

Compressive Resistance $F'c=210 \text{ Kg/cm}^2$ With The Replacement Of Cement In 9%, 11% And 22% With Ground Glass, Cajamarca 2023

Alex Paul Pastor Ravines, Ing.¹; Orlando Aguilar Aliaga, Dr.²

¹Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, n00186595@upn.pe

²Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca – Perú, orlando.aguilar@upn.edu.pe

The main purpose of this research was to analyze the axial compressive strength of a concrete $F'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$ incorporating glass as an ecological material and determine the appropriate percentage according to the evaluated. To achieve this, a partial replacement of cement was carried out with the following percentages (9%, 11% and 22%) of ground glass, in order to compare conventional or pattern concrete with an ecological concrete explained above. The study began with the analysis of the physical - mechanical properties of the aggregates that concluded with the determination of their granulometry, unit weight, moisture content, specific weight and their absorption. Next, the concrete mix was designed based on cement replacement percentages, using a 3-4" (inch) slump to ensure adequate workability of the material. A total of 72 cylindrical 6" x 12" samples were prepared using conventional concrete and replacement samples for the three percentages. The objective was to determine the optimal ground glass replacement percentage for an $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$. Concrete core fracture tests were performed 7, 14, and 28 days after entering the curing pit. The appropriate percentage for the mix design resulted in 11% cement replacement, as 312.64 kg/cm^2 was recorded at 28 days of curing, representing a 48.88% increase in strength.

Keywords: Axial compression, cylindrical cores, ground glass, cement, cement replacement.

Resistencia A La Compresión $f'c=210 \text{ Kg/cm}^2$ Con El Reemplazo Del Cemento En 9%, 11% Y 22% Con Vidrio Molido, Cajamarca 2023

Alex Paul Pastor Ravines, Ing.¹; Orlando Aguilar Aliaga, Dr.²

¹Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca – Perú, n00186595@upn.pe

²Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca – Perú, orlando.aguilar@upn.edu.pe

Resumen: El propósito principal de la presente investigación fue analizar la resistencia a la compresión axial de un concreto $f'c=210 \text{ Kg/cm}^2$ incorporando como material ecológico al vidrio y determinar el porcentaje adecuado según lo evaluado. Para lograr esto, se realizó un reemplazo parcialmente al cemento con los siguientes porcentajes (9%, 11% y 22%) de vidrio molido, a fin de comparar el concreto convencional o patrón con un concreto ecológico explicado anteriormente. El estudio comenzó con el análisis de las propiedades físico - mecánicas de los agregados que concluyó con la determinación de su granulometría, peso unitario, contenido de humedad, peso específico y su absorción. Luego, se procede a diseñar la mezcla de concreto según los porcentajes de reemplazo del cemento, en el cual se utilizó un asentamiento de 3-4" (pulgadas) para garantizar una adecuada trabajabilidad del material. Posteriormente, se prepararon un total de 72 pruebas o testigos cilíndricos de 6" x 12" entre concreto convencional y el reemplazo de los tres porcentajes mencionados. El objetivo fue determinar cuál era el porcentaje de reemplazo por vidrio molido óptimo para un $f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$. Las pruebas a la rotura de testigos de concreto se realizaron a los 7, 14 y 28 días de ingresar a la poza de curado. El porcentaje adecuado para el diseño de mezcla tuvo como resultado el 11% de reemplazo de cemento ya que a la edad de 28 días de curado se llegó a registrar 312.64 kg/cm^2 que significa un aumento de la resistencia de 48.88%.

Palabras clave: Compresión axial, testigos cilíndricos, vidrio molido, cemento, reemplazo del cemento.

I. INTRODUCCIÓN

La ingeniería desde décadas atrás se viene desarrollado como uno de los pilares para el desarrollo humano, desde las primeras construcciones ejecutadas por los neandertales hace 176 000 años y la construcción de viviendas prehistóricas a base de piedras forman parte de nuestra evolución.

En todo el mundo los diversos materiales de construcción se diseñan con el fin de cubrir una necesidad y con ella la de brindar características estructurales duraderas en el tiempo para así brindar calidad y seguridad en las viviendas. El vidrio es un material antiguo que es utilizado para el almacenamiento y conservación de los alimentos, nos remontamos hace aproximadamente 3.000 años antes de Cristo para la ubicación de su uso. En Siria, los mercaderes de natrón, un mineral que se utiliza para preparar la sosa, fueron quienes descubrieron el vidrio tras una verificación que, al fundirlo y colocarlo en

unión con la arena, resultaba un material admirable y brillante. [1]

La problemática mundial relacionada con el incremento de residuos sólidos en los vertederos y su impacto ambiental ha generado una creciente preocupación por la reutilización de un material sólido como es el vidrio. En este sentido, se despierta un gran interés a nivel global en la utilización de este material como alternativa para el rubro de la construcción civil, especialmente como reemplazo parcial en las mezclas de concreto. El vidrio desechado se ha considerado como una materia prima viable para sustituir parcialmente el cemento y también en los agregados en la producción de concreto. En tal sentido, existen diversas investigaciones significativas en este campo ya sea como paper o tesis de grado.

En Perú, el crecimiento económico y social no ha sido gestionado de manera sostenible, el aumento descontrolado de las actividades industriales y comerciales han resultado en la degradación del entorno natural y la salud de la población. Es clave indicar que la generación de residuos sólidos per cápita es de 0.58 kg/hab/día. Según el INEI en el libro publicado sobre estadísticas ambientales, existe un total de generación de residuos domiciliarios en el 2022 de 16 216,4 T/día es decir 5 919 000,6 por T/año. Solo en la ciudad de Cajamarca se recoge un promedio de 298,1 T/día de residuos sólidos del cual el 3% es vidrio. [2]

La presente investigación se focaliza en el análisis de la resistencia a la compresión axial del concreto $f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$ con reemplazo de vidrio molido (VM), por medio de 3 diferentes porcentajes de vidrio. La hipótesis planteada que con el reemplazo parcial de cemento en 9%, 11% y 22% influye en el incremento de resistencia a la compresión axial planteada de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ hasta un 15%.

