASTM C136/C136M-23). https://www.astm.org/

ASTM International. (2023c). *Standard specification for Portland cement* (ASTM C150/C150M-23*)*. https://www.astm.org/

ASTM International. (2023d). *Standard specification for concrete aggregates* (ASTM C33/C33M-23). https://www.astm.org/

ASTM International. (2023e). *Standard specification for chemical admixtures for concrete* (ASTM C494/C494M-23). https://www.astm.org/

ASTM International. (2023f). *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete* (ASTM C618-23). https://store.astm.org/c0618-23.html

ASTM International. (2023g). *Standard Specification for Blended Hydraulic Cements* (ASTM C595/C595M-23). https://store.astm.org/c0618-23.html

Banco Central de Reserva del Perú. (2024). *Sector construcción creció 4,1% en agosto* [Nota informativa]. https://www.bcrp.gob.pe/docs/Transparencia/Notas-Informativas/2024/nota-informativa-2024-10-23.pdf

Cámara Peruana de la Construcción. (2024). *Informe económico de la construcción N.° 78*. https://capeco.org/wp-content/uploads/2024/07/Informe-Economico-de-la-Construccion-IEC-78.pdf

Cámara Peruana de la Construcción. (2025). *IEC94 – Construcción crecería 4.5% en 2025 pero se ralentizaría el próximo año – Informe económico de la construcción*. Recuperado el 02 de marzo de 2026, de

https://iec.capeco.org/iec94-construccion-creceria-4-5-en-2025-pero-se-ralentizaria-el-proximo-ano/

Cárcel, J., Martínez, A., Llinares, J., & Kaur, J. (2022). Alternativas ecológicas de los materiales tradicionales en la construcción sostenible. *3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme, 11*(1), 17-29. https://3ciencias.com/wp-content/uploads/2022/03/art-1_3C-Tecnologi%CC%81a-Ed.41-vol.11-n.1-1.pdf

Contreras, D. (2023, 26 de julio). *¿Cuáles son los mayores problemas ambientales que amenazan al Perú? Cuatro expertos del INTE responden*. INTE PUCP. Recuperado el 12 de marzo de 2026, de https://inte.pucp.edu.pe/noticias-y-eventos/noticias/cuales-son-los-mayores-problemas-ambientales-que-amenazan-al-peru-cuatro-expertos-del-inte-responden/

Dadouch, M., Belal, T., & Ghembaza, M. S. (2024). Valorization of glass waste as partial substitution of sand in concrete – Investigation of the physical and mechanical properties for a sustainable construction. *Construction & Building Materials, 411*, Artículo 134436. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134436

Du, H., & Tan, K. H. (2014). Properties of concrete with recycled glass as fine aggregates. *Magazine of Concrete Research, 66*(19), 973–981. https://www.researchgate.net/publication/283439859_Concrete_with_Recycled_Glass_as_Fine_Aggregates

Federico, L., & Chidiac, S. (2009). Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete – Critical review of treatment methods. *Cement And Concrete Composites, 31*(8), 606-610. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.02.001

Gebremichael, N. N., Jadidi, K., & Karakouzian, M. (2023). Waste glass recycling: The combined effect of particle size and proportion in concrete manufactured with waste recycled glass. *Construction & Building Materials, 392*, Artículo 132044. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132044

Hasan, N. M. S., Shaurdho, N. M. N., Sobuz, M. H. R., Meraz, M. M., Islam, M. S., & Miah, M. J. (2023). Utilization of waste glass cullet as partial substitutions of coarse aggregate to produce eco-friendly concrete: Role of metakaolin as cement

replacement. *Sustainability, 15*(14), Artículo 11254. https://doi.org/10.3390/su151411254

He, F., Cheng, X., Zhu, G., & Li, J. (2022). Workability and water demand of silica-fume-modified concretes. *Construction and Building Materials*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822003450

Huapaya Tenazoa, D. A., & Valdivia Farromeque, J. I. (2019). *Uso del residuo de vidrio pulverizado como adición en la elaboración de concreto ecológico* [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/626061/Huapaya%20_td.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Ibañez, D., & Flores, J. (2023). *Diseño de un concreto f'c=210 kg/cm2 utilizando ceniza de bagazo de caña de azúcar y PET como una alternativa para disminuir el uso indiscriminado de los depósitos naturales de agregados y materiales cementosos en Lima Metropolitana* [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/671796

Idir, R., Cyr, M., & Tagnit-Hamou, A. (2010). Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. *Construction and Building Materials, 24*(7), 1309–1312. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061809004413?via%3Dihub

Instituto Nacional de Calidad. (2019a). *Normas Técnicas Peruanas*. https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas

Instituto Nacional de Calidad. (2019b). *Cemento Portland. Requisitos* (Norma Técnica Peruana 334.009:2019). https://www.gob.pe/inacal

