

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I

1 Introducción

1.1 Problema

1.1.1 Planteamiento del Problema

La contaminación de los ríos en la actualidad ha resultado cada vez más perjudicial para el ecosistema dado el mal aprovechamiento de los recursos naturales, provocando la contaminación de los ríos por lo tanto de aguas subterráneas y aguas superficiales.

Para reducir el impacto ambiental en los ríos por la extracción de materia prima como ser los agregados que se utiliza en la industria del hormigón, se han desarrollado investigaciones para un aprovechamiento del uso de materiales de desecho en lugar de recursos naturales para hacer que la industria del hormigón sea más sostenible, en términos de proteger el medio ambiente y reducir el costo del hormigón.

Especialmente mediante el uso de material reciclado como agregado para la elaboración del hormigón, principalmente el uso de desechos de vidrio en general, neumáticos, plásticos y desechos de hormigón, entre otros.

Uno de los elementos investigados es el vidrio, como reemplazo parcial de agregado fino. Actualmente, se viene generando una enorme cantidad de residuos de vidrio en todo el mundo. De acuerdo con el ministerio de medio ambiente y agua el cual realizó el Diagnóstico de la gestión de residuos sólidos en Bolivia en el año 2011, en la ciudad de Tarija se recolecta anualmente 33.974 Ton de residuos sólidos de los cuales aproximadamente el 2% son residuos de vidrio que es igual a 680 Ton.

De acuerdo los datos proporcionados por la EMAT (Entidad Descentralizada de Aseo Urbano Municipal de Tarija) sobre la recolección diferenciada de vidrio que se brinda en los barrios, El Molino y El Carmen en el marco del proyecto específico BASURA CERO de la gestión 2022, del cual se tiene una generación de residuos de vidrio ver tabla 1.

Tabla 1.

Cantidad de vidrio por mes de los barrios Molino y Carmen de la ciudad de Tarija.

Mes	Cantidad de vidrio (kg)
Enero	553.60
Febrero	1266.70
Marzo	495.20
Abril	345.50
Mayo	219.20
Junio	297.60
Julio	223.10
Agosto	228.10
Total	3628.00

Fuente: Adaptado de Entidad Descentralizada de Aseo Urbano Municipal de Tarija (EMAT).

Los residuos de vidrio suponen una parte importante de los residuos urbanos en estos barrios e incrementan su peso mensual. Su reciclado permite ahorrar recursos naturales y reducir el vertido en vertedero, en línea con los objetivos de economía circular.

El proyecto "Basura Cero" de la EMAT contempla medidas para minimizar los residuos e impulsar su valorización material o energética. La recogida diferenciada de vidrio en estos barrios es un primer paso positivo en esta dirección que debe consolidarse y ampliarse a más zonas.

Si el agregado fino es reemplazado por vidrio de desecho en un porcentaje específico y en un rango de tamaño específico, disminuiría el uso del agregado fino y, por lo tanto, reduciría los efectos nocivos de la degradación de los ríos, haciendo que la industria manufacturera del

hormigón sea sostenible, sin embargo, para ello se deben llevar a cabo ensayos de laboratorio de prueben que el reemplazo es viable.

1.1.2 Formulación del Problema

¿Cuál será el comportamiento de la resistencia a la compresión del hormigón $f'c = 25 \text{ N/mm}^2$ con adición de vidrio reciclado molido frente a fuerzas de compresión?

1.1.3 Sistematización del Problema

¿Cómo influirá la utilización en la resistencia del hormigón el uso de vidrio reciclado?

¿Cuáles son los usos que se le da al vidrio reciclado en la actualidad?

Ver anexo 2 matriz.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Determinar la resistencia a la compresión del hormigón $f'c = 25 \text{ N/mm}^2$, al emplear vidrio molido reciclado como sustituto parcial del agregado fino en distintos porcentajes.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Implementar una metodología para la recolección y procesamiento de desechos de vidrio de manera que puedan utilizarse satisfactoriamente en la investigación.
- Realizar los ensayos para la caracterización de los agregados fino y grueso según la norma ASTM que son requeridos por el método ACI 211.1 para la dosificación.
- Diseñar la mezcla según el método ACI 211.1 para un hormigón patrón con una resistencia a la compresión de $f'c = 25 \text{ N/mm}^2$.
- Diseñar la mezcla según el método ACI 211.1 para un hormigón con una resistencia a la compresión de 25 N/mm^2 , reemplazando el agregado fino con el 10%, 20%, 30% y 40% de vidrio reciclado molido.
- Determinar la resistencia a la compresión del hormigón de referencia después de 14, 21 y 28 días de curado.

- Evaluar la resistencia a la compresión de mezclas de hormigón con diferentes porcentajes de vidrio reciclado molido 10%, 20%, 30% y 40% después de 14, 21 y 28 días de curado.
- Comparar la resistencia a la compresión de los hormigones con la adición de vidrio reciclado molido en diferentes proporciones 10%, 20%, 30% y 40%, con la mezcla de control como referencia.

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación Teórica

Este trabajo de investigación está enfocado en elaborar probetas de hormigón teniendo como agregado parcial el vidrio que es un material que independientemente de la cantidad de veces que se reutilice mantiene el 100% de las propiedades, el cual lo hace un material idóneo para el reciclaje así pudiendo disminuir la explotación de los recursos no renovables reduciendo el uso de los bancos de arena natural, los cuales se encuentran en un punto crítico debido a su alta demanda y explotación, de este modo se puede considerar al vidrio como una alternativa sustentable a la elaboración del hormigón con características adecuadas de resistencia mecánica y trabajabilidad, esto porque el vidrio está constituido principalmente de sílice (arena).

Según la revisión de antecedentes, se han realizado estudios previos sustituyendo diferentes porcentajes de vidrio reciclado molido en reemplazo parcial de arena en el hormigón, variando entre 10% y 40%. En algunos de estos estudios, se han obtenido resultados favorables al utilizar un 20% de vidrio como sustituto, mientras que, en otros, como el proyecto "Análisis de la Resistencia a la Compresión del Hormigón al Emplear Vidrio Reciclado Molido en Reemplazo Parcial del Agregado Fino", desarrollado por Peñafiel en 2016. El cual encontró que con un 40% de vidrio en reemplazo de arena, se lograban mayores resistencias a compresión. Por esta razón, para la presente investigación se determinaron los porcentajes de sustitución de 10%, 20%, 30% y 40%. Esto permitirá evaluar el rango completo de proporciones reportadas favorables y determinar cuál produce mejor desempeño en lo que respecta a resistencia, trabajabilidad y costos.

Por lo tanto, esta investigación se enfoca en el reciclaje de botellas de vidrio y aportará al conocimiento del análisis a la compresión del hormigón $f'c = 25 \text{ N/mm}^2$ con sustituto parcial de vidrio en 10, 20, 30 y 40% de vidrio reciclado molido, en reemplazo del agregado fino, a los 7, 14 y 28 días de curado.

1.3.2 Justificación Metodológica

Este estudio se centrará en el vidrio reciclado como reemplazo parcial del agregado fino en estructuras de concreto, agregando diferentes proporciones de vidrio reciclado triturado como remplazo a la arena y distintos tiempos específicos en los que se podrían recopilar datos para determinar el concreto $f'c = 25 \text{ N/mm}^2$ para analizar la resistencia a la compresión. Para el análisis de agregados se utiliza la norma ASTM C 33 y para la dosificación del hormigón se utiliza el método ACI 211.1.

1.3.3 Justificación Practica

Este proyecto investigará un nuevo material (vidrio molido) para utilizarlo en remplazo parcial de la arena, así buscando un material idóneo para realizar el hormigón y que cumplan con la resistencia a compresión. Igualmente buscamos la reducción del uso de los bancos de arena natural, los cuales se encuentran en un punto crítico debido a su alta demanda y explotación así reduciendo la contaminación de las aguas subterráneas y aguas superficiales y también disminuyendo el costo de los materiales porque se utiliza un material reciclado que es el vidrio.

1.3.4 Justificación Social

Esta investigación ayudará a reducir el uso de los bancos de arena natural, los cuales se encuentran en un punto crítico debido a su alta demanda y explotación así reduciendo la contaminación de las aguas subterráneas y aguas superficiales.

También ayudará a reducir el volumen de residuos en los vertederos, al reciclar 3 botellas de vidrio se evita depositar 1 kg de basura en los vertederos, estas botellas de vidrio tardan alrededor de 4000 años en biodegradarse por lo cual es un impacto muy grande para el planeta por este motivo debe reciclarse y disminuir el desecho de los vidrios.

1.4 Alcance del Estudio

1.4.1 Tipo de Estudio

Los estudios realizados son de carácter exploratorio ya que tienen como objetivo conocer el comportamiento del hormigón simple con materiales reciclados como el vidrio y comprobar los cambios que se pueden producir en las propiedades del hormigón en estado curado. La investigación se considera cuantitativa, porque se recopila y analiza los datos para probar la hipótesis, y se debe evaluar el comportamiento de las probetas con vidrio y observar si cumplen con los parámetros permitidos por la norma considerada.

1.4.2 Variables

1.4.2.1 Variable Independiente

Vidrio molido como sustituto parcial del agregado fino.

Distintos porcentajes de vidrio molido.

- 10% de vidrio molido como sustituto parcial del agregado fino.
- 20% de vidrio molido como sustituto parcial del agregado fino.
- 30% de vidrio molido como sustituto parcial del agregado fino.
- 40% de vidrio molido como sustituto parcial del agregado fino.

1.4.2.2 Variable Dependiente

Resistencia a compresión

Tabla 2.

Operación de las variables.

Variables		Definición conceptual	Indicadores	Índices
Variable Independiente	% Vidrio	El vidrio es un material sólido que se obtienen por enfriamiento rápido de una masa fundida, impidiendo su cristalización.	Vidrio 10% en peso	kg
			Vidrio 20% en peso	kg
			Vidrio 30% en peso	kg
			Vidrio 40% en peso	kg
Variable dependiente	Resistencia a Compresión	Es la capacidad que tienen los materiales para soportar una carga de aplastamiento en determinada unidad de área.	Resistencia a compresión con los distintos porcentajes.	N/mm ²

Fuente: Elaboración propia.

1.4.3 Hipótesis

El hormigón con adición de vidrio molido como agregado fino en diferentes porcentajes tendrá un incremento de 2% al 20% de la resistencia a compresión con respecto al hormigón de control.

1.4.4 Restricciones

- En este proyecto de investigación se desarrollará ensayos a compresión del hormigón con $f'c = 25 \text{ N/mm}^2$.

- La investigación se realizará variando únicamente la cantidad de vidrio molido como agregado fino en porcentajes de 10%,20%, 30%,40% del peso necesario de la arena, considerando constante los demás componentes.
- El vidrio triturado proviene únicamente de botellas recolectadas de bares, restaurantes, y lugares concurridos donde desechan las botellas de vidrio.

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II

2 Marco Teórico

2.1 Fundamento Teórico

2.1.1 Hormigón

El hormigón es un material semejante a la piedra que se obtiene mediante una mezcla cuidadosamente proporcionada de cemento, agua, arena y grava u otro agregado; después, esta mezcla se endurece en formaletas con la forma y dimensiones deseadas. El cemento y el agua interactúan químicamente para unir las partículas de agregado y conformar una masa sólida. Su resistencia a la compresión es similar a la de las piedras naturales, es alta lo que lo hace apropiado para elementos sometidos principalmente a compresión, tales como columnas o arcos. (Nilson , 2001).

2.1.2 Componentes del Hormigón

Cemento

Es un material que tiene propiedades de adhesión y cohesión necesarias para unir agregados inertes y conformar una masa sólida de resistencia y durabilidad adecuadas. Para la fabricación del hormigón estructural se utilizan exclusivamente los llamados **cementos hidráulicos**.

Para completar el proceso químico (hidratación) mediante el cual el polvo de cemento fragua y endurece para convertirse en una masa sólida se requiere la adición de agua. (Nilson , 2001).

Cal combinada	CaO	62.5%
Sílice	SiO ₂	21 %
Alúmina	Al ₂ O ₃	6.5 %
Hierro	Fe ₂ O ₃	2.5 %
Azufre	SO ₃	3 %
Cal libre	CaO	0 %
Magnesia	MgO	2 %

Perdida de fuego P. F.	2	%
Residuo insoluble R. I.	1	%
Álcali $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	0.5	%

Los Componentes de los Cementos:

Clinkere Portland: Se obtienen al calcinar hasta fusión parcial mezclas muy íntimas de calizas y arcillas, preparadas artificialmente hasta una combinación prácticamente total de sus componentes.