El diseño de mezcla del concreto seguirá las especificaciones proporcionadas por el Comité ACI 211.1 y por las Normas Técnicas Peruanas, así como investigaciones realizadas similares o complementarias a la investigación.

En esta problemática y con la finalidad de contribuir con el medio ambiente con nuevas tecnologías de la construcción se ha cogido como material de estudio el vidrio molido. En

estos se busca determinar la resistencia a compresión axial de testigos cilíndricos de concreto en 9%, 11% y 22% de reemplazo parcial por el cemento.

La investigación plantea la siguiente pregunta, ¿Cuál es el comportamiento de la resistencia a compresión axial del concreto $f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$ con el reemplazo del cemento en 9%, 11% y 22% con vidrio molido?

Se planteó como objetivo principal, “Determinar la resistencia a la compresión axial del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con el reemplazo del cemento en 9%, 11% y 22% con vidrio molido” y como objetivos específicos, determinar las propiedades físicas y mecánicas de los agregados, elaborar un diseño de mezcla utilizando el método de ACI para los distintos porcentajes, elaborar testigos con y sin adición de vidrio molido en la mezcla de concreto $f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$, reemplazando al cemento portland, determinar y analizar la resistencia a compresión axial del concreto sin adición de vidrio molido y el concreto con reemplazo en 9%, 11% y 22% de vidrio molido, a los 7, 14 y 28 días de curado, analizar estadísticamente los datos de resistencia a compresión del concreto patrón y los tres porcentajes de reemplazo, realizar un análisis de costos en función al concreto patrón y los porcentajes de reemplazo.

Así mismo, como hipótesis, “El reemplazo parcial de cemento en 9%, 11% y 22% influye en el incremento de resistencia a la compresión axial planteada de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ hasta un 15%”.

En Ecuador, [3] tuvo como propósito la búsqueda de una solución para la utilización del cemento, en la cual se eligió al vidrio debido a sus excelentes características de resistencia y durabilidad. Esta investigación indica que fueron evaluados tres porcentajes en un tiempo máximo de 56 días, siendo estos el 5%, 10% y 15%, los cuales fueron comparados con el concreto convencional (21 MPa), a los 28 días de rotura el concreto patrón alcanzó 230.21 Kg/cm^2 , el 5% de reemplazo del cemento se obtuvo 207.29 Kg/cm^2 , con el 10% de reemplazo del cemento alcanzó 201.02 Kg/cm^2 , y por último el 15% de reemplazo del cemento se obtuvo 167.18 Kg/cm^2 , finalmente se reventaron probetas a los 56 días de curado obteniendo los siguientes valores: el concreto patrón alcanzó a tal edad 264.18 Kg/cm^2 , el 5% de reemplazo del cemento obtuvo 258.47 Kg/cm^2 , el 10% de reemplazo alcanzó 245.01 Kg/cm^2 y el 15% de sustitución del cemento alcanzó 206.33 Kg/cm^2 . La realización del estudio mencionado tuvo efectos positivos en la resistencia a compresión ya que a edades mayores causa una mejor adherencia del vidrio con la mezcla del concreto.

En Lima, [4] se realizaron ensayos a compresión axial en porcentajes de 5%, 10% y 15%, los testigos cilíndricos tuvieron dimensiones de 4” x 8”. En total se elaboraron 48 testigos para una resistencia 210 Kg/cm^2 , el concreto patrón a

los 7 días de curado alcanzó 223.23 Kg/cm^2 , con el reemplazo del 5% de vidrio por cemento fue de 223.00 Kg/cm^2 , el reemplazo del 10% de vidrio por cemento alcanzó 162.17 Kg/cm^2 y con el reemplazo del 15% de vidrio por cemento se obtuvo 147.90 Kg/cm^2 . El concreto patrón a los 14 días de curado alcanzó 240.93 Kg/cm^2 , con el reemplazo del 5% de vidrio por cemento fue de 242.33 Kg/cm^2 , el reemplazo del 10% de vidrio por cemento alcanzó 208.67 Kg/cm^2 y con el reemplazo del 15% de vidrio por cemento se obtuvo 182.02 Kg/cm^2 . El concreto patrón a los 28 días de curado alcanzó 263.93 Kg/cm^2 , con el reemplazo del 5% de vidrio por cemento fue de 267.17 Kg/cm^2 , el reemplazo del 10% de vidrio por cemento alcanzó 234.13 Kg/cm^2 y con el reemplazo del 15% de vidrio por cemento se obtuvo 200.90 Kg/cm^2 . El concreto patrón a los 56 días de curado alcanzó 272.67 Kg/cm^2 , con el reemplazo del 5% de vidrio por cemento fue de 274.75 Kg/cm^2 , el reemplazo del 10% de vidrio por cemento alcanzó 277.43 Kg/cm^2 y con el reemplazo del 15% de vidrio por cemento se obtuvo 237.04 Kg/cm^2 .