Instituto Nacional de Calidad. (2019c). *Cementos. Cementos Portland adicionados con puzolanas. Requisitos* (Norma Técnica Peruana 334.050:2019). https://www.gob.pe/inacal

Instituto Nacional de Calidad. (2019d). *Cementos. Adiciones minerales para concreto. Requisitos* (Norma Técnica Peruana 334.082:2019). https://www.gob.pe/inacal

Instituto Nacional de Calidad. (2019e). *Concreto. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto (slump)* (Norma Técnica Peruana 339.035:2019*)*. https://www.gob.pe/inacal

Instituto Nacional de Calidad. (2019f). *Concreto. Determinación de la resistencia a la flexión mediante el ensayo de vigas* (Norma Técnica Peruana 339.083:2019). https://www.gob.pe/inacal

Instituto Nacional de Calidad. (2019g). *Concreto. Determinación de la temperatura del concreto fresco* (Norma Técnica Peruana 339.184:2019). https://www.gob.pe/inacal

Instituto Nacional de Calidad. (2019h). Concreto. Determinación del contenido de humedad en el concreto fresco (Norma Técnica Peruana 339.185:2019). https://www.gob.pe/inacal

Instituto Nacional de Calidad. (2019i). *Agregados. Especificaciones para agregados para concreto* (Norma Técnica Peruana 400.011). https://www.gob.pe/inacal

Instituto Nacional de Calidad. (2019j). *Agregados. Determinación de la granulometría por tamizado* (Norma Técnica Peruana 400.012:2019). https://www.gob.pe/inacal

Instituto Nacional de Calidad. (2019k). *Agregados. Determinación del peso unitario y porcentaje de vacíos* (Norma Técnica Peruana 400.017:2019). https://www.gob.pe/inacal

Instituto Nacional de Calidad. (2019l). *Agregados. Determinación del peso específico y absorción* (Norma Técnica Peruana 400.021:2019). https://www.gob.pe/inacal

Instituto Nacional de Calidad. (2019m). *Concreto. Determinación de la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas* (Norma Técnica Peruana 400.037:2019). https://www.gob.pe/inacal

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2025). *Perú: Compendio estadístico 2025*. https://www.gob.pe/institucion/inei/informes-publicaciones/7264121-peru-compendio-estadistico-2025

International Resource Panel. (2024). *Panorama de recursos globales 2024*. The Global Resources Outlook. https://www.unep.org/es/resources/Global-Resource-Outlook-2024

Jani, Y., & Hogland, W. (2014). Waste glass in the production of cement and concrete – A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 2*(3), 1767-1775. https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.03.016

Karim, M., & Qazi, S. (2023). Flexural and compressive performance of silica-fume-modified cement composites. *Case Studies in Construction Materials*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509523001040

Kim, J., & Lee, D. (2024). Durability enhancement of concrete using high-reactivity silica fume: Pore structure and permeability analysis. *Materials, 17*(2), Artículo 552. https://www.mdpi.com/1996-1944/17/2/552

Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2011). *Design and control of concrete mixtures*. https://secement.org/wp-content/uploads/2019/01/eb001.15.pdf

León Reyes, D. J. C., & Rázuri Cueva, D. A. (2020). *Resistencia a la compresión de un concreto agregando vidrio reciclado finamente molido* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Alicia Repositorio Nacional. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCVV_8ebd5bcd9b5c157194c25860d931b16d

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2014). *Concreto, estructura, propiedades y materiales*. Imcyc. https://www.academia.edu/50834616/CONCRETO_ESTRUCTURA_PROPIEDADES_Y_MATERIALES_IMCYC

Ministerio de Economía y Finanzas. (2024). *Novedades de inversión pública 2024*. Recuperado el 15 de enero de 2026, de https://www.mef.gob.pe/es/692-preguntas-frecuentes-pf/inversion-publica/8406-comunicados-anteriores-2024

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2025, 01 de enero). *Ministerio de Vivienda logró ejecutar el 96.4% de su presupuesto de inversiones en 2024*. Plataforma Digital Única del Estado Peruano. Recuperado el 12 de marzo de 2026, de https://www.gob.pe/institucion/vivienda/noticias/1084517-ministerio-de-vivienda-logro-ejecutar-el-96-4-de-su-presupuesto-de-inversiones-en-2024

Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete*. Pearson Education Limited. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1855282

Nili, M., & Salehi, A. (2023). Effect of silica fume on the properties of sustainable cement concrete. *Construction and Building Materials*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785423011122

Park, S. B., Lee, B. C., & Kim, J. H. (2004). Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. *Cement and Concrete Research, 34*(11), 2181–2189. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.006

Premathilaka, K., Liyanapathirana, D., Leo, C., & Hu, P. (2024). Application of recycled waste glass to replace traditional quarried aggregates: A comprehensive review. *Journal of Building Engineering, 86*, Artículo 108846. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108846