Clinkeres aluminosos: Se obtiene por fusión de calizas y bauxitas en unas condiciones tales con el contenido mínimo de alúmina sean del 36%.

Escorias siderúrgicas (S) obtenidas mediante templado de ganga fundida procedente de procesos siderúrgicos.

Puzolanas naturales (P), cenizas volantes (V), humo de sílice (D)

Filleres calizoz (L), compuestos de carbonato cálcico de molido junto con Clinker Portland, mejoran las propiedades y comportamiento de los morteros y hormigones, tanto frescos como una vez endurecidos: dispersión, hidratación, trabajabilidad, retención de agua, capilaridad, retracción, figuración. (Varona Moya, Lopez Juarez, & Bañón Blázquez, 2012).

Cementos Portland

Con esta denominación existen tres tipos:

Cementos Portland, tipo I

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: clínker Portland en proporción no menor del 95% en masa y de cualquiera de los componentes adicionales definidos en esta norma, o mezclas de ellos, en proporción no mayor del 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que deberá añadirse al mismo con la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos

Cementos Portland con puzolana, tipo IP

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: clinker Portland en proporción no menor del 70% ni mayor del 94% en masa, de puzolana natural en proporción no menor del 6% ni mayor del 30% en masa y de otros de los componentes adicionales definidos en esta norma, en proporción comprendida entre el 0% y el 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que deberá añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos.

Cementos Portland con filler calizo, tipo IF

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: clinker Portland en proporción no menor del 80% ni mayor del 94% en masa, filler calizo en proporción no menor del 6% ni mayor del 15% en masa y de otros de los componentes adicionales definidos en esta misma norma, en proporción comprendida entre el 0% y el 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que deberá añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos.

Cementos puzolánicos, tipo P

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: clinker Portland en proporción no menor del 60% en masa, de puzolanas naturales, cenizas volantes u otros materiales puzolánicos en proporción total no mayor del 40% en masa y de otros de los constituyentes definidos en esta norma, en proporción total no mayor del 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que deberá añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos.

Estos cementos deberán cumplir con el ensayo de puzolanicidad, de acuerdo con la norma NB 642-95. (Norma Boliviana NB 011-Cemento, 1995).

Tabla 3.*Clasificación y composición de los cementos.*

Tipos de cemento			Proporción en masa % (1)			
			Componentes principales			Componentes adicionales (2) (3)
Denominación	Designación	Tipo	Clinker	Puzolana Natural	Filler Calizo (3)	
Cemento Portland	Cemento Portland	I	95 a 100			0 a 5
	Cemento Portland con puzolana	IP	70 a 94	6 a 30	-	0 a 5
	Cemento Portland con filler calizo	IF	80 a 94	-	6 a 15	0 a 5
Cemento puzolánico		P	≥ 60	≤ 40	-	0 a 5

Fuente: (Norma Boliviana NB 011-Cemento, 1995).

Agregados

Para hormigones estructurales comunes, los agregados ocupan aproximadamente entre el 70 y el 75 por ciento del volumen de la masa endurecida. El resto está conformado por la pasta de cemento endurecida, agua no combinada (es decir, agua no utilizada en la hidratación del cemento) y vacíos de aire. Evidentemente, los últimos dos no contribuyen a la resistencia del hormigón.

Agregados Finos.

Características Generales

El agregado fino consistirá de arena natural, arena manufacturada o una combinación de ambas siendo la mayoría de sus partículas menores que 5 mm. Los agregados finos deben cumplir ciertas reglas para darles un uso ingenieril óptimo: deben consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y de otros materiales finos que pudieran afectar la Hidratación y la adherencia de la pasta de cemento. Las partículas de agregado que sean desmenuzables o susceptibles de resquebrajarse son indeseables para realizar el tamizado del agregado fino debe cumplir los requerimientos de la tabla 4 y para el agregado grueso los requerimientos de la tabla 5.

Tabla 4.

Requerimiento de tamizado en agregados finos.

Tamaño de la malla	Porcentaje que pasa en peso
9.52 mm	100
4.75 mm	95 a 100
2.36 mm	80 a 100
1.18 mm	50 a 85
0.6 mm	25 a 60
0.3 mm	5 a 30
0.15 mm	0 a 10

Fuente: (ASTM C 33 –03).

Que el agregado fino no tenga más del 45% retenido entre dos mallas consecutivas.

Que el módulo de finura no sea inferior a 2.3 ni superior a 3.1, ni que varíe en más de 0.2 del valor típico de la fuente del abastecimiento del agregado. En el caso de que sobrepase este

valor, el agregado fino se deberá rechazar a menos que se hagan los ajustes adecuados en las proporciones del agregado fino y grueso.

Agregado Grueso (grava).

Los agregados gruesos consisten en una grava o una combinación de gravas o agregado triturado cuyas partículas sean predominantemente mayores que 5 mm y generalmente entre 9.5 mm y 38 mm. Los agregados gruesos deben cumplir ciertas reglas para darles un uso ingenieril óptimo: deben consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y de otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento. Las partículas de agregado que sean desmenuzables o susceptibles de resquebrajarse son indeseables.

Tamaño Máximo (TM): es el mayor tamaño de las partículas del agregado; esto quiere decir que se estima como la abertura menor de la serie de tamices estándar por la que pasa el 100% del agregado. El tamaño de las partículas incide en la economía del concreto; normalmente se requiere una mayor relación de pasta/agregado, debido al aumento del área superficial de las partículas en concretos con tamaño máximo menor, en comparación con tamaño máximo mayores; además el TM debe ser compatible con las dimensiones y especificaciones de la estructura (Sánchez, 2001).

Tamaño Máximo Nominal: se calcula como la abertura del tamiz inmediatamente superior a aquel tamiz que retenga el 15% o más del material. Este se deriva del análisis granulométrico, y hace referencia al tamaño de las partículas del agregado en forma colectiva. Se diferencia del TM porque define de mejor forma el tamaño de las partículas más grandes del agregado en su fracción gruesa. No necesariamente el TM y TMN deben coincidir

Tabla 5.*Requerimiento de tamizado en agregados gruesos.*

N° de tamaño	Tamaño Máximo Nominal (Tamices con abertura cuadrada)	Cantidades más finas que cada tamiz de laboratorio (Abertura cuadrada), porcentaje de masa												
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37.5 mm	25 mm	19 mm	12.5 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm
1	90 a 37.5	100	90 a 100	...	25 a 60	...	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...	...
2	63 a 37.5 mm	...	...	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...	...
3	50 a 25 mm	...	...	...	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...
357	50 a 4.75 mm	...	...	...	100	95 a 100	...	35 a 70	...	10 a 30	...	0 a 5	...	...
4	37.5 a 19 mm	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...
467	37.5 a 4.75 mm	...	...	...	...	100	95 a 100	...	35 a 70	...	10 a 30	0 a 5	...	...
5	25 a 12.5 mm	...	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	...	...	...
56	25 a 9.5 mm	...	...	...	...	...	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	...	...
57	25 a 4.75 mm	...	...	...	...	...	100	95 a 100	...	25 a 60	...	0 a 10	0 a 5	...
6	19 a 9.5 mm	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	...	...
67	19 a 4.75 mm	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	...	20 a 55	0 a 10	0 a 5	...
7	12.5 a 4.75 mm	...	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	...
8	9.5 a 2.36 mm	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 a 100	10 a 30	0 a 5	0 a 5

Fuente: (ASTM C 33 –03).

Agua de Mezclado

Cantidad de agua que requiere el hormigón por unidad de volumen para que se hidraten las partículas del cemento y para proporcionar las condiciones de manejabilidad adecuada que permitan la aplicación y el acabado del mismo en el lugar de la colocación en el estado fresco.

Agua de Curado

El aumento de la resistencia del hormigón continuará con el pasar del tiempo mientras se encuentre cemento sin hidratar, con la condición de que el hormigón permanezca húmedo o tenga una humedad relativa superior a aproximadamente el 80%, y permanezca favorablemente su temperatura, por lo que una vez que el hormigón haya fraguado, es

necesario el suministro de agua para garantizar la completa hidratación de las partículas de cemento.

El objeto del curado es mantener el hormigón saturado, o lo más próximo posible a la saturación, hasta que los espacios que inicialmente estaban saturados de agua se llenen hasta un nivel deseado con los productos de la hidratación del cemento.

2.1.3 Vidrio

El vidrio es una sustancia sólida, sobre fundida, amorfa, dura, frágil, que es complejo químico de silicatos sólidos y de cal que corresponde a la formula $\text{SiO}_2(\text{Na}_2\text{O})_m(\text{CaO})_n$.

El silicato SiO_2 que constituye el elemento ácido proviene de la arena silicia, limpia y seca.

Los óxidos básicos provienen:

Para el Na, O; del carbonato o del sulfato de sodio

Para el CaO y MgO; de la caliza natural (carbonato de calcio) y de la dolomita.

(Norma E-040, Reglamento Nacional de Edificaciones, 2006)

En lo referente a la composición, los vidrios se clasifican en:

Vidrio boro-silicato: cruce de sílice al elemento boro haciendo el vidrio termo resistente, es decir, resistente al fuego. Su aplicación se da en utensilios domésticos (ollas y sartenes).

Vidrio sódico-cálcico: como su nombre indica, se obtienen de la adición de calcio y sodio al óxido de silicio. Esos ingredientes proporcionan mayor resistencia al material. Su aplicación se da en embalajes (frascos, botellas) y en vidrios de automóviles.

Vidrio tipo cristal: es menos resistente, contiene 24 a 32% de óxido de plomo. Es utilizado para fabricar tazas, cuencos y piezas artesanales (Arescris, 2018).

Propiedades Mecánicas del Vidrio

Densidad: Consiste en la cantidad de masa que contiene el vidrio y que depende del tipo de materiales combinados en el proceso de fundición. En general, la densidad del vidrio ronda los 2500 kg/m³. (Uriarte, 2021)

Dureza: 470 HK (4609.1255 MPa). La dureza del vidrio flotado se establece conforme a Knoop. La base es el método de ensayo dado en la norma DIN 52333 (ISO 9385).

Resistencia a la Compresión: 500 a 1000 Mpa. La resistencia a la compresión define la capacidad de un material para soportar una carga aplicada verticalmente a su superficie. Aproximadamente es el peso necesario para romper un cubo de vidrio de 1 cm de lado (Mari).

Módulo de elasticidad: El módulo de elasticidad de un vidrio varía con su composición. Se han hecho tentativas de calcularlo a partir de esta última, aunque hasta el momento no han dado tan buenos resultados como en el caso de otras propiedades, ya que, como depende mucho de la estructura, sería necesario disponer de un modelo de estructural para cada tipo como se indica en la tabla 6.

Tabla 6.

Módulos de Young para algunos tipos de vidrio comunes.

Tipo de vidrio	E (Mpa)
Vidrio de sílice	72000
Sódico - cálcico común	71000 a 75000
Borosilicato termorresistente	62000 a 65000
Borosilicato neutro	70000 a 73000
Aluminosilicato	73000 a 75000
Vidrio de plomo (20% PbO)	64000 a 68000

Fuente: (Mari).

Resistencia a la Flexión: 45 MPa. La resistencia a la flexión de un material, es una medida que valora su resistencia durante la deformación. Se determina por ensayos de flexión en la placa de vidrio, utilizando el método del anillo doble, de acuerdo a la norma (Mari).

Resistencia a la Tracción: Los tratamientos térmicos posteriores del vidrio inciden notablemente sobre esta propiedad, para propiedades de vidrio común, bien recocido tiene una resistencia a la tracción de 50 a 100 Mpa. (Mari).

Módulo de Rotura para:

- Vidrios recocidos 35 a 55 Mpa
 - Vidrios templados 180 a 200 Mpa
- (Arescris, 2018)

2.2 Antecedentes del Vidrio como Adición en el Hormigón.

La creciente preocupación por el impacto ambiental de la acumulación de desechos en los vertederos, combinada con el aumento de los costos de energía y las tarifas de eliminación, así como la escasez de materiales de construcción de calidad en las cercanías de los sitios de obra, subraya la importancia de fomentar el reciclaje del vidrio desechado. Esta práctica ha demostrado resultados positivos en diversas investigaciones, las cuales son:

Estudio De La Influencia Del Vidrio Molido En Hormigones Grado H15, H20, Y H30.