En Barranca, [5] se elaboraron 64 testigos cilíndricos para ser ensayados a compresión axial con un concreto de 210 Kg/cm^2 en los porcentajes de 0%, 5%, 10% y 15%. A los 7 días de curado el concreto base obtuvo 188.64 Kg/cm^2 , con el 5% de reemplazo de cemento por vidrio fue de 189.13 Kg/cm^2 , el 10% de reemplazo del cemento por vidrio se obtuvo 188.40 Kg/cm^2 , con el 15% de reemplazo del cemento por vidrio fue de 186.15 Kg/cm^2 . A los 14 días de curado el concreto base obtuvo 238.14 Kg/cm^2 , con el 5% de reemplazo de cemento por vidrio fue de 239.15 Kg/cm^2 , el 10% de reemplazo del cemento por vidrio se obtuvo 237.48 Kg/cm^2 , con el 15% de reemplazo del cemento por vidrio fue de 234.75 Kg/cm^2 . A los 21 días de curado el concreto base obtuvo 274.75 Kg/cm^2 , con el 5% de reemplazo de cemento por vidrio fue de 280.29 Kg/cm^2 , el 10% de reemplazo del cemento por vidrio se obtuvo 275.64 Kg/cm^2 , con el 15% de reemplazo del cemento por vidrio fue de 270.34 Kg/cm^2 . A los 28 días de curado el concreto base obtuvo 302.13 Kg/cm^2 , con el 5% de reemplazo de cemento por vidrio fue de 325.19 Kg/cm^2 , el 10% de reemplazo del cemento por vidrio se obtuvo 310.67 Kg/cm^2 , con el 15% de reemplazo del cemento por vidrio fue de 288.35 Kg/cm^2 .

En Lima, [6] se realizó ensayos a compresión axial para determinar el porcentaje óptimo y posteriormente la realización de los ladrillos de concreto, los porcentajes evaluados fueron 20%, 25% y 30% para un $f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$. Se elaboraron 36 probetas cilíndricas de 4” x 8”, a los 7 días el 25% de reemplazo del cemento obtuvo el mayor valor 174.601 Kg/cm^2 , para los 14 días el 25% de reemplazo del cemento fue el mayor valor de los tres porcentajes 214.904 Kg/cm^2 , a los 21 días el 25% de reemplazo del cemento siguió manteniendo la mayor fuerza a compresión 234.352 Kg/cm^2 y finalmente a los 28 días de curado obtuvo 256.995 Kg/cm^2 . Se determinó según los ensayos que la mejor proporción de vidrio es de 25%.

En Jaén, [7] se realizó un diseño de mezcla para un $f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$ para un total de 120 testigos cilíndricos de dimensiones 10 cm x 20 cm, los porcentajes utilizados fueron de 0%, 4%, 6% y 8% de reemplazo de vidrio con relación al cemento. El ensayo de resistencia a compresión a los 7 días de curado con 0% de vidrio o también llamado concreto patrón se obtuvo 204.04 Kg/cm^2 , con el reemplazo de 4% se obtuvo 212.39 Kg/cm^2 , con el reemplazo de 6% se obtuvo 219.37 Kg/cm^2 y con el reemplazo de 8% se obtuvo 224.57 Kg/cm^2 , a los 14 días de curado con 0% de vidrio o también llamado concreto patrón se obtuvo 233.28 Kg/cm^2 , con el reemplazo de 4% se obtuvo 245.68 Kg/cm^2 , con el reemplazo de 6% se obtuvo 253.94 Kg/cm^2 y con el reemplazo de 8% se obtuvo 263.49 Kg/cm^2 , a los 28 días de curado con 0% de vidrio o también llamado concreto patrón se obtuvo 259.18 Kg/cm^2 , con el reemplazo de 4% se obtuvo 275.01 Kg/cm^2 , con el reemplazo de 6% se obtuvo 287.87 Kg/cm^2 y con el reemplazo de 8% se obtuvo 304.39 Kg/cm^2 . Para dicha investigación la dosificación con 8% de reemplazo fue la óptima.

II. METODOLOGÍA

Desde la perspectiva del objetivo de la investigación es de tipo aplicada, puesto que nos va a servir como una alternativa de elaboración de concreto 210 kg/cm^2 con un material reciclable como es el vidrio molido y mejorar el impacto que genera este material en el medioambiente.

La investigación fue cuantitativa, de diseño experimental de tipo exploratoria. De diseño experimental porque ha sido manipulada por el investigador. De tipo exploratoria porque tuvo el objetivo de analizar información específica la cual no ha sido profundamente estudiada.

El diseño de investigación actual se basa en un enfoque cuasi experimental con un grupo de control.

La población está conformada por 72 testigos cilíndricos para un $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, que serán evaluados en 4 diseños, una sin reemplazo del cemento (Concreto Patrón) y las otras tres con reemplazo del cemento por vidrio molido en los porcentajes de 9%, 11% y 22%, que son elaborados en los laboratorios de la Universidad Privada del Norte en la ciudad de Cajamarca, para el año 2023.

La muestra estuvo conformada por 72 testigos cilíndricos $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, con dimensiones de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. En la (NTP 339.183, 2013) establece que los especímenes cilíndricos a elaborar como mínimo serán de 3, para la presente investigación se requirió 6 testigos cilíndricos y según la nota 8 indica que generalmente las edades de ensayo son a los 7 días y 28 días para el caso del cemento portland tipo 1, en nuestro caso aplicaremos el ensayo a los días 7, 14 y 28 días de curado.

Para la técnica de muestreo se optó por utilizar un enfoque no probabilístico debido a la necesidad de determinar las mezclas de concreto con porcentajes específicos de reemplazo de vidrio molido (VM).

La muestra está compuesta por 18 y 54 testigos de concreto entre el convencional y con el reemplazo parcial de vidrio molido, en porcentajes de 9%, 11% y 22% respectivamente, el número total de testigos de concreto será de 72 unidades con unas dimensiones de tamaño muestral de 6" x 12".

La técnica de recolección de datos se empleará la ficha de observación directa, de este modo nos permite ser más metódicos para cumplir con la recolección de datos teniendo una inspección visual de los ensayos realizados.

Tanto las variables independientes como las dependientes de esta investigación serán analizadas y evaluadas en los laboratorios especializados de la facultad de ingeniería, especialidad de ingeniería civil siguiendo los protocolos y guías de observación establecidos para llevar a cabo los ensayos correspondientes para la presente investigación de acuerdo con las Normas Técnicas Peruanas (NTP).