Robinson G., Leonard J. & Whittington T. (2021). *Future of construction*. Marsh; Guy Carpenter; Oxford Economics. https://www.marsh.com/es/industries/construction/insights/the-future-of-construction-report.html

Salas-Montoya, J., Chung, S., & Kim, H. (2023). CO2 reduction in blended cements using high-reactivity silica fume. *Journal of Cleaner Production*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623001524

Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential, economically viable technologies to reduce CO2 emissions. *Cement and Concrete Research, 114*, 2–26. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015

Shan, Y., Wu, Z., & Liu, R. (2021). Pozzolanic reactivity of ultrafine silica fume in cement systems. *Cement and Concrete Composites*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946520302053

Shi, C., & Zheng, K. (2007). A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling, 52*(2), 234–247. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.01.013

Sika Colombia. (2025). *SikaFume® – Hoja de datos del producto*. https://col.sika.com/dam/dms/co01/3/sikafume.pdf

Sika Ecuador. (s.f.). *SikaFume® | Esenciales para concreto*. Recuperado el 12 de marzo de 2026, de https://ecu.sika.com/es/construccion/concreto/esenciales-para-concreto/sikafume.html

Sika Group. (s.f.). *Microsilica concrete*. Recuperado el 12 de marzo de 2026, de https://gbr.sika.com/en/construction/concrete/concrete-technology/microsilica-concrete.html

Sika México. (2025). *SikaFume® SF 100 – Hoja de datos del producto*. https://mex.sika.com/dam/dms/mx01/3/sikafume-sf-100.pdf

Sika Perú. (2022). *SikaFume® – Hoja de datos del producto*. https://per.sika.com/dam/dms/pe01/f/sikafume_.pdf

Sika Perú. (2025). *SikaFume® adición mineral - microsílice*. Recuperado el 12 de marzo de 2026, de https://per.sika.com/es/construccion/aditivos-concreto/aditivos-concreto-premezclado/adiciones-concreto/sikafume.html

Tamanna, N., Tuladhar, R., & Sivakugan, N. (2020). Performance of recycled waste glass sand as partial replacement of sand in concrete. *Construction and Building Materials, 239.* https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117804

UNACEM Perú. (2022). *Ficha técnica Cemento Andino Ultra*. https://unacem.pe/wp-content/uploads/2022/10/FICHA-TECNICA-ANDINO-ULTRA-2022.pdf

United Nations Environment Programme. (2019). *Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources*. https://wedocs.unep.org/items/ffadb116-25c7-4ec1-9a13-96adbcf998c4

Watari, T., Cao, Z., Serrenho, A. C., & Cullen, J. (2023). Growing role of concrete in sand and climate crises. *iScience, 26*(5), Artículo 106782. https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106782

Xie, Y., Far, H., Mortazavi, M., & El-Sherbeeny, A. M. (2024). Improving the Mechanical Properties of Concrete Mixtures by Shape Memory Alloy Fibers and Silica Fume. Buildings, 14(6), 1709. https://doi.org/10.3390/buildings14061709

ANEXOS

Anexo 1

Diseño de mezcla de concreto con reemplazo de vidrio reciclado (15%, 20% y 25%) en hoja de cálculo Excel.

DISEÑO DE VIDRIO

sika-cem 1.20%

					15% Vidrio						
MATERIALES INTEGRANTES	PROCEDENCIA	P. ESP (Kg/m3)	HUM. %	ABS %	PESO SECO (KG/M3)	VOL.	AGUA DE ABSORCIÓN	AGUA DE HUMEDAD	APORTE DE AGUA	DOSIFICACIÓN SSS	DOSIFICACIÓN CORREGIDA POR HUMEDAD (Kg)
CEMENTO ANDINO ULTRA HS	ANDINO	2980.00			385.71					385.71	385.71
AGREGADO FINO		2611.20	1.33	1.70	638.49		10.854	8.515	-2.340	649.35	647.01
AGREGADO GRUESO		2636.87	0.16	0.75	893.05		6.658	1.386	-5.271	899.71	894.44
Sika Cem	Sika	1200.00			4.63					4.63	4.63
AGUA	RED PÚBLICA	1000.00			216.00					216.00	223.61
Metacaolin		2200.00			0.00					0.00	0.00
Vidrio					112.68					112.68	112.68
Aire atrapado					0.00						
					2250.57				-7.611	2155.402	2155.402