Catalán (2013) en su proyecto presenta:

El estudio de la influencia de la adición de vidrio sobre la resistencia mecánica del hormigón, de grados H15, H20 y H30.

Determinó que:

Existe una tendencia, aunque en este caso ligero, a un aumento en la resistencia del hormigón, al incluir un 10% de vidrio en la mezcla, en cual se muestra los resultados en la tabla 7, lo que corrobora estudios anteriores referentes al tema.

Tabla 7.

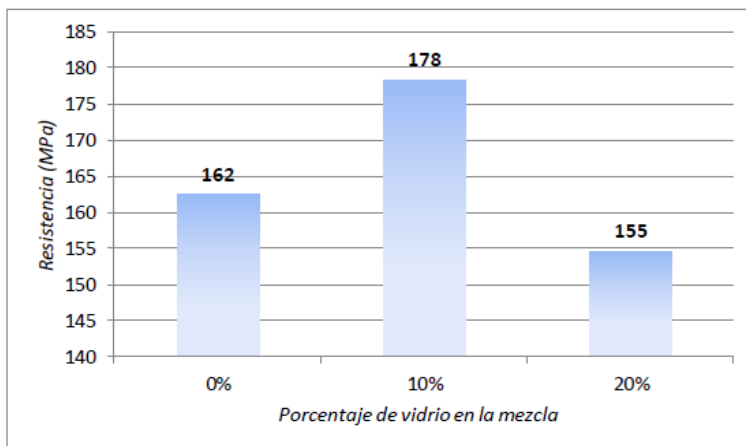
Resistencia a la compresión a los 28 días para las tres series de probetas (Mpa).

% Vidrio	0%	10%	20%
Grado de hormigón			
H15	162	178	155
H20	238	244	216
H30	319	334	293

Fuente: Catalán (2013).

Figura 1.

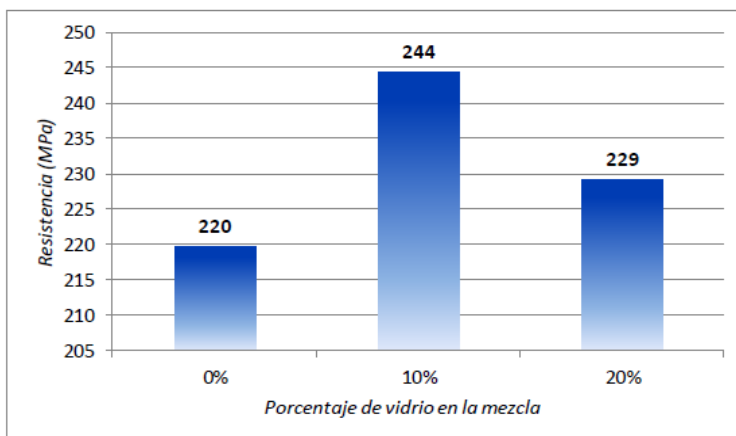
Resistencia vs % de vidrio en probetas H 15.



Fuente: Catalán (2013).

Figura 2.

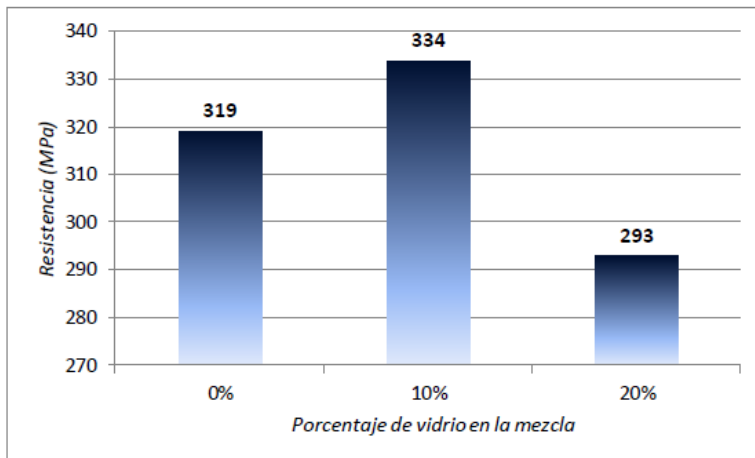
Resistencia vs % de vidrio en probetas H 20.



Fuente: Catalán (2013).

Figura 3.

Resistencia vs % de vidrio en probetas H30.



Fuente: Catalán (2013).

Al incluir un porcentaje mayor en la mezcla, se tiende a una disminución de la resistencia, lo cual se explica en la naturaleza como material frágil del vidrio, en detrimento de la ductilidad deseada en hormigones.

Análisis de la Resistencia a la Compresión del Hormigón al Emplear Vidrio Reciclado Molido en Reemplazo Parcial del Agregado Fino.

Peñañiel (2016) en su proyecto presenta:

El Análisis de la resistencia a compresión de probetas cilíndricas de hormigón dosificadas para un $f'c$ de 210 kg/cm² empleando en su composición vidrio reciclado molido en granulometrías adecuadas reemplazando parcialmente al agregado fino.

Concluye que a los 28 días las muestras ensayadas permiten determinar que las mezclas cuyo porcentaje de vidrio añadido en reemplazo parcial de la arena es de 10, 20 y 30% alcanzan una resistencia ligeramente menor a la resistencia obtenida con las probetas de hormigón común, mientras que en el hormigón elaborado con 40% de vidrio en reemplazo de la arena se obtuvo una resistencia mayor a la del hormigón patrón, logrando 111.8% de la resistencia de diseño estos resultados se muestran en la tabla 8.

Tabla 8.

Resultados de resistencia a la compresión promedio.

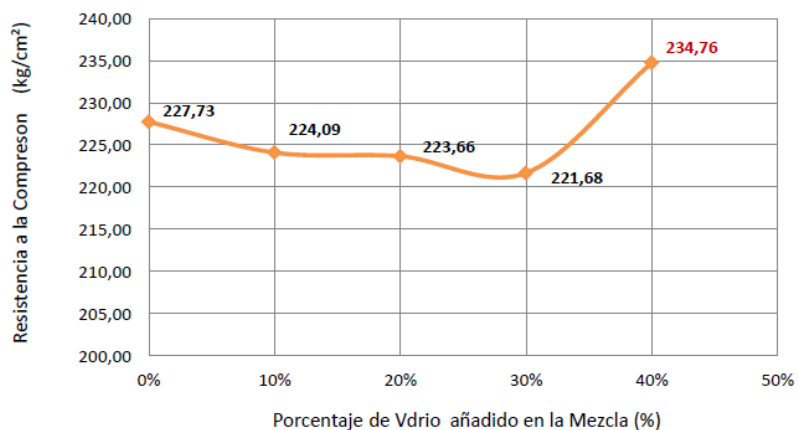
Nº	% De Vidrio	Esfuerzo de Compresión kg/cm ²	Promedio f'c kg/cm ²
1	0%	244.48	227.73
2		223.30	
3		215.41	
4	10%	225.96	224.09
5		222.76	
6		223.56	
7	20%	213.78	223.66
8		204.83	
9		252.36	
10	30%	221.63	221.68
11		221.73	
12	40%	227.99	234.76
13		243.27	
14		233.01	

Fuente: Peñafiel (2016).

La representación gráfica se muestra en la figura 4.

Figura 4.

Curva de resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días de edad vs. porcentaje de vidrio molido.



Fuente: Peñafiel (2016).

Sustitución Parcial del Agregado Fino por Vidrio para la Elaboración de Hormigón

Correa Amador & Sarraff Beco (2016) en su investigación presenta:

Determinar si el vidrio puede parcialmente sustituir al agregado fino para elaborar hormigón. Según los resultados de la investigación basados en tres muestras con resistencia de 175, 220 y 280 kg/cm² con porcentajes de vidrio variable de un 10, 15 y 20 %, se concluye que el vidrio puede ser considerado como un nuevo elemento en la fabricación del hormigón.

Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión se exponen en la tabla 9.

Tabla 9.

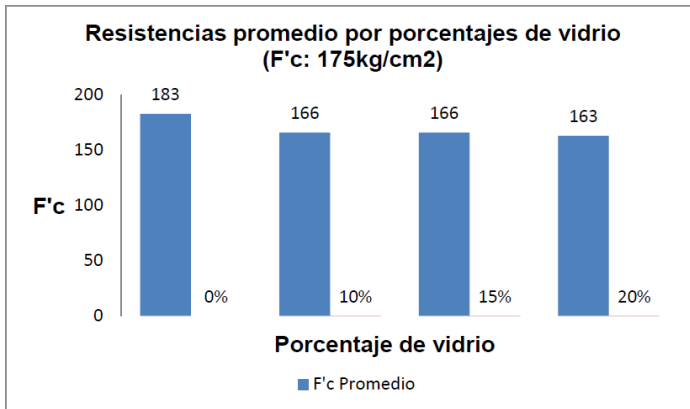
Resultados de resistencia a la compresión promedio.

F'c (kg/cm ²)	Porcentaje de vidrio en la mezcla			
	0%	10%	15%	20%
175	182	180	165	170
175	188	152	163	162
175	180	165	170	158
Promedio	183	166	166	163
220	244	233	243	260
220	252	231	230	259
220	252	220	231	248
Promedio	249	228	235	256
280	361	307	305	327
280	323	291	296	327
280	333	309	293	319
Promedio	339	302	298	324

Fuente: Correa Amador & Sarraff Beco (2016).

Figura 5.

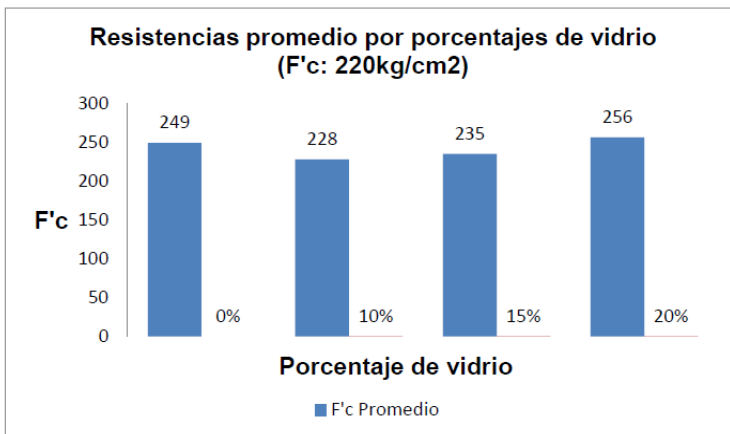
Resistencia vs % de vidrio en probetas de $f'c = 175 \text{ kg/cm}^2$.



Fuente: Correa Amador & Sarraff Beco (2016).

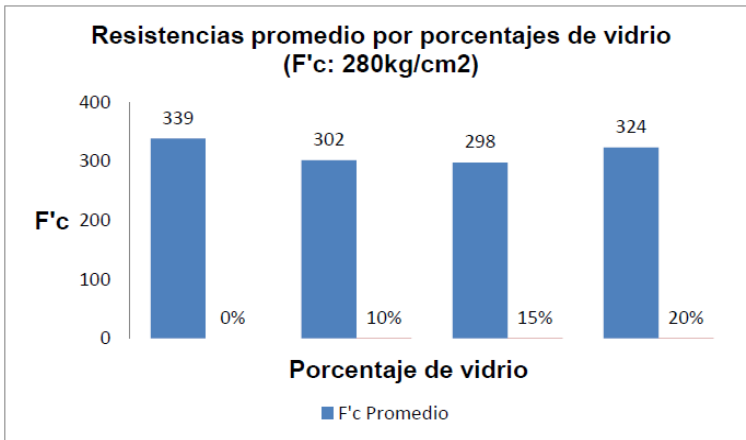
Figura 6.

Resistencia vs % de vidrio en probetas de $f'c = 220 \text{ kg/cm}^2$.



Fuente: Correa Amador & Sarraff Beco (2016).

Figura 7. Resistencia vs % de vidrio en probetas de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$.



Fuente: Correa Amador & Sarraff Beco (2016).

En las probetas que no tienen vidrio, las resistencias fue mucho mayor que la diseñada.

En el caso de las probetas con vidrio incluido diseñadas para una resistencia de 220 y 280 kg/cm^2 , se pudo observar que en estas la pérdida de resistencia fue menor en comparación con las probetas de 175 kg/cm^2 , además se puede apreciar que, a mayor cantidad de vidrio en el hormigón, menor será la pérdida de resistencia.

Determinación del Comportamiento del Concreto en Estado Fresco y Endurecido, Utilizando Vidrio Molido como Sustituto Parcial del Agregado Fino.