Los resultados obtenidos del ensayo de los especímenes de concreto serán analizados por la estadística descriptiva en el cual existen 4 etapas: recolección, recuento, presentación, síntesis y finalmente la etapa del análisis de la información y la estadística inductiva en la cual con la información sacada de las probetas cilíndricas obtendremos conclusiones del presente trabajo.

Para el análisis de datos que fueron recogidos en los protocolos de laboratorio de concreto de la Universidad Privada del Norte, se utilizará el software Microsoft Excel 2016 y el software JAMOVI para la comprobación de la hipótesis planteada.

La información obtenida se procedió a evaluar mediante la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, en la que se verifica si el conjunto de datos sigue una distribución normal, posteriormente se aplicó la prueba paramétrica ANOVA (análisis de varianza). Por último, se aplicó la técnica de comparación múltiple de John W. Tukey en la cual hace la comparación de medias individuales provenientes de un ANOVA que son sometidas a tratamientos distintos.

La presente investigación tiene en cuenta lo explicado en el Código de Ética del Investigador Científico UPN, en el cual el investigador realiza un trabajo original, respetando la propiedad intelectual de los autores, citando adecuadamente con la finalidad de fortalecer una cultura de principios, valores y responsabilidad durante todo el proceso de investigación, de esta manera salvaguardamos la integridad de todos. La información recogida de los laboratorios es acreditada por los

ingenieros encargados, quienes en todo momento están verificando que los ensayos se realicen según las especificaciones de las normas técnicas peruanas, certificando con su firma en los protocolos de UPN.

El procedimiento que tuvo el presente estudio parte desde la adquisición de los materiales, vidrio, agregados, cemento y agua, luego se procede a realizar la caracterización de los materiales, Granulometría en gruesos y finos: norma (NTP 400.012, 2014), Ensayo de contenido de humedad: norma (NTP 339.127, 2019), El ensayo de peso específico y absorción del agregado grueso, la norma (NTP 400.021, 2013), Peso específico y Absorción del Agregado Fino: según la (NTP 400.022, 2013), Peso unitario de los agregados: según (NTP 400.017, 2011), Abrasión de los ángeles: según (NTP 400.019, 2014).

Procedimiento para el diseño de mezclas (ACI 211.1, 2002): Para iniciar con el diseño de mezcla, se debe tener los siguientes datos de los ensayos elaborados previamente. El procedimiento de diseño de mezclas de concreto se resume en 09 pasos que son: Determinación de la resistencia necesaria, escoger el slump o revenimiento, seleccionar el tamaño máximo nominal del agregado grueso, calcular la cantidad de agua de mezcla y el contenido de aire, elegir la relación adecuada de a/c, cálculo del contenido de cemento, evaluación del contenido de agregado grueso, evaluación del contenido de agregado fino y, por último paso, realización del ajuste por humedad del agregado.

Posteriormente, la elaboración de testigos: (NTP 339.183, 2013) indica el procedimiento en el cual elegimos los moldes de 6"x 12", se llena los moldes en dos capas de igual altura y con la varilla lisa de 3/8" se compacta 25 veces, luego con el mazo de goma efectuamos 15 golpes en todo el contorno del molde y finalmente se alisa hasta quedar uniforme y sin excesos de mezcla. El ensayo en estado fresco de Slump o Revenimiento del concreto: (NTP 339.035, 2009).

Curado de las probetas: Después de haber transcurrido 24 horas, procedemos a desencofrar los testigos cilíndricos, se identifica y codifica cada espécimen para reconocer que porcentaje contiene de vidrio y fecha de elaboración, y se introduce a una poza de curado. Rotura de los testigos: según la (NTP 339.034, 2015).

Finalmente se realizó el procesamiento de datos en gabinete y el análisis de resultados.

III. RESULTADOS

Tabla 1
Resultados de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados.

DATOS DE LOS ENSAYOS		
Peso específico de masa agregado fino	2.69	g/cm ³

Peso específico de masa agregado grueso	2.74	g/cm ³
Contenido de humedad del agregado fino	5.86	%
Contenido de humedad del agregado grueso	2.54	%
Absorción del AF	1.55	%
Absorción del AG	2.67	%
Módulo de finura agregado fino	2.88	
Peso seco compactado del agregado fino	1772.34	Kg/m ³
Peso seco compactado del agregado grueso	1486.74	Kg/m ³
Tamaño máximo nominal del agregado grueso	3/4"	
Peso específico del cemento	3.15	g/cm ³

Nota. Fuente: Elaboración propia del autor, 2023

Tabla 2
Cantidad de materiales para 18 testigos cilíndricos con muestra patrón

Cemento	39.59	Kg
Agua efectiva	18.15	l
AF	100.22	Kg
AG	100.61	Kg

Nota. Esta tabla muestra la cantidad de mezcla con 13% de desperdicio.

Tabla 3
Cantidad de materiales para 18 testigos cilíndricos con 9% de VM

Porcentaje 9%		
Cemento	36.02	Kg
Vidrio	3.24	Kg
Agua	18.15	l
Af	100.22	Kg
Ag	100.61	Kg

Nota. Esta tabla muestra la cantidad de mezcla con 13% de desperdicio.

Tabla 4
Cantidad de materiales para 18 testigos cilíndricos con 11% de VM

Porcentaje 11%		
Cemento	35.23	Kg

Vidrio	3.88	Kg
Agua	18.15	l
Af	100.22	Kg
Ag	100.61	Kg

Nota. Esta tabla muestra la cantidad de mezcla con 13% de desperdicio.