sika-cem 1.20%

					20% Vidrio						
MATERIALES INTEGRANTES	PROCEDENCIA	P. ESP (Kg/m3)	HUM. %	ABS %	PESO SECO (KG/M3)	VOL.	AGUA DE ABSORCIÓN	AGUA DE HUMEDAD	APORTE DE AGUA	DOSIFICACIÓN SSS	DOSIFICACIÓN CORREGIDA POR HUMEDAD (Kg)
CEMENTO PORLANT TIPO V	ANDINO	2980.00			385.71					385.71	385.71
AGREGADO FINO		2611.20	1.33	1.70	600.94		10.216	8.014	-2.202	611.15	608.95
AGREGADO GRUESO		2636.87	0.16	0.75	893.05		6.658	1.386	-5.271	899.71	894.44
Sika Cem	Sika	1200.00			4.63					4.63	4.63
AGUA	RED PÚBLICA	1000.00			216.00					216.00	223.47
Metacaolin		2200.00			0.00					0.00	0.00
Vidrio					150.23					150.23	150.23
Aire atrapado					0.00						
					2250.57				-7.473	2117.205	2117.205

sika-cem 1.20%

					25% Vidrio						
MATERIALES INTEGRANTES	PROCEDENCIA	P. ESP (Kg/m3)	HUM. %	ABS %	PESO SECO (KG/M3)	VOL.	AGUA DE ABSORCIÓN	AGUA DE HUMEDAD	APORTE DE AGUA	DOSIFICACIÓN SSS	DOSIFICACIÓN CORREGIDA POR HUMEDAD (Kg)
CEMENTO PORLANT TIPO V	ANDINO	2980.00			385.71					385.71	385.71
AGREGADO FINO		2611.20	1.33	1.70	563.38		9.577	7.513	-2.064	572.96	570.89
AGREGADO GRUESO		2636.87	0.16	0.75	893.05		6.658	1.386	-5.271	899.71	894.44
Sika Cem	Sika	1200.00			4.63					4.63	4.63
AGUA	RED PÚBLICA	1000.00			216.00					216.00	223.34
Metacaolin		2200.00			0.00					0.00	0.00
Vidrio					187.79					187.79	187.79
Aire atrapado					0.00						
					2250.57				-7.335	2079.008	2079.008

Anexo 2

Ficha técnica del cemento Andino Ultra Tipo HS, proporcionada por UNACEM, que incluye sus propiedades físicas y químicas.

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

PARÁMETRO	UNIDAD	CEMENTO ANDINO ULTRA	REQUISITOS NTP-334.082/ ASTM C-1157
Contenido de aire	%	3	Máximo 12
Expansión autoclave	%	0.02	Máximo 0.80
Superficie específica	m²/kg	500	No específica
Densidad	g/cm³	2.98	No específica
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN			
Resistencia a la compresión a 3 días	kg/cm²	278	Mínimo 112
Resistencia a la compresión a 7 días	kg/cm²	363	Mínimo 184
Resistencia a la compresión a 28 días	kg/cm²	466	Mínimo 255
TIEMPO DE FRAGUADO			
Fraguado Vicat inicial	min	146	45 a 420
BARRAS CURADAS EN AGUA			
Expansión a 14 días	%	0.009	Máximo 0.020
POTENCIAL ÁLCALI-REACTIVO			
Expansión a 14 días	%	0.013	Máximo 0.020
Expansión a 56 días	%	0.032	Máximo 0.060
CALOR DE HIDRATACIÓN			
Calor de hidratación a 7 días	kj/kg	256	Máximo 335
RESISTENCIA A LOS SULFATOS			
Resistencia al ataque de sulfatos a 180 días	%	< 0.05	0.05 % máx. a 180 días
Resistencia al ataque de sulfatos a 360 días	%	< 0.07	0.10 % máx. a 360 días

Nota: De "Ficha técnica Cemento Andino Ultra", por UNACEM Perú, 2022 (https://unacem.pe/wp-content/uploads/2022/10/FICHA-TECNICA-ANDINO-ULTRA-2022.pdf).

Anexo 3

Registro fotográfico del proceso de recolección de vidrio sodocálcico utilizado como material reciclado en la investigación.



Anexo 4

Registro fotográfico del proceso de pesaje de los materiales de acuerdo con el diseño de mezcla de concreto establecido.



Anexo 5

Registro fotográfico del proceso de preparación y mezclado del concreto.



Anexo 6

Registro fotográfico del ensayo de asentamiento (slump) del concreto.



Anexo 7

Registro fotográfico del ensayo de temperatura del concreto en estado fresco.



Anexo 8

Registro fotográfico del ensayo de contenido de aire del concreto en estado fresco.



Anexo 9

Registro fotográfico de las muestras de concreto en laboratorio utilizadas en la investigación.



Anexo 10

Registro fotográfico del proceso de ensayo de compresión del concreto endurecido.



Anexo 11

Registro fotográfico del ensayo de resistencia a la flexión del concreto.



Anexo 12

Evidencia fotográfica del laboratorio de tecnología del concreto – UPC campus Villa.