Palacios (2019). en su proyecto demuestra:

Que el comportamiento de la mezcla que presenta un mejor valor de resistencia a temprana edad es la MP (Muestra patrón), comparando en las siguientes edades.

Se encontró que, a los 7 días, la resistencia disminuye con el aumento del porcentaje de vidrio. A los 28 y 56 días, se encontró que el máximo de resistencia se obtiene con un 20% de sustitución de vidrio, y que los porcentajes de 15% y 25% tienen una resistencia menor en comparación a la mezcla de referencia. En resumen, las pruebas indican que el porcentaje óptimo de sustitución de vidrio en la mezcla de concreto es del 20% revelando los resultados en la tabla 10.

Tabla 10.

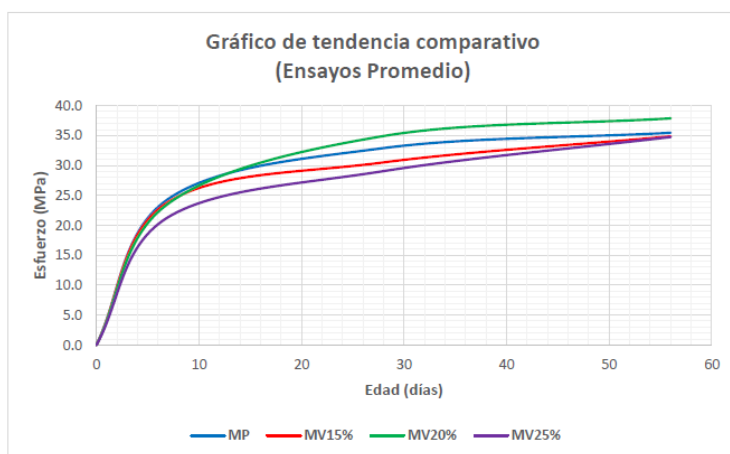
Resultados de resistencia a la compresión promedio.

Tipo de mezcla	MP	MV 15%	MV 20%	MV 25%
Edad (días)	σ (MPa)	σ (MPa)	σ (MPa)	σ (MPa)
7	24.4	23.9	23.6	21.4
28	32.9	30.5	34.9	29.1
56	35.5	34.9	37.9	34.7

Fuente: Palacios (2019).

Figura 8.

Curvas de tendencia para la resistencia del concreto.



Fuente: Palacios (2019).

Estudio de Morteros con Uso de Vidrio Molido como Sustituto Parcial de Agregado Fino

Pérez Pimentel, Martínez Camacho, Hernández Cruz, & Godínez Domínguez (2019) en su artículo proponen:

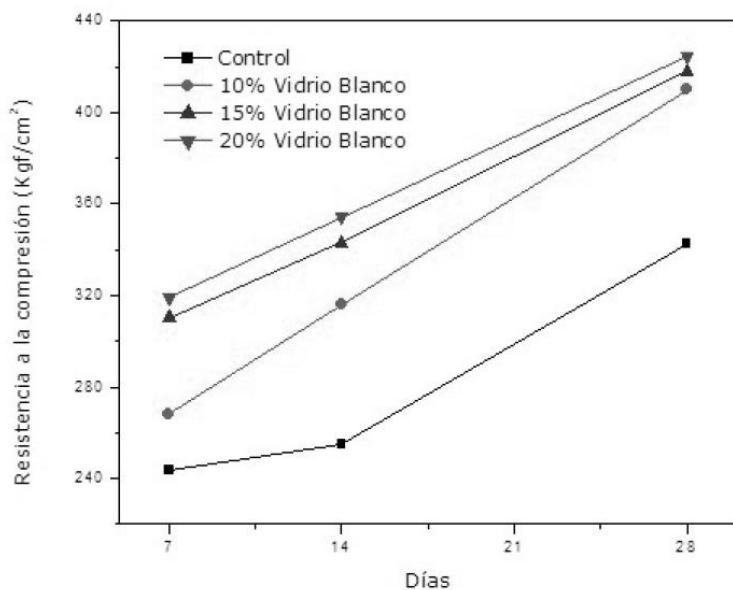
El empleo de vidrio reciclado y molido de tonalidades blanca y ámbar como reemplazo de agregado fino en mortero base cemento portland, con porcentajes del 10%, 15% y 20%, y con una relación agua-cemento de 0.53.

En cuanto a los resultados de las mezclas de mortero se encontró que superan los valores de resistencia a compresión simple al mortero convencional (o espécimen de control) a los 7, 14 y 28 días, para las probetas con vidrio blanco se obtuvieron incrementos de 19.76%, 22.05%

y 23.89% como muestra la Figura 9, y con vidrio ámbar de 20.49%, 28.35% y 45.36% respectivamente, que se encuentra en la figura 10.

Figura 9.

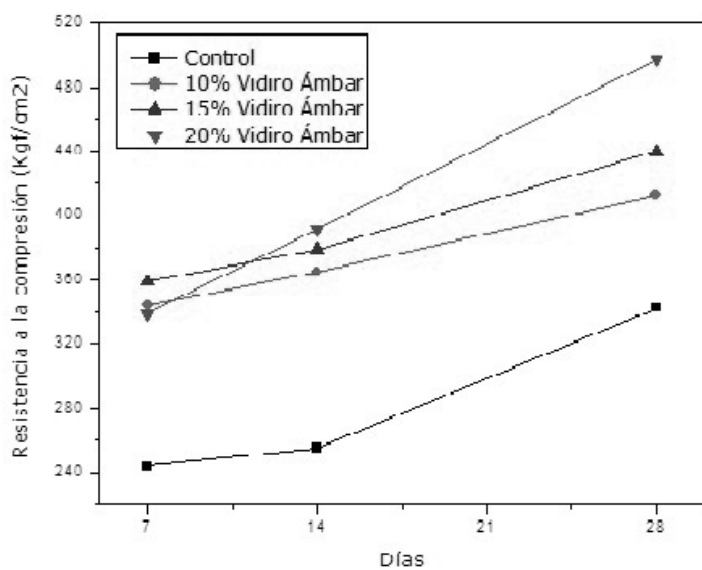
Resistencia a la compresión a 7, 14 y 28 días para probetas con vidrio blanco y control.



Fuente: Pérez Pimentel, Martínez Camacho, Hernández Cruz, & Godínez Domínguez (2019).

Figura 10.

Resistencia a la compresión a 7, 14 y 28 días para probetas con vidrio ámbar y control.



Fuente: Pérez Pimentel, Martínez Camacho, Hernández Cruz, & Godínez Domínguez (2019).

Influencia en la Resistencia Mecánica a la Compresión del Concreto $F'c= 175 \text{ Kg/Cm}^2$ con Incorporación del Vidrio Reciclado Molido para Elementos no Estructurales.

Gonzales & Montenegro (2020) en su proyecto presenta:

Que el uso del vidrio reciclado molido incrementa su resistencia a la compresión del concreto $F'c= 175 \text{ kg/cm}^2$ solo con el 15% de vidrio el cual llegó a una resistencia a la compresión de 177.50 kg/cm^2 , superando con 1.43% al diseño de mezcla convencional.

Se determinó que para la elaboración de un diseño de mezcla con el uso del vidrio molido como sustituto del agregado fino fue mayor que el costo de la fabricación de un concreto convencional, siendo la diferencia del concreto convencional con el diseño de mezcla usando un 15% de vidrio la suma de S/. 3.37, con el diseño de 20% de vidrio S/. 3.85 y con el diseño de 25% de vidrio la suma de S/. 4.72. Finalmente se concluyó que incorporando mayor porcentaje de vidrio incrementa el costo de fabricación de la misma.

2.3 Metodología

Para realizar los ensayos a compresión con el sustituto parcial de vidrio molido se realizará los distintos tipos de ensayo y su metodología.

2.3.1 Agregados

Características y Propiedades de los Agregados.

2.3.1.1 Análisis Granulométrico y Modulo de Finura de los Agregados (ASTM C-136)

Este método de ensayo se utiliza para determinar la distribución por tamaño de las partículas de los áridos finos y gruesos mediante el uso de tamices.

Algunas especificaciones para los áridos, que tienen referencia con este método de ensayo, contienen requerimientos granulométricos que incluyen ambas fracciones, áridos finos y gruesos. Se incluyen las instrucciones para el análisis granulométrico de estos árido.

Este método de ensayo se usa principalmente para determinar la granulometría de los materiales propuestos para ser utilizados como áridos o que están siendo empleados como áridos. Los resultados se usan para determinar la concordancia de la distribución del tamaño

de las partículas con los requerimientos de las especificaciones aplicables y para proporcionar la información necesaria para controlar la producción de diversos productos de los áridos y de mezclas que contengan áridos. La información también puede ser de utilidad para establecer relaciones concernientes a la porosidad y al macizo.

•Tamaño Máximo del Agregado Grueso

El estudio del tamaño máximo de los agregados y su influencia en las propiedades del concreto han sido ampliamente investigados, para obtener una óptima resistencia a la compresión de los concretos con baja relación agua / cemento diversos investigadores han concluido que el tamaño máximo a utilizarse debe variar entre $\frac{1}{2}$ " a $\frac{3}{4}$ " , no es recomendable usar tamaños mayores a 1", se ha encontrado que la adherencia de partículas de agregados de 3" es solamente cerca de 1/10 de la de los agregados de $\frac{1}{2}$ ". Los agregados con tamaño menor contribuyen a producir concretos más resistentes debido a una menor concentración de esfuerzos alrededor de las partículas causados por la diferencia de módulos de elasticidad entre la pasta y el agregado. (Barriga, 2007)

Se debe mezclar completamente la muestra y reducirla hasta una cantidad adecuada para ensayar utilizando los procedimientos aplicables descritos en la norma ASTM C702. La muestra de ensayo debe ser aproximadamente la cantidad indicada cuando se seque y debe ser el resultado final de la reducción. No debe permitirse la reducción a una cantidad exacta predeterminada.

Tamaño máximo nominal: se calcula como la abertura del tamiz inmediatamente superior a aquel tamiz que retenga el 15% o más del material. Este se deriva del análisis granulométrico, y hace referencia al tamaño de las partículas del agregado en forma colectiva. Se diferencia del TM por que define de mejor forma el tamaño de las partículas más grandes del agregado en su fracción gruesa. No necesariamente el TM Y TMN deben coincidir.

La masa de la muestra de ensayo del agregado grueso seco, debe ser conforme con la tabla 11 que indica lo siguiente:

Tabla 11.*Masa mínima de la muestra de ensayo.*

Tamaño máximo nominal aberturas cuadradas	Masa mínima de la muestra de ensayo
mm	kg
9.5	1.00
12.5	2.00
19	5.00
25	10.00
37.5	15.00
50	20.00
63	35.00
75	60.00
90	100.00
100	150.00
125	300.00

Fuente (ASTM C-136, 2001)

Modulo de Finura (M.F)

El módulo de finura (FM) del agregado grueso o del agregado fino se obtiene, conforme a la norma ASTM C 125 se calcula sumando los porcentajes retenidos acumulados en los tamices estándar (nombrados más abajo) y dividiendo la suma entre 100. Cambios significativos en la granulometría de la arena tienen una repercusión importante en la demanda de agua y, en consecuencia, en la trabajabilidad del hormigón, por lo que si hubiese una variación significativa en la granulometría de la arena deben hacerse ajustes en el contenido de cemento y agua para conservar la resistencia del hormigón. Para no tener que recalcular la dosificación del hormigón el módulo de finura del agregado fino, entre envíos sucesivos, no debe variar en más de ± 0.2 .

En el agregado fino hay dos elementos que deben ser considerados, por un lado, el módulo de finura (MF), y por el otro la continuidad en los tamaños, ya que algunas arenas pueden tener módulos de finuras aceptables (entre 2.2 y 3.1) y carecer de alguna clase granulométrica. Si consideramos únicamente el módulo de finura, pueden obtenerse dos condiciones desfavorables: una de ellas existe cuando el módulo de finura es mayor a 3.1 (arena gruesa), en donde puede ocurrir que las mezclas sean poco trabajables, faltando cohesión entre sus componentes y requiriendo mayores consumos de cemento para mejorar su trabajabilidad; la otra condición es cuando el módulo de finura es menor a 2.2 (arena fina), en este caso puede ocurrir que los concretos sean pastosos y que haya mayores consumos de cemento y agua para una resistencia determinada, y también una mayor probabilidad que ocurran agrietamientos de tipo contracción por secado.