Tabla 5
Cantidad de materiales para 18 testigos cilíndricos con 22% de VM

Porcentaje 22%		
Cemento	30.88	Kg
Vidrio	6.79	Kg
Agua	18.15	l
Af	100.22	Kg
Ag	100.61	Kg

Nota. Esta tabla muestra la cantidad de mezcla con 13% de desperdicio.

Tabla 6
Registro de la resistencia a la compresión axial de testigos patrón a los 7, 14 y 28 días

Código	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Fuerza última (Kg)	f _c (kg/cm ²)	Promedio f _c	Tipo de Falla
P01PR-07	179.91	5486.35	32117.00	178.52		3
P02PR-07	181.82	5553.59	31588.00	173.74		3
P03PR-07	173.55	5231.61	32038.00	184.61	176.10	2
P04PR-07	175.66	5278.46	31452.00	179.05		5
P05PR-07	183.25	5606.64	31700.00	172.98		5
P06PR-07	186.87	5730.38	31337.00	167.69		3
P07PR-14	181.70	5551.76	37234.00	204.92		5
P08PR-14	187.72	5676.63	36726.00	195.64		3
P09PR-14	186.51	5765.86	36785.00	197.23	202.96	2
P10PR-14	176.60	5289.07	37187.00	210.58		3
P11PR-14	182.30	5621.98	37822.00	207.48		5
P12PR-14	175.66	5275.82	35471.00	201.93		5
P13PR-28	188.33	5805.18	39753.00	211.09		3
P14PR-28	172.50	5197.39	39491.00	228.93		3
P15PR-28	173.90	5222.17	38786.00	223.04	217.77	3
P16PR-28	173.90	5175.22	37752.00	217.09		2
P17PR-28	174.60	5159.44	38147.00	218.48		5

P18PR-28	188.21	5804.25	39143.00	207.98		2
----------	--------	---------	----------	--------	--	---

Nota. Fuente: Elaboración propia del autor, 2023

Tabla 7
Registro de la resistencia a la compresión axial de testigos 9% de VM

Código	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Fuerza última (Kg)	f _c (kg/cm ²)	Promedio f _c	Tipo de Falla
P01PR-07	181.94	5476.28	29746.00	163.50		2
P02PR-07	180.62	5484.64	28883.00	159.91		5
P03PR-07	176.48	5358.79	25022.00	141.78	146.57	5
P04PR-07	174.37	5196.99	23215.00	133.14		5
P05PR-07	177.89	5347.51	24575.00	138.14		5
P06PR-07	176.36	5263.50	25211.00	142.95		2
P07PR-14	179.79	5419.80	34907.00	194.15		5
P08PR-14	178.96	5413.54	34581.00	193.23		2
P09PR-14	180.27	5414.31	40554.00	224.97	208.74	2
P10PR-14	185.90	5586.37	41822.00	224.97		2
P11PR-14	178.37	5501.75	35472.00	198.87		2
P12PR-14	187.23	5644.17	40487.00	216.24		2
P13PR-28	183.01	5501.39	47247.00	258.16		3
P14PR-28	176.60	5371.19	42448.00	240.37		5
P15PR-28	179.91	5430.58	50968.00	283.30	263.17	5
P16PR-28	180.74	5462.05	49582.00	274.32		2
P17PR-28	176.60	5259.94	49475.00	280.16		5
P18PR-28	177.89	5390.21	43178.00	242.72		2

Nota. Fuente: Elaboración propia del autor, 2023

Tabla 8
Registro de la resistencia a la compresión axial de testigos 11% de VM

Código	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Fuerza última (Kg)	f _c (kg/cm ²)	Promedio f _c	Tipo de Falla
P01PR-07	181.70	5493.62	30589.00	168.35		5
P02PR-07	175.54	5240.70	28956.00	164.96		5
P03PR-07	175.07	5187.30	30099.00	171.93	169.95	5
P04PR-07	176.36	5240.58	31851.00	180.60		5
P05PR-07	176.48	5281.14	30148.00	170.83		5
P06PR-07	177.78	5306.63	28987.00	163.05		5
P07PR-14	185.54	5587.54	54532.00	293.91		2
P08PR-14	175.07	5219.69	44423.00	253.75		5
P09PR-14	179.67	5440.47	46907.00	261.07	247.90	5
P10PR-14	174.72	5177.75	39552.00	226.38		2
P11PR-14	185.54	5478.07	41457.00	223.44		2
P12PR-14	178.01	5325.25	40736.00	228.84		2
P13PR-28	180.39	5412.47	54701.00	303.24	312.64	5

P14PR-28	185.30	5603.43	54547.00	294.37	2
P15PR-28	174.83	5209.20	58166.00	332.69	2
P16PR-28	178.72	5420.67	55995.00	313.31	1
P17PR-28	177.07	5281.06	54684.00	308.83	2
P18PR-28	167.53	5018.37	54178.00	323.39	2

Nota. Fuente: Elaboración propia del autor, 2023

Tabla 9
Registro de la resistencia a la compresión axial de testigos 22% de VM

Código	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Fuerza última (Kg)	f _c (kg/cm ²)	Promedio f _c	Tipo de Falla
P01PR-07	182.89	5508.76	28126.00	153.78		5
P02PR-07	187.48	5672.10	16354.00	87.23		5
P03PR-07	175.19	5210.04	23792.00	135.81	127.16	2
P04PR-07	174.02	5152.59	21166.00	121.63		2
P05PR-07	175.54	5285.46	22478.00	128.05		2
P06PR-07	174.02	5200.45	23740.00	136.42		5
P07PR-14	177.89	5337.73	42592.00	239.42		5
P08PR-14	186.27	5617.75	44742.00	240.21		5
P09PR-14	175.66	5236.30	36249.00	206.36	216.16	2
P10PR-14	174.48	5162.09	41495.00	237.82		5
P11PR-14	175.30	5259.11	32916.00	187.77		5
P12PR-14	174.95	5237.18	32438.00	185.41		2
P13PR-28	185.30	5616.40	51316.00	276.94		2
P14PR-28	186.39	5599.97	49030.00	263.06		3
P15PR-28	185.66	5657.08	57336.00	308.82	282.93	2
P16PR-28	180.39	5453.96	51284.00	284.30		2
P17PR-28	176.71	5241.35	49147.00	278.12		2
P18PR-28	183.25	5470.12	52472.00	286.34		2