Esta última consideración se basa en el hecho que cuanto menor es el módulo de fineza, dentro de los límites indicados, mayor es el valor lubricante del agregado fino, pudiéndose emplear menor cantidad de este y mayor cantidad de agregado total en la mezcla sin que este deje de ser trabajable. (Uribe, 1991)

Cálculo de Módulo de Finura

Los tamices especificados que deben usarse en la determinación del módulo de finura son: No. 100, No. 50, No. 30, No. 16, No. 8, No. 4, 3/8", 3/4", 1 1/2", 3" y de 6"

y el módulo de finura será según la ecuación 1:

$$MF = \frac{\sum \%retenido_acumulado(6+3 + 1\frac{1}{2}'' + \frac{3}{4}'' + \frac{3}{8}'' + N^{\circ}4 + N^{\circ}8 + N^{\circ}16 + N^{\circ}30 + N^{\circ}50 + N^{\circ}100)}{100}$$

Ecuación 1

2.3.1.2 Determinar la Densidad Aparente ("peso unitario") e Índice de Huecos en los Agregados para Hormigón (ASTM C 29)

Este método de ensayo permite determinar la densidad aparente ("peso unitario") de un agregado tanto en su condición compactada o suelta y calcular los huecos entre las partículas en los agregados finos, gruesos o mezclas de agregados, basada en la misma determinación.

Este método se aplica a los agregados que no exceden las 5 pulg [125 mm] de tamaño máximo nominal.

Densidad aparente - de un agregado, la masa de una unidad de volumen de los agregados a granel, en la que el volumen incluye el volumen de las partículas individuales y el volumen de los huecos de aire entre las partículas. Se expresa en lb/ft³ [kg/m³].

Peso unitario, - peso(masa) por unidad de volumen. (Término desaprobado - usar de preferencia **densidad aparente**.)

Estas definiciones dependen de los siguientes parámetros principales:

- La gravedad específica de los agregados.
- El tamaño de los granos, descritos por la curva granulométrica.
- La forma y textura de los granos.
- El grado de compactación, la manera de la cual es realizado el acomodo.
- El efecto pared ejercido por el recipiente donde se realiza la prueba.

Se conoce que, para medir estos valores, el agregado se debe encontrar en condición seca, pues tendrá el efecto de incrementar el valor del peso unitario del agregado grueso y generará el efecto de abundamiento del agregado fino. (Barriga, 2007).

2.3.1.3 Método para determinar el peso específico y absorción del agregado grueso (ASTM-C 127)

Este método de prueba cubre la determinación de la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso (no incluye el volumen de vacíos entre las partículas), la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción del agregado grueso. Dependiendo del procedimiento usado, la densidad kg/m³.

La mayoría de los agregados naturales tienen una densidad relativa del orden de 2.6 a 2.7, y el rango de valores aparece en la tabla 12. Los valores para agregados artificiales se extienden desde mucho más abajo hasta mucho más arriba de este. (Barriga, 2007).

Tabla 12.

Peso específico aparentes de diversos grupos de rocas.

Grupo de la roca	Peso específico promedio	Amplitud de densidades
Basalto	2.80	2.6-3.0
Pedernal	2.54	2.4-2.6
Granito	2.69	2.6-3.0
Arenisca	2.69	2.6-2.9
Hornfelsa	2.82	2.7-3.0
Caliza	2.66	2.5-2.8
Pórfido	2.73	2.6-2.9
Cuarcita	2.62	2.6-2.7

Fuente: (Barriga, 2007).

Muestra

La masa mínima de la muestra de prueba a ser usada está dada en la Tabla 13.

Tabla 13.

Peso mínimo de la muestra de prueba.

Tamaño máximo nominal	Peso mínimo de la muestra de prueba
mm	kg
12.5 o menor	2.0
19	3.0
25	4.0
37.5	5.0
50	8.0
63	12.0
75	18.0
90	25.0
100	40.0
112	50.0
125	75.0
150	125.0

Fuente: (ASTM C 127, 2012).

2.3.1.4 Método para Determinar el Peso Específico y Absorción del Agregado Fino (ASTM C 128)

Este método de ensayo determina la densidad promedio de una cantidad de partículas de áridos finos, la densidad relativa y la absorción de los áridos finos. Dependiendo del procedimiento usado, la densidad en kg/m³ (lb/ft³) es expresada como secada al horno, saturada superficialmente seca o como densidad aparente. La densidad y la densidad relativa se determinan después de secar los áridos.

Absorción de los Agregados.

Es el incremento en la masa del agregado debido al agua en los poros del material, pero sin incluir el agua adherida a la superficie exterior de las partículas, expresado con un porcentaje de la masa seca. El agregado se considera como “seco” cuando se ha mantenido a una temperatura de 110 °C por suficiente tiempo para remover toda el agua no combinada.

La porosidad de los agregados, su impermeabilidad y absorción influyen en las propiedades como la adherencia entre el agregado y los materiales cementicios, la resistencia del concreto a la congelación y al deshielo, así como la estabilidad química y la resistencia a la abrasión.

(Barriga, 2007)

2.3.1.5 Contenido de Humedad en Agregados (ASTM C 566, 2004)

Este método de ensayo cubre la determinación de la densidad del porcentaje de humedad evaporable en una muestra de agregado por el secado tanto de la humedad superficial como la humedad dentro de los poros del agregado. Algunos agregados pueden contener agua que esta químicamente combinada con los minerales en el agregado. Esta agua no es evaporable y no está incluida en el porcentaje determinado por el método.

Este método de ensayo es suficientemente exacto para usos corrientes, tal como el ajuste de cantidades de ingredientes para el hormigón de una amasada.

Las partículas del agregado grueso, especialmente aquellas mayores a 50 mm (2 pulg.) pueden requerir grandes periodos de tiempo para que la humedad que se encuentre dentro del agregado, salga a la superficie del mismo.

Si se desea que no haya movimiento de agua que penetre en los agregados, sus poros deben estar llenos de agua; es decir, que el agregado se debe encontrar en un estado saturado. Por otra parte, cualquier cantidad de agua que se encuentre en la superficie de los agregados contribuirá a aumentar el agua de la mezcla y ocupará un volumen excedente al de las partículas del agregado. Por lo tanto, el estado básico del agregado debe ser el de saturado y superficialmente seco. (Neville, 1999)

Muestreo

Obtener una muestra de acuerdo con Norma ASTM D75.

Asegurar una muestra representativa de agregado para contenido de humedad y teniendo una masa no menor que la cantidad de la Tabla 14. Proteger la muestra contra pérdidas de humedad previa a la determinación de la masa.

Tabla 14.

Muestra representativa de agregados.

Tamaño de muestra para agregado	
Tamaño máximo nominal del agregado	Masa de la muestra de agregado
mm	kg
4.75	0.5
9.5	1.5
12.5	2
19	3
25	4
37.5	6
50	8
63	10
75	13
90	16
100	25
150	50

Fuente: (ASTM C566-19)

2.3.1.6 Desgaste de los Ángeles (ASTM C-131)

La dureza del agregado se determina mediante el Ensayo de Abrasión de Los Ángeles, de acuerdo a ASTM C 131. Este ensayo puede ser no determinante en caso de concreto para estructuras, pero si lo sería en pavimentos y obras hidráulicas. El ensayo es obligatorio en los

dos últimos casos, pero no lo es si se trata de estructuras de concreto para edificaciones, salvo aquellas partes de estas que puedan estar sujetas a procesos de abrasión. (ICA)

2.3.1.7 Dosificación del Hormigón

2.3.1.7.1 Dosificación Basada en la Experiencia en Obra y/o en Mezclas de Prueba

Para seleccionar una mezcla adecuada de concreto, hay que seguir tres pasos básicos.

El primero es determinar la desviación estándar de la muestra.

El segundo determinar la resistencia promedio a la compresión requerida.

El tercer paso es la dosificación de la mezcla requerida para producir esa resistencia promedio, ya sea mediante mezclas de prueba o un adecuado registro de experiencias.

Los registros de prueba de una planta de concreto se usan para calcular la desviación estándar de la muestra (s_s) que representa la variabilidad en las propiedades del concreto. Estos registros deben cumplir ciertos criterios:

Deben representar materiales, controles de calidad y condiciones similares a las propuestas.

La variación en los materiales y proporciones debe ser similar.

Representar un concreto producido para que cumpla con una resistencia o resistencias especificadas, dentro de 7 MPa de $f'c$.

Consistir al menos de 30 ensayos consecutivos, o de dos grupos de ensayos consecutivos totalizando al menos 30 ensayos.

Si no hay registros de pruebas que cumplan lo anterior, se pueden usar 15-29 pruebas consecutivas, pero s_s se calcula multiplicando el valor calculado por un factor de corrección de la tabla. Estos registros deben cumplir los criterios (a) y (b) del punto 1 y abarcar al menos 45 días consecutivos.

Cuando la instalación productora de concreto no tenga registros de ensayos que se ajusten a lo anterior, pero sí tenga un registro basado en 15 a 29 ensayos consecutivos, se debe establecer la desviación estándar de la muestra s_s como el producto de la desviación estándar de la muestra calculada y el factor de modificación de la tabla 15.

Para un análisis estadístico es recomendable utilizar al menos 30 pruebas, sin embargo, existe la posibilidad de utilizar menos de 30 datos, siempre que se considere un factor corrección en la desviación estándar. Para los efectos del análisis estadístico, debe definirse las siguientes variables de control, que se utilizan.

f'_{cr} : resistencia promedio requerida, para asegurarse de que sólo aquella porción permisible de pruebas caerá por debajo de la resistencia especificada.

f'_c : Resistencia especificada.

s_s : Desviación estándar.

Tabla 15.

Factor de modificación para la desviación estándar de la muestra cuando se dispone de menos de 30 ensayos.

Numero de ensayos	Factor de modificación para la desviación estándar de la muestra
Menos de 15	Emplee la tabla 16.
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 o mas	1

Fuente: (ACI 318).

2.3.1.7.2 Resistencia promedio requerida

La resistencia promedio a la compresión requerida, f'_{cr} , usada como base para la dosificación del concreto debe ser determinada según la tabla 16.

Tabla 16.

Resistencia promedio a la compresión requerida cuando hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra.

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$f'_c \leq 35$	Usar el mayor valor obtenido de las ecuaciones (1) y (2) $f'_{cr} = f'_c + 1.34s_s$ (1) $f'_{cr} = f'_c + 2.33s_s - 3.5$ (2)

$f'c > 35$	Usar el mayor valor obtenido con las ecuaciones (3) y (4) $f'cr = f'c + 1.34s_s$ (3) $f'cr = 0.90f'c + 2.33s_s$ (4)
------------	---

Fuente: (ACI 318).

Cuando una instalación productora de concreto no tenga registros de ensayos de resistencia en obra para el cálculo de s_s que se ajuste a los requisitos de la tabla 15 o de la tabla 16, $f'cr$ debe determinarse de la tabla 17.

Tabla 17.

Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra.

Resistencia especificada a la compresión, Mpa	Resistencia promedio requerida a la compresión, Mpa
$f'c < 35$	$f'cr = f'c + 7.0$
$20 \leq f'c \leq 35$	$f'cr = f'c + 8.5$
$f'c > 35$	$f'cr = 1.10f'c + 5.0$

Fuente: (ACI 318)

2.3.1.8 Tamizado del vidrio

Luego de la limpieza, trituración, y molido se realizará el tamizado, en el cual se obtendrá las características granulométricas del vidrio molido.

2.3.1.9 Procedimiento de diseño de mezcla de hormigón (ACI 211.1)

El proceso de selección de los adecuados agregados para el hormigón, determinando cantidades y requerimientos específicos de manejabilidad, resistencia y dureza Actualmente se usa mezclas diseñadas para cuyas especificaciones existen valores límite respecto a un rango de propiedades que deben cumplirse las cuales son:

- Máxima relación agua/cemento.
- Contenido mínimo de cemento.
- Contenido de aire.
- Revenimiento.
- Tamaño máximo nominal del agregado.
- Resistencia mínima.
- Manejabilidad.

Para lograr características específicas de la mezcla se debe determinar la cantidad de los agregados por conocer propiedades del hormigón fresco, propiedades mecánicas del hormigón endurecido y la inclusión, exclusión o límites de agregados específicos.

Se realizará el diseño de la mezcla de hormigón para una resistencia de $f'c = 25 \text{ N/mm}^2$ en el cual servirá para realizar la mezcla de control y con la cual usaremos para realizar las mezclas con adición de vidrio molido en los distintos porcentajes de 10, 20, 30 y 40%

Procedimiento:

- **Resistencia de Diseño cuando no hay datos que permitan determinar la Desviación Estándar (Paso 1)**

Resistencia de Diseño cuando no hay datos que permitan determinar la Desviación Estándar se determina de acuerdo a la tabla 17 mostrada anterior mente.

- **Elección de Revenimiento (Paso 2)**

Si el revenimiento no se ha especificado, su valor apropiado para el trabajo puede ser seleccionado a partir de la Tabla 18. Los rangos del revenimiento que se muestran aplican cuando se usa vibración para consolidar el hormigón. Deben emplearse mezclas de la consistencia más dura posible sin perder de vista que se puedan colocar con un buen rendimiento.

Tabla 18.

Revenimientos recomendados para varios tipos de construcción.

Tipos de Construcción	Revenimiento, cm	
	Máximo	Mínimo
Muros de cimentación y zapatas reforzadas	7.5	2.5
Zapatas, campanas y muros de subestructura	7.5	2.5
Vigas y muros reforzados	10	2.5
Columnas para edificación	10	2.5
Pavimentos y losas	7.5	2.5
Concreto masivo	5	2.5

Fuente: (ACI 211.1).

Puede incrementarse en 2.5 cm (1.0 pulgada) cuando no se usa vibración para consolidar el hormigón.

➤ **Elección del Tamaño Máximo Nominal del Agregado (Paso 3)**

Los tamaños más grandes de agregados bien graduados tienen menos vacíos que los tamaños más pequeños. Por esto, los hormigones con agregados de tamaño mayores requieren menos mortero por volumen unitario de hormigón. Por regla general, el tamaño máximo nominal de agregado debe ser el mayor disponible económicamente y guardar relación con las dimensiones de la estructura. En ningún caso el tamaño máximo nominal debe exceder de:

- a) $1/5$ de la menor dimensión entre los costados de las cimbras.
- b) $1/3$ del espesor de las losas.
- c) $3/4$ del espaciamiento mínimo libre entre varillas o alambres individuales de refuerzo, paquetes de varillas, cables o ductos de pretensado.

➤ **Estimación de la Cantidad de Agua y Contenido de Aire (Paso 4)**

La cantidad de agua por volumen unitario de hormigón requerida para producir determinado revenimiento, depende del tamaño máximo, de la forma de la partícula, la granulometría de los agregados y de la cantidad de aire incluido (aire adicionado a través de aditivos químicos), no le afecta significativamente el contenido de cemento. La Tabla 19 provee valores estimados del agua de mezclado requerida para hormigones hechos con varios tamaños máximos de agregados, con y sin aire incluido.

Tabla 19.

Requerimiento aproximado de agua de mezcla.

Revenimiento, cm	Agua, kg/m ³ para el concreto de agregado de tamaño máximo nominal (mm) indicado							
	9.5*	12.5*	19*	25*	38*	50* ⁺	75 ⁺ _i	150 ⁺ _i
CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO								
2.5 A 5	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124
15 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	-
Cantidad aproximada de aire atrapado en concreto, %	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2
CONCRETO CON AIRE INCLUIDO								
2.5 A 5	108	175	165	160	145	140	135	120
7.5 a 10	200	190	180	175	160	155	150	135
15 a 17.5	215	205	190	185	170	165	160	-
Promedio recomendado del contenido total de aire, porcentaje de acuerdo con el nivel de exposición								
Exposición ligera	4.4	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5** ^{+,++}	1.0** ^{+,++}
Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5** ^{+,++}	3.0** ^{+,++}
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5** ^{+,++}	4.0** ^{+,++}

Fuente: (ACI 211.1)

Nota. *Las cantidades de agua de mezcla proporcionadas para el concreto con aire incluido se basan en los requisitos típicos de contenido de aire total como se muestra para la "exposición moderada" en la tabla anterior. Estas cantidades de agua de mezclado se usan para calcular el contenido de cemento para lotes de prueba a 68 a 77 F. Son máximas para agregados angulares razonablemente bien formados graduados dentro de los límites de las especificaciones aceptadas. El agregado redondeado generalmente requerirá 14 kg menos de agua para no

incorporar aire y 11 kg menos para hormigones con aire incorporado. El uso de aditivos químicos reductores de agua, ASTM C 494, también puede reducir el agua de mezcla en un 5 por ciento o más. El volumen de las mezclas líquidas se incluye como parte del volumen total del agua de mezcla. Los valores de asentamiento de más de 7 pulgadas solo se obtienen mediante el uso de productos químicos reductores de agua.

†Los valores de asentamiento para concreto que contiene agregados mayores de 38 mm. se basan en pruebas de asentamiento realizadas después de la remoción de partículas de más de 38 mm por tamizado en húmedo.

‡Estas cantidades de agua de mezcla se usan para calcular los factores de cemento para lotes de prueba cuando se usa un agregado de tamaño máximo nominal de 75 o 150 mm. Son promedio para agregados gruesos razonablemente bien formados, bien graduados desde grueso a fino mezcla; son para concreto que contiene agregados de tamaño máximo nominal no mayores de 25 mm.

“Se dan recomendaciones adicionales para el contenido de aire y las tolerancias necesarias sobre el contenido de aire para el control en el campo en varios documentos ACI, incluidos ACI 201, 345, 318, 301 y 302. ASTM C 94 para concreto premezclado también da límites de contenido de aire. Es posible que los requisitos de otros documentos no siempre coincidan exactamente, por lo que, al dosificar, se debe considerar seleccionar un contenido de aire que satisfaga las necesidades del trabajo y también las especificaciones aplicables.

**Para concreto que contiene agregados grandes que se tamizarán en húmedo sobre el tamiz de 38 mm antes de la prueba de aire contenido, el porcentaje de aire esperado en el material de 38 mm menos debe estar tabulado en la columna de 38 mm. Sin embargo, los cálculos iniciales de dosificación deben incluir el contenido de aire como porcentaje del total.

††Cuando se usan agregados grandes en concreto con bajo factor de cemento, la incorporación de aire no tiene por qué ser perjudicial para la resistencia. En la mayoría de los casos, el requerimiento de agua de mezcla se reduce lo suficiente como para mejorar la relación agua-cemento y así compensar para el efecto reductor de la resistencia del hormigón con aire incorporado. Generalmente, por lo tanto, para estos grandes tamaños máximos nominales de agregado, se deben considerar los contenidos de aire recomendados para una exposición extrema, aunque pueda haber poca o sin exposición a la humedad y la congelación.

‡‡Estos valores se basan en el criterio de que se necesita un 9 por ciento de aire en la fase de mortero del hormigón si el mortero será sustancialmente diferente del determinado en esta práctica recomendada, puede ser deseable calcular el contenido de aire necesario tomando el 9 por ciento del volumen real de mortero.

➤ Selección de Relación Agua/Cemento (Paso 5)

La relación A/C requerida se determina no sólo por los requisitos de resistencia, sino también por otros factores como la durabilidad y las propiedades del acabado. Puesto que diferentes agregados y cementos producen, generalmente, distintas resistencias empleando la misma relación A/C, es muy deseable establecer una relación entre la resistencia y la relación A/C para los materiales que de hecho van a emplearse. En ausencia de estos datos, valores aproximados y relativamente conservadores para hormigón elaborado con cemento Portland. Con materiales comunes, las relaciones A/C tabuladas deben producir las resistencias indicadas, con base en pruebas a los 28 días de especímenes curados bajo condiciones estándar de laboratorio. La resistencia promedio seleccionada debe por supuesto exceder de la resistencia especificada por un margen suficiente para mantener dentro de los límites especificados las pruebas con bajos valores.

Los valores de relación agua cemento a ser usados están dados en la tabla 20.

Tabla 20.

Relación agua/cemento (A/C) y la resistencia a la compresión del hormigón.

Resistencia a la compresión a los 28 días, kg/cm ²	Relación agua/cemento (A/C) por peso	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	---
350	0.48	0.4
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Fuente: (ACI 211.1).

Los valores son resistencias promedio estimadas para hormigón que no contiene más del 2% de aire para hormigón sin aire incluido y 6% de contenido total de aire para hormigón con aire incluido. Para una relación A/C constante se reduce la resistencia del hormigón en la medida que el contenido de aire es incrementado. Las relaciones dadas en esta tabla asumen un tamaño nominal máximo del agregado de 3/4" a 1". Para una fuente de agregados dada, la resistencia producirá una relación A/C que se incrementará en la medida que se reduzca el tamaño máximo del agregado.

Para condiciones de exposición severas la relación A/C debe mantenerse baja, aun cuando los requerimientos de resistencia puedan cumplirse con valores mayores. En la Tabla 21 se muestran los valores límite.

Tabla 21.*Máxima Relaciones A/C Permisibles para Hormigón Expuesto a Condiciones Severas.*

Tipo de estructura	Estructura continua o frecuentemente mojada y expuesta a congelación y deshielo	Estructura expuesta al agua de mar o a sulfatos
Secciones esbeltas (barandales, guarniciones, umbrales, ménsulas, trabajos ornamentales) y secciones con menos de 3 cm de recubrimiento sobre el acero de refuerzo	0.45	0.4
Todas las demás estructuras	0.5	0.45

Fuente: (ACI 211.1).

➤ **Cálculo del Contenido de Cemento (Paso 6)**

El contenido de cemento se calcula con la cantidad de agua, determinada en el paso cuatro, y la relación agua cemento, obtenida en el paso cinco; cuando se requiera un contenido mínimo de cemento o los requisitos de durabilidad lo especifiquen, la mezcla se deberá basar en un criterio que conduzca a una cantidad mayor de cemento.

➤ **Estimación del Contenido de Grava (Paso 7)**

Los agregados de esencialmente el mismo tamaño máximo nominal y granulometría producen hormigones de trabajabilidad satisfactoria cuando se emplea un volumen dado de agregado grueso por volumen unitario de hormigón, con base en el Peso Unitario Seco Varillado. En la Tabla 23 aparecen valores apropiados para estos volúmenes de agregado. Puede observarse que, para igual trabajabilidad, el volumen de agregado grueso en volumen unitario de hormigón depende únicamente de su tamaño máximo y del módulo de finura del agregado fino. En la Tabla 23 se muestra el volumen de agregado en metros cúbicos, con

base al varillado en seco, para un metro cúbico de hormigón. Este volumen se convierte a peso seco del agregado grueso requerido en un metro cúbico de hormigón, multiplicándolo por el Peso Unitario Varillado en seco por metro cúbico de agregado grueso. Para obtener un hormigón de buena trabajabilidad, es reducir aproximadamente en 10% el contenido estimado de agregado grueso determinado de la tabla 22.

Tabla 22.

Volumen de agregado grueso por volumen unitario de hormigón.

Tamaño máximo nominal de agregado, (mm)	Volumen de agregado grueso* varillado en seco, por volumen unitario de hormigón para distintos módulos de finura de arena			
	2.4	2.6	2.8	3
10	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
20	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
40	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
70	0.82	0.80	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: (ACI 211.1).

➤ **Estimación del Contenido de Arena (paso 8)**

El agregado fino, cuya cantidad se determina por diferencia. Puede emplearse cualquiera de los dos procedimientos siguientes:

- a) Método de Peso del hormigón por unidad de volumen.
- b) Método de volumen absoluto ocupado por los ingredientes del hormigón.

Procedimiento:

a) Método de Peso del hormigón por unidad de volumen

Si el peso del hormigón por volumen unitario se supone o puede estimarse por experiencia, el peso requerido del agregado fino es, simplemente, la diferencia entre el peso del hormigón fresco y el peso total de los demás componentes. A menudo se conoce con bastante precisión el peso unitario del hormigón, por experiencia previa con los materiales. En ausencia de dicha información, puede emplearse la tabla 23 para hacer un cálculo tentativo. Aun si el cálculo del peso del hormigón por metro cúbico es aproximado, las proporciones de la mezcla serán suficientemente precisas para permitir un ajuste fácil con base en mezclas de prueba.

Tabla 23.

Primera estimación del peso del hormigón fresco.

Tamaño máximo nominal de agregado, (mm)	Primera estimación del peso del hormigón fresco, kg/m ³	
	hormigón sin aire incluido	hormigón con aire incluido
10	2285	2190
12.5	2315	2235
20	2355	2280
25	2375	2315
40	2420	2355
50	2445	2375
70	2465	2400
150	2505	2435

Fuente: (ACI 211.1)

b) Método de volumen absoluto ocupado por los ingredientes del hormigón

Un procedimiento más exacto para calcular la cantidad requerida de agregados finos, implica el empleo de volúmenes desplazados por los componentes. En este caso, el volumen total

desplazado por los componentes conocidos (agua, aire, cemento y agregado grueso) se resta del volumen unitario de hormigón para obtener el volumen requerido de agregado fino.