Nota. Fuente: Elaboración propia del autor, 2023

Tabla 10
Medidas descriptivas de grupo control y experimentales de resistencia a la compresión a los 7 días

	Patrón - 7 días	9% - 7 días	11% - 7 días	22% - 7 días
N	6	6	6	6
Media	176	147	170	127
Desviación estándar	5.88	12.3	6.22	22.3
Coefficiente de variación	3.34 %	8.37 %	3.66 %	17.56 %

Nota. Fuente: Elaboración propia del autor, 2023

Tabla 11
Prueba de normalidad de resistencia a la compresión a los 7 días.

--	--	--	--	--

	N	Media	DE	Shapiro-Wilk	
				W	p
Patrón - 7 días	6	176	5.88	0.978	0.939
9% - 7 días	6	147	12.26	0.881	0.272
11% - 7 días	6	170	6.22	0.938	0.641
22% - 7 días	6	127	22.34	0.909	0.431

Nota. En la tabla los datos cumplieron con la prueba de normalidad de Shapiro – Wilk donde $p > 0.05$, por ende, se utiliza la técnica estadística paramétrica de ANOVA.

Tabla 12
Anova de resistencia a la compresión a los 7 días.

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p
Entre grupos	9091	3	3030	16.8	<.001
Dentro de grupos	3613	20	181		

Nota. En la tabla la significancia estadística (p) es < 0.05 ; entonces existe diferencia significativa en por lo menos dos de los grupos de mezcla analizados. Ahora se analiza el grupo patrón con cada grupo experimental para comparar sus diferencias según la prueba de Tukey.

Tabla 13
Prueba de comparaciones múltiples TUKEY de la resistencia a la compresión a 7 días.

Comparación	Grupo Patrón (I)	Grupos Experimentales (J)	Diferencia de Medias (I-J)	EE	gl	p _{Tukey}
		9%	29.53	7.76	20.0	0.006
CP		11%	6.15	7.76	20.0	0.857
		22%	48.95	7.76	20.0	<.001

Nota. En la tabla se puede apreciar que existen diferencias MUY significativas ($p < 0.01$) entre el grupo de concreto patrón y los grupos experimentales (9% y 22%)

Tabla 14
Medidas descriptivas de grupo control y experimentales de resistencia a la compresión a los 14 días

	Patrón - 14 días	9% - 14 días	11% - 14 días	22% - 14 días
N	6	6	6	6
Media	203	209	248	216
Desviación estándar	5.83	15.1	27.4	26.2
Coefficiente de variación	2.87 %	7.22 %	11.05 %	12.13 %

Patrón - 14 días	9% - 14 días	11% - 14 días	22% - 14 días
------------------	--------------	---------------	---------------

Nota. Fuente: Elaboración propia del autor, 2023

Tabla 15
Prueba de normalidad de resistencia a la compresión a los 14 días.

	N	Media	DE	Shapiro-Wilk	
				W	p
Patrón - 14 días	6	203	5.83	0.957	0.795
9% - 14 días	6	209	15.06	0.825	0.098
11% - 14 días	6	248	27.38	0.874	0.243
22% - 14 días	6	216	26.22	0.802	0.062

Nota. En la tabla los datos cumplieron con la prueba de normalidad de Shapiro – Wilk donde $p > 0.05$, por ende, se utiliza la técnica estadística paramétrica de ANOVA.

Tabla 16
Anova de resistencia a la compresión a los 14 días.

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p
Entre grupos	7234	3	2411	5.68	0.006
Dentro de grupos	8489	20	424		

Nota. En la tabla la significancia estadística (p) es < 0.05 ; entonces existe diferencia significativa en por lo menos dos de los grupos de mezcla analizados. Ahora se analiza el grupo patrón con cada grupo experimental para comparar sus diferencias según la prueba de Tukey.

Tabla 17
Prueba de comparaciones múltiples TUKEY de la resistencia a la compresión a 14 días

Comparación					
Grupo Patrón (I)	Grupos experimentales (J)	Diferencia de Medias (I-J)	EE	gl	P _{Tukey}
	9%	-5.77	11.9	20.0	0.961
CP	11%	-44.93	11.9	20.0	0.006
	22%	-13.20	11.9	20.0	0.688

Nota. En la tabla se puede apreciar que existen diferencia MUY significativa ($p < 0.01$) entre el grupo de concreto patrón y el grupo experimental 11%.

Tabla 18
Medidas descriptivas de grupo control y experimentales de resistencia a la compresión a los 28 días

	Patrón - 28 días	9% - 28 días	11% - 28 días	22% - 28 días
N	6	6	6	6
Media	218	263	313	283
Desviación estándar	7.66	18.9	13.8	15.1
Coefficiente de variación	3.51 %	7.19 %	4.41 %	5.34 %

Nota. Fuente: Elaboración propia del autor, 2023

Tabla 19
Prueba de normalidad de resistencia a la compresión a los 28 días.

	N	Media	DE	Shapiro-Wilk	
				W	p
Patrón - 28 días	6	218	7.66	0.978	0.940
9% - 28 días	6	263	18.88	0.878	0.258
11% - 28 días	6	313	13.82	0.987	0.979
22% - 28 días	6	283	15.08	0.935	0.616

Nota. En la tabla los datos cumplieron con la prueba de normalidad de Shapiro – Wilk donde $p > 0.05$, por ende, se utiliza la técnica estadística paramétrica de ANOVA.