El volumen ocupado por cualquier componente en el hormigón es igual a su peso dividido entre la densidad de este material (siendo ésta el producto de la Gravedad Específica del agua por el Peso Específico del material).

➤ **Ajustes por Humedad de los Agregados (Paso 9)**

Las cantidades de agregado que realmente deben pesarse para el hormigón, deben considerar la humedad del agregado. Los agregados están generalmente húmedos y sus pesos secos deben incrementarse con el porcentaje de agua que contienen ya sea absorbida o libre en la superficie. Por lo tanto, el agua de mezclado será corregida dependiendo de los valores de humedad y absorción que tengan los agregados, así:

Si $\text{Absorción (\%)} > \text{Humedad (\%)}$, el agregado absorberá agua del agua de mezclado obtenido de la Tabla 20, por lo tanto, hay necesidad de agregar una cantidad de agua equivalente a la diferencia entre la absorción y la humedad de los agregados a fin de evitar que este consumo adicional de agua se refleje en mezclas poco manejables.

Si $\text{Absorción (\%)} < \text{Humedad (\%)}$, el agregado aportará agua al agua de mezclado, por lo tanto, hay necesidad de disminuir el agua de mezclado en una cantidad equivalente a la diferencia entre la humedad y la absorción a fin de evitar que la mezcla a elaborar sobrepase el revenimiento previsto.

Si $\text{Absorción (\%)} = \text{Humedad (\%)}$, no se debe realizar ningún ajuste ya que los valores de la Tabla 13 son calculados bajo esta condición.

2.3.1.10 Ensayo de Resistencia a la Compresión del Hormigón (ASTM C 39)

Este ensayo permite la determinación de la resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos de hormigones moldeados en laboratorio o en campo obtenido por medio de la extracción de núcleos. Se limita a hormigones con peso unitario mayor que 800 kg/m³.

Se necesita ser cuidadoso en la interpretación del significado para determinar la resistencia a la compresión por este método de ensayo, porque la resistencia no es una propiedad fundamental o intrínseca del hormigón hecho con materiales dados. Los valores obtenidos dependerán del tamaño y forma del espécimen, revoltura, procedimiento de mezclado, los métodos de muestreo, moldeo, fabricación y edad, temperatura y condiciones de humedad durante el curado.

2.3.1.10.1 Tipos de Fallas en Cilindros Sometidos a Compresión

Según la norma ASTM C39 hay seis tipos de fallas que depende de muchos factores como lo son: la formación de los conos, confinamiento de las partículas, nivelación de los cabezales, entre otros. En la figura 11 se muestran los tipos de fallas que se presentaron en los ensayos.

Cuando se usa refrentado con placas de neopreno pueden ocurrir fallas en las esquinas antes de alcanzar la capacidad última de la probeta, del Tipo 5 o 6. Continúe comprimiendo la probeta hasta asegurarse que se ha alcanzado la capacidad última.

El ensaye de compresión presenta siete diferentes tipos de falla figura 11 por diferentes causas:

El tipo de falla No 1 se tiene cuando la carga de compresión es aplicada correctamente sobre un espécimen cilíndrico bien preparado.

El tipo de falla No 2 se presenta cuando las caras de aplicación de carga se encuentran en el límite de la tolerancia especificada o lo exceden.

El tipo de falla No 3 se origina cuando existe concavidad en el equipo que se utiliza ya sea el plato de cabeceo o la placa de aplicación de carga.

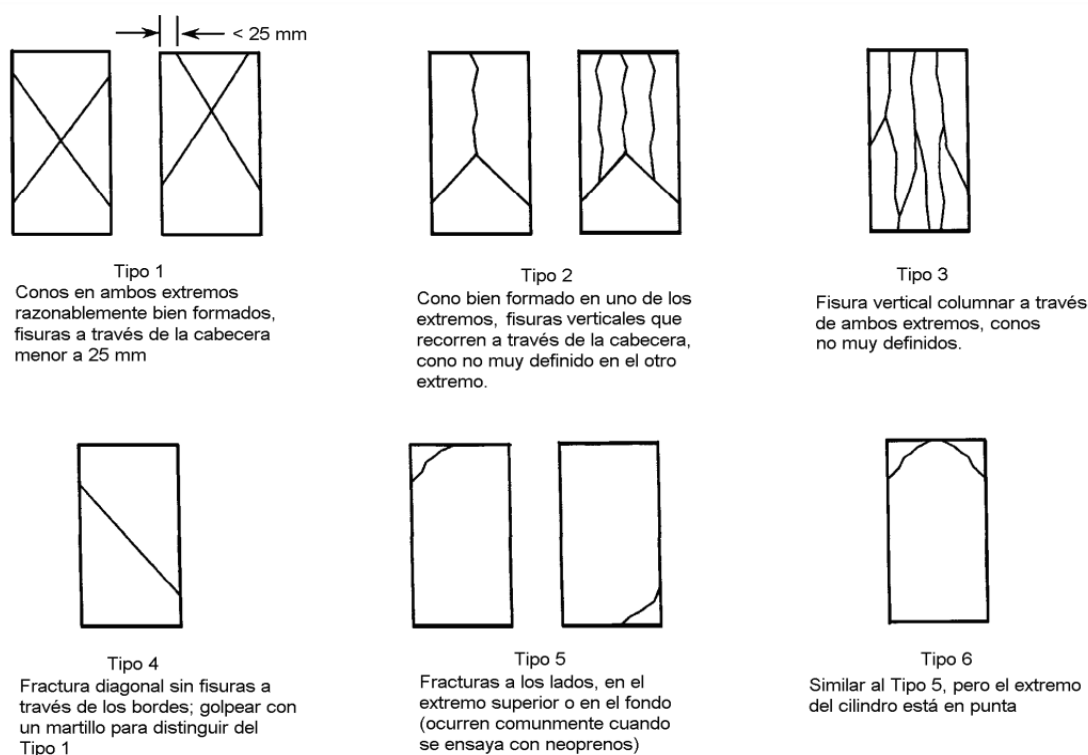
El tipo de falla No 4 se exhibe cuando alguna de las caras del espécimen se encuentra cóncava, cuando el material de cabeceo es deficiente o bien cuando alguno de los equipos que se utilizan presentan deficiencias de concavidad.

El tipo de falla No 5 se produce cuando la superficie de aplicación de carga no es totalmente plana y la carga es puntual en algunas partes, esto ocurre cuando el material de cabeceo es deficiente, los platos cabeceadores se encuentran dañados o bien cuando las placas de aplicación de carga tienen deficiencias.

El tipo de falla No 6 se ocasiona cuando alguna de las caras del espécimen se encuentra convexa, el material de cabeceo es deficiente, el plato cabeceador se encuentra dañado o bien las placas de aplicación de carga tienen deficiencias.

Figura 11.

Esquema de los modelos típicos de fracturas.



Fuente: (ASTM C39).

2.3.1.10.2 Guía para evaluación de resultados de la prueba de resistencia del concreto (ACI 214R-11).

Esta guía proporciona una introducción a la evaluación de resultados de las pruebas de resistencia del hormigón. Los procedimientos descritos son aplicables a los resultados de la prueba de resistencia a la compresión requeridos por ACI 301, ACI 318 y especificaciones y

códigos similares. Los conceptos estadísticos descritos son aplicables para el análisis de otros resultados comunes de pruebas de hormigón, incluida la flexión resistencia, revenimiento, contenido de aire, densidad, módulo de elasticidad, y otras pruebas utilizadas para evaluar el concreto y los ingredientes materiales. Esta guía asume que los resultados de las pruebas concretas ajustarse a una distribución normal.

2.3.1.10.2.1 Indicadores Estadísticos

De aquí en adelante se define como una prueba, el promedio de la resistencia de 2 cilindros, hechos de la misma mezcla de concreto a la edad especificada.

Para un análisis estadístico es recomendable utilizar al menos 30 pruebas, sin embargo, existe la posibilidad de utilizar menos de 30 datos, siempre que se considere un factor corrección en la desviación estándar, dada por la tabla 5.3.1.2 del Código AC1-318.

Para los efectos del análisis estadístico, debe definirse las siguientes variables de control, que se utilizan.

$f'_{cr} \geq$ resistencia promedio requerida, para asegurarse de que sólo aquella porción permisible de pruebas caerá por debajo de la resistencia especificada.

$f'_c \geq$ Resistencia especificada.

s = Desviación estándar.

t = Multiplicador constante para la desviación estándar, que depende del número de pruebas que se espera caigan por debajo de f'_c .

V = Coeficiente de variación.

2.3.1.10.2.2 Control De Calidad

De acuerdo a la sección 5.6.3.3 del AC1- 318R, el nivel de resistencia de una clase individual de concreto será considerado satisfactorio si cumple con los siguientes requerimientos:

El promedio aritmético de cualquiera de tres pruebas consecutivas es igual o superior a la resistencia especificada f'_c .

Ningún resultado individual de la prueba de resistencia (promedio de dos cilindros) será menor que f'_c por más de 3.5 N/mm^2 , si f'_c es menor o igual a 35 N/mm^2 o por más de $0.10 f'_c$, si es mayor de 35 N/mm^2

Por otra parte, de acuerdo a los criterios del Comité AC1 214R, las variaciones en la resistencia pueden ser evaluadas mediante un análisis estadístico, tomando en cuenta la

desviación estándar y el coeficiente de variación, los cuales se pueden asociar el grado de control del concreto en el proyecto.

En este caso, la desviación estándar y coeficiente de variación para una resistencia especificada $f'c \leq$ de 35 N/mm² (5000 psi), para control en laboratorio y campo de concreto, son los expuestos en la tabla 24.

Tabla 24.

Estándares de control de concreto para $f'c \leq$ de 35 Mpa (5000 psi).

DISPERSIÓN TOTAL					
Clase de operación	Desviación Estándar para diferentes grados de control (Mpa)				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Suficiente	Deficiente
Concreto en Obra	< 2.8	2.8 a 3.4	3.4 a 4.1	4.1 a 4.8	> 4.8
Concreto en laboratorio	< 1.4	1.4 a 1.7	1.7 a 2.1	2.1 a 2.4	> 2.4
DISPERSIÓN ENTRE TESTIGOS					
Clase de operación	Coeficiente de variación V para diferentes grados de control (%)				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Suficiente	Deficiente
Concreto en Obra	< 3	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	5.0 a 6.0	> 6
Concreto en laboratorio	< 2	2.0 a 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	> 5

Fuente: (ACI 214, 2011).

De manera similar existen desviaciones y coeficientes de variación recomendados para $f'c >$ de 34.5 Mpa.

2.4 Medios y Materiales

Máquina de Ensayos de Compresión:

El equipo que permite la realización de ensayos convencionales de compresión y que también permite calcular el módulo de rigidez en probetas cilíndricas y en testimonios de construcción.

Ensayos de resistencia a la compresión EN 12390, EN 772-1, ASTM C39, ASTM C133, ISO 4012 (sustituida por ISO 1920-4), etc.

Ensayos de resistencia a la flexión EN 12390-5, ASTM C78, ASTM C293, ISO 4013 (sustituida por ISO 1920-4), etc.

Fuentes y Técnicas para la Recolección y Tratamiento de la Información

Metodología para obtención de vidrio molido.

Tratamiento del Vidrio

El vidrio a utilizar se obtendrá del reciclaje de botellas sin hacer distinción del color, procedencia, forma, ni contenidos previos, esto se deberá recolectar de lugares estratégicos como puede ser restaurantes, discotecas, avenidas concurridas, lugares donde se vea más desechos de botellas de vidrio.

Limpieza de las Botellas

Al tener las botellas de vidrio se debe seguir los siguientes pasos para tener una óptima limpieza de ellas:

- Se reunirá todas las botellas de vidrio para triturarlas.
- Se deben retirar las etiquetas o pegatinas existentes de las botellas.
- Lavar bien las botellas con jabón y agua tibia para eliminar cualquier residuo de su uso anterior.
- Enjuague las botellas con agua limpia para asegurarse de eliminar todos los residuos de jabón.