Tabla 20
Anova de resistencia a la compresión a los 28 días.

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p
Entre grupos	28542	3	9514	45.7	<.001
Dentro de grupos	4167	20	208		

Nota. En la tabla la significancia estadística (p) es < 0.05 ; entonces existe diferencia significativa en por lo menos dos de los grupos de mezcla analizados. Ahora se analiza el grupo patrón con cada grupo experimental para comparar sus diferencias según la prueba de Tukey.

Tabla 21
Prueba de comparaciones múltiples TUKEY de la resistencia a la compresión a 28 días

Comparación					
Grupo Patrón (I)	Grupos experimentales (J)	Diferencia de Medias (I-J)	EE	gl	P _{Tukey}
CP	9%	-45.4	8.33	20.0	<.001
	11%	-94.9	8.33	20.0	<.001
	22%	-65.2	8.33	20.0	<.001

Nota. En la tabla se puede apreciar que existen diferencias MUY significativas ($p < 0.01$) entre el grupo de concreto patrón y los grupos experimentales (9%, 11% y 22%).

Finalmente, los resultados estadísticos muestran que el reemplazo de 9%, 11% y 22% por vidrio molido tienen diferencias MUY significativas en comparación con el concreto patrón $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ al periodo de 28 días. Lo que nos da un mayor incremento en la resistencia a la compresión.

Tabla 22
Resumen de costos de las mezclas evaluadas

Código	Precio por m ³ de concreto (S/.)	Diferencia de costo (S/.)
Concreto Patrón	492.24	
Concreto con reemplazo del 9%	484.53	7.71
Concreto con reemplazo del 11%	482.99	9.25
Concreto con reemplazo del 22%	473.73	18.51

Nota. En la tabla se presenta la variación de costos respecto al concreto patrón $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ en el cual los 3 porcentajes estudiados reducen su costo, siendo el reemplazo de cemento en 22% por vidrio molido el más beneficiado económicamente.

Tabla 23
Impacto económico aplicado en un caso real

Unidades	Cantidad	Precio por m ³ de concreto (S/.)	Precio Total concreto (S/.)	Ahorro (S/.)
m ³	47.30	492.24	23282.99	-
		484.53	22918.32	364.67
		482.99	22845.30	437.69
		473.73	22407.62	875.37

Nota. En la tabla 23 se presenta la aplicación en una obra de creación de una Institución Educativa Inicial en el cual se utilizó un total de 47.30 m³ de concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ para un área total de 870 m².

Discusión

Las propiedades relacionadas con el tamaño de partículas tanto del agregado grueso como del agregado fino satisfacen los requisitos mínimos establecidos por la normativa, lo que demuestra que la distribución de tamaño de partículas se encuentra dentro de los límites adecuados.

El diseño de la mezcla de concreto se realizó de acuerdo con los criterios establecidos por el comité ACI 211.

El slump de concreto patrón es de 3.69 pulgadas, siendo diseñado para 3-4 pulgadas. Lo cual corresponde a una consistencia plástica.

El slump de concreto con el reemplazo de 9%, 11% y 22% de vidrio molido son 3.38, 3.44 y 3.63 pulgadas respectivamente, todas las mediciones fueron de una consistencia plástica por lo tanto el concreto cumple con una buena trabajabilidad.

Con respecto a la interpretación de resultados comparativos, en la investigación de [3], realizó su estudio con 36 probetas cilíndricas de dimensiones 10 cm x 20 cm con porcentajes de 5%, 10% y 15%, a la edad de 28 días de curado el porcentaje que alcanzó mayor resistencia fue del 10% con 201.02 Kg/cm², su estudio finalizó a la edad de 56 días de curado que sirvió para una mejor data de la evolución de la resistencia, siendo así el 5% el mejor porcentaje ya que alcanzó una resistencia de 258.47 Kg/cm², en comparación con la presente investigación a la edad de 28 días de curado el 11% de reemplazo de cemento fue el óptimo con una resistencia de 312.64 Kg/cm² incrementando en un 48.88% la resistencia base de 210 Kg/cm².

La investigación de [4], en este estudio la muestra fue de 48 testigos cilíndricos de dimensiones 4" x 8", con porcentajes de 5%, 10% y 15%. A los 28 días de curado el porcentaje que mayor resistencia alcanzó fue del 5% de reemplazo obteniendo 267.17 Kg/cm², mientras que a los 56 días de curado fue del 10% de reemplazo obteniendo 277.43 Kg/cm², en comparación con esta investigación se puede deducir que el porcentaje óptimo para el diseño de mezcla está entre 10% y 11% de reemplazo de cemento, ya que con este porcentaje se obtuvo el mayor incremento de la resistencia de las 3 muestras (9%, 11% y 22%).

En la investigación de [5], la muestra fue de 64 probetas cilíndricas reemplazando en 5%, 10% y 15% del cemento Portland, a los 28 días de curado el mayor porcentaje de resistencia obtenida fue del 5% de reemplazo de cemento obteniendo 325.19 Kg/cm² y en segundo lugar el 10% de reemplazo con 310.67 Kg/cm². En comparación de los resultados con esta investigación el 11% y 22% de reemplazo son lo más favorable para un diseño de mezcla ya que alcanzó 148.88% y 134.73% respectivamente de resistencia a la compresión promedio.

En la investigación de [6], la muestra fue de 36 probetas cilíndricas de dimensiones 4" x 8" con porcentajes de reemplazo del 20%, 25% y 30% para una resistencia base de 210 Kg/cm² utilizando el cemento Portland, a la edad de 28 días de curado el 25% obtuvo 256.995 Kg/cm², siendo el porcentaje óptimo para su estudio. En comparación con la presente investigación no se llega a la misma conclusión ya que con 22% de reemplazo obtuvimos de resistencia a la

compresión 282.93 Kg/cm², un 10% de incremento respecto al estudio de Fajardo y Lopez.

La investigación de [7], la muestra fue de 120 testigos cilíndricos con dimensiones de 10 cm x 20 cm reemplazando en 4%, 6% y 8% del cemento Portland, a los 28 días de curado el mayor porcentaje de resistencia obtenida fue del 8% de reemplazo de cemento obteniendo 304.39 Kg/cm². En contraste con el estudio actual, se observa que al aumentar la proporción de vidrio en relación con el peso del cemento resulta en un aumento de la resistencia a la compresión.

Como implicancia el uso de vidrio molido como reemplazo parcial del cemento representa un enfoque novedoso dentro de las investigaciones sobre materiales de construcción sostenibles, en el cual adaptamos el método existente que representa a la muestra patrón, partiendo de ello, exploramos diferentes proporciones de reemplazo (9%, 11% y 22%), midiendo como afecta a la resistencia a la compresión axial. Los resultados positivos nos ayudaron a determinar los límites en los que es seguro y eficaz la utilización de vidrio molido para que de esta manera no comprometamos la integridad estructural del concreto. El análisis de varianza empleado para comparar los resultados de las diferentes mezclas, desviación estándar y los intervalos de confianza, nos permitieron validar la diferencia estadísticamente significativa en base a la resistencia a la compresión axial.

La reducción de costos presentada en la tabla 23 justifica el uso del vidrio, debido a que es un material muy común en la vida cotidiana, sumado al bajo precio por kilogramo de producción (S/. 0.58).

Se recomienda la búsqueda o fabricación local de una máquina trituradora de vidrio estandarizada para optimizar el tiempo y la correcta uniformidad de partículas del material. Para futuras investigaciones se podría realizar ensayos del concreto con vidrio molido y adicionar aditivos, verificando su comportamiento mediante la resistencia a compresión axial a la edad de 3, 7, 14, 28 y 56 días.

IV. CONCLUSIONES

A los 28 días de curado del concreto patrón se obtuvo como promedio de todos los testigos el valor de 217.77 kg/cm², el concreto que fue con reemplazo del 9% de vidrio molido con 263.17 kg/cm², el concreto que fue con reemplazo del 11% de vidrio molido con 312.64 kg/cm² y finalmente el concreto con reemplazo del 22% de vidrio molido con 282.93 kg/cm².

Según los datos adquiridos a la edad de 28 días de resistencia a compresión se concluye que conforme vayamos aumentando el porcentaje de reemplazo de vidrio molido, la resistencia tiene una tendencia a reducir su resistencia. Es así

como el porcentaje óptimo para la presente investigación es del reemplazo del cemento en un 11%. Por lo tanto, el vidrio contribuye como un reemplazo parcial del cemento, más no en su totalidad.

La hipótesis planteada en la presente investigación supera el 15%, debido a que con el porcentaje óptimo del 11% de reemplazo se obtuvo un incremento del 48.88%.

El análisis estadístico de los datos de resistencia a compresión axial a los 28 días tiene una diferencia MUY significativa entre el grupo de concreto patrón y los grupos experimentales debido a que el p-valor presenta resultados que son estadísticamente significativos y no es probable que se deban al azar.

El análisis de costos para el concreto patrón es de 492.24 soles, con el reemplazo del 9% de vidrio molido es de 484.53 soles, con el reemplazo del 11% de vidrio molido es de 482.99 soles y finalmente el más beneficiado económicamente el reemplazo del 22% cuesta 473.73 soles.

REFERENCIAS

- [1] Fundación Integra. (2021). Cultura material medieval—El Vidrio—Región de Murcia Digital. https://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=c,522,m,2613&r=ReP-20327-DETALLE_REPORTAJES.
- [2] MINAM. (2023). Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales 2023. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5588186/4963255-peru-anuario-de-estadisticas-ambientales-2023%282%29.pdf?v=1706036917>.
- [3] Mera, S. M. A., Soledispa, A. G. V., Párraga, W. E. R., Hernández, E. H. O., & Castro, C. M. J. (2019). Estudio de la resistencia a compresión del hormigón utilizando el vidrio finamente molido en reemplazo parcial del cemento. *Revista de Investigaciones en Energía Medio Ambiente y Tecnología RIEMAT* ISSN 2588-0721, 4(2), Article 2. <https://doi.org/10.33936/riemat.v4i2.2187>.
- [4] Ramón Quiroz, I. L., & Aguirre Oré, R. D. M. (2021). Análisis de la permeabilidad en el concreto, con adiciones de vidrio reciclado molido en reemplazo parcial del cemento en Lima Metropolitana. *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/660654>.
- [5] Walhoff Tello, G. M. (2017). INFLUENCIA DEL VIDRIO MOLIDO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DEL CONCRETO Y COSTOS DE FABRICACIÓN, COMPARADO CON EL CONCRETO CONVENCIONAL, BARRANCA-2016 [Universidad nacional "Santiago Antúnez de Mayolo"]. https://repositorio.unasam.edu.pe/bitstream/handle/UNASAM/2120/T033_46910453_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [6] Fajardo Castro, C. R., & Lopez Huaycho, S. (2022). Elaboración de bloques de concreto f'c 75 kg/cm² adicionando polvo de vidrio de colores reciclado para reducir la emisión de CO₂ generado por la producción de cemento [Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)]. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/660938>.
- [7] Vasquez Silva, Y. F., & Girón Gavidia, Y. C. (2019). Análisis de la Resistencia del Concreto con Adición de Vidrio Pulverizado [Universidad Nacional de Jaén]. <http://repositorio.unj.edu.pe/jspui/handle/UNJ/244>.