- Se dejó que las botellas se sequen al aire por completo, tanto por dentro como por fuera.
- Inspeccione cada botella para asegurarse de que no queden rastros de residuos o humedad.
- Guarde las botellas limpias y secas en un lugar seguro y seco hasta que estén listas para triturarlas.

Trituración del Vidrio

Se realizará la trituración mediante herramientas artesanales como martillo y equipos de protección para la persona. El resultado del proceso de trituración debe tener una textura similar a la arena.

Para la trituración del vidrio se siguió los siguientes pasos:

- Reunir las herramientas y el equipo de seguridad necesarios, incluidos un martillo, gafas de seguridad y guantes.
- Se colocó el vidrio a triturar sobre una superficie dura, asegurándose de quitar cualquier elemento que no sea de vidrio.
- Con las gafas de seguridad y los guantes puestos, se golpeó firmemente el vidrio con un martillo hasta que se rompa en pequeños pedazos del tamaño de la arena.
- Una vez que se trituró el vidrio, se usó un tamiz para separar las piezas de vidrio más grandes de las partículas vidrio más pequeñas.
- Se guardó el vidrio molido reciclado en un recipiente apropiado para uso futuro.

CAPÍTULO III

CAPÍTULO III

3 Desarrollo de la Investigación

3.1 Recolección de Datos

Para la elaboración de la dosificación de las probetas de hormigón, se debe realizar ensayos a los agregados:

- Análisis Granulométrico del Agregado Grueso
- Análisis Granulométrico del Agregado Fino.
- Análisis Granulométrico del Vidrio.
- Densidad Aparente “Peso Unitario” del Agregado Grueso.
- Densidad Aparente “Peso Unitario” del Agregado Fino.
- Densidad Aparente “Peso Unitario” del Vidrio.
- Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso.
- Peso Específico y Absorción del Agregado Fino.
- Peso Específico del Vidrio.
- Peso Específico del Cemento.
- Contenido de Humedad de los Agregados
- Dosificación del Hormigón.

Procedencia de los Agregados

Los agregados utilizados en este estudio se recolectaron de la Chancadora del Temporal la cual extrae el material del río Guadalquivir.

Figura 12.

Planta chancadora de áridos el Temporal.



Fuente: Elaboración propia con el uso del software Google Earth.

Análisis Granulométrico

Se realiza el ensayo tanto de agregado grueso y fino haciéndolos pasar por los tamices de la norma ASTM C-136, con el objeto de verificar si son aptos para la elaboración de hormigón.

Análisis Granulométrico del Agregado Grueso

Para realizar el análisis granulométrico de agregado grueso se utiliza una muestra que sea representativa ya cuarteada y se utilizará 5 kg de acuerdo a lo especificado en la tabla 13.

Los resultados son mostrados en la tabla 25 y la figura 13.

Tabla 25.

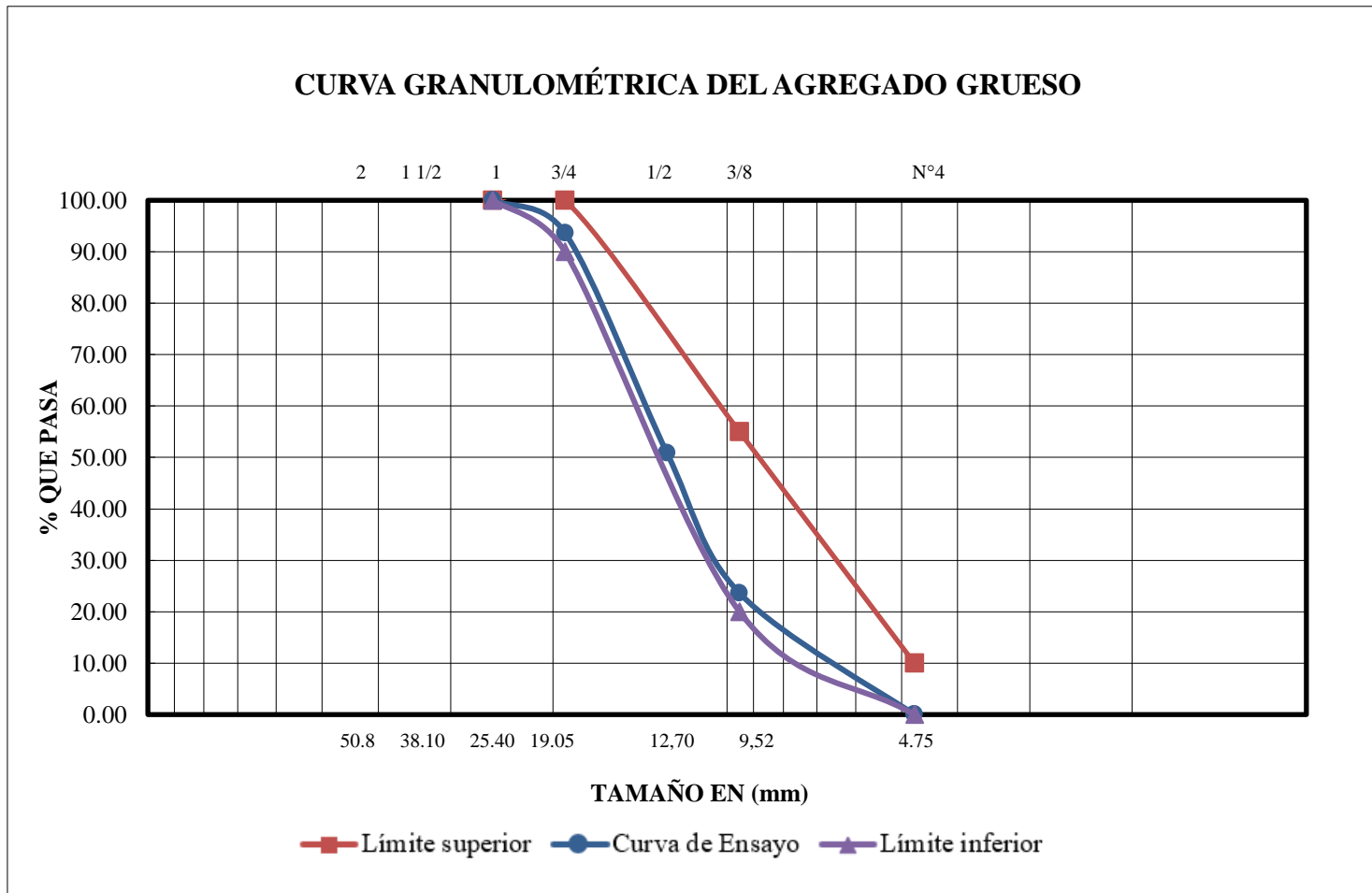
Granulometría del agregado grueso.

Peso Total (gr.) =		5000					
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Retenido Acumulado		% Que pasa del total	% Que pasa Especificación ASTM C-33	
			(gr)	(%)			
1"	25.40	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
3/4"	19.05	316.400	316.4	6.33	93.7	90	100
1/2"	12.70	2140.400	2456.80	49.14	50.9	-	-
3/8"	9.52	1362.100	3818.90	76.38	23.6	20	55
N° 4	4.75	1180.340	4999.24	99.98	0.0	0	10
base		0.500	4999.7	99.99	0.0		
Pérdidas							
% =	0.26						
T.M.	1"						
T.M. N	3/4"						

Fuente: Elaboración propia.

Figura 13.

Curva Granulométrica del Agregado Grueso.



Fuente: Elaboración propia.

Análisis granulométrico del agregado fino

Para realizar el análisis granulométrico del agregado fino se utilizó una muestra representativa de 1000 gr que se muestra en la tabla 26 y también se ilustra en la figura 14.

Tabla 26.

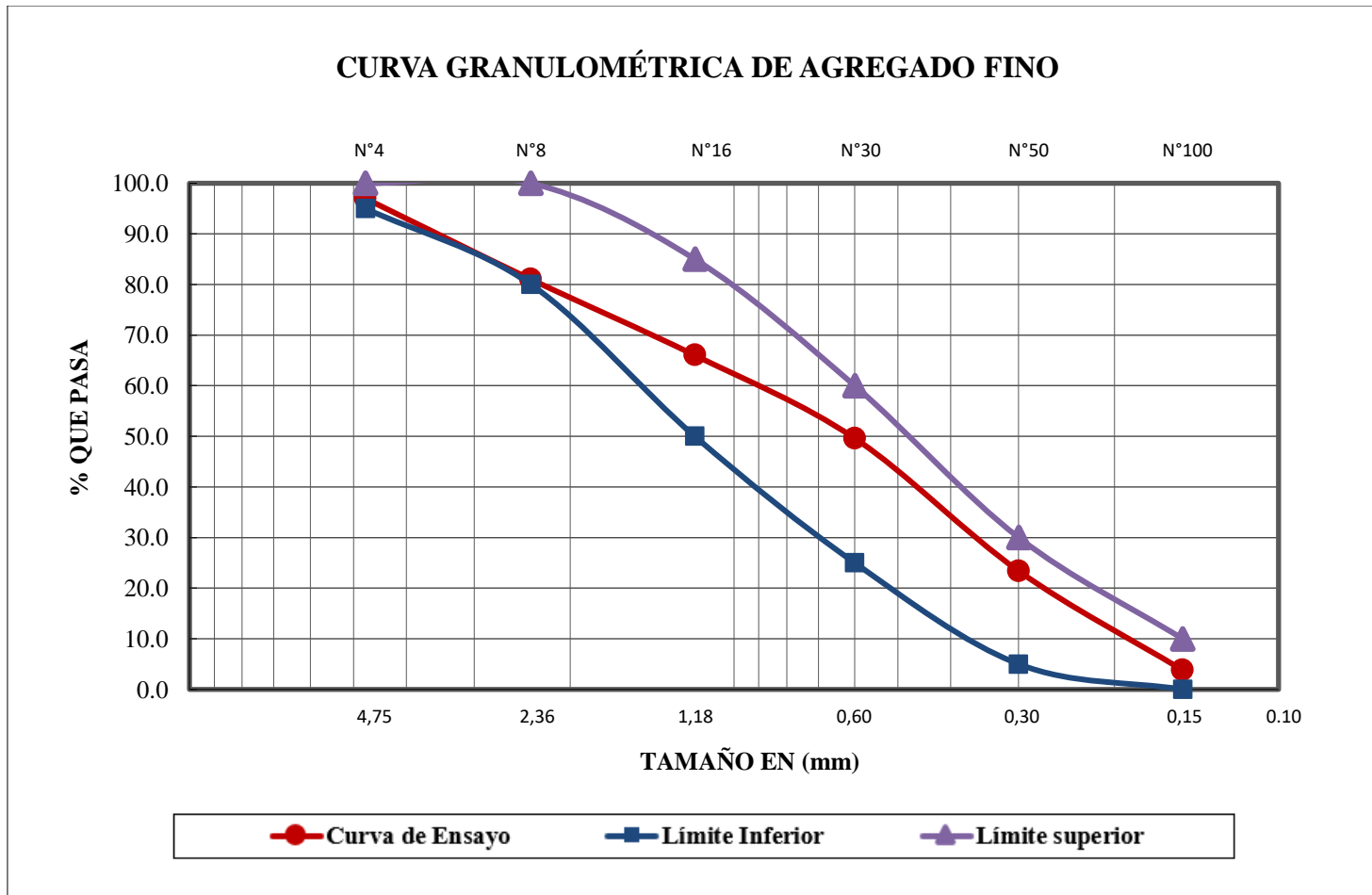
Granulometría del Agregado Fino.

Peso Total (gr.)=			1000				
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum. (gr)	% Ret. Acumulado	% que pasa del total	Especificación ASTM C-33	
N°4	4.75	30.20	30.20	3.02	97.0	95	100
N°8	2.36	159.60	189.80	18.98	81.0	80	100
N°16	1.18	150.10	339.90	33.99	66.0	50	85
N°30	0.60	164.00	503.90	50.39	49.6	25	60
N°50	0.30	262.20	766.10	76.61	23.4	5	30
N°100	0.15	195.70	961.80	96.18	3.8	0	10
Base		38.20	1000.00	100.00	0.0	-	-
SUMA		1000.00					
PÉRDIDAS		0.0					
MF =		2.79					

Fuente: Elaboración propia.

Figura 14.

Curva granulométrica del agregado fino.



Fuente: Elaboración propia.

Análisis Granulométrico del Agregado Fino Vidrio

Para realizar el análisis granulométrico del agregado fino vidrio se utilizó una muestra representativa de 1000 gr que se muestra en la tabla 27 y también se ilustra en la figura 15.

Tabla 27.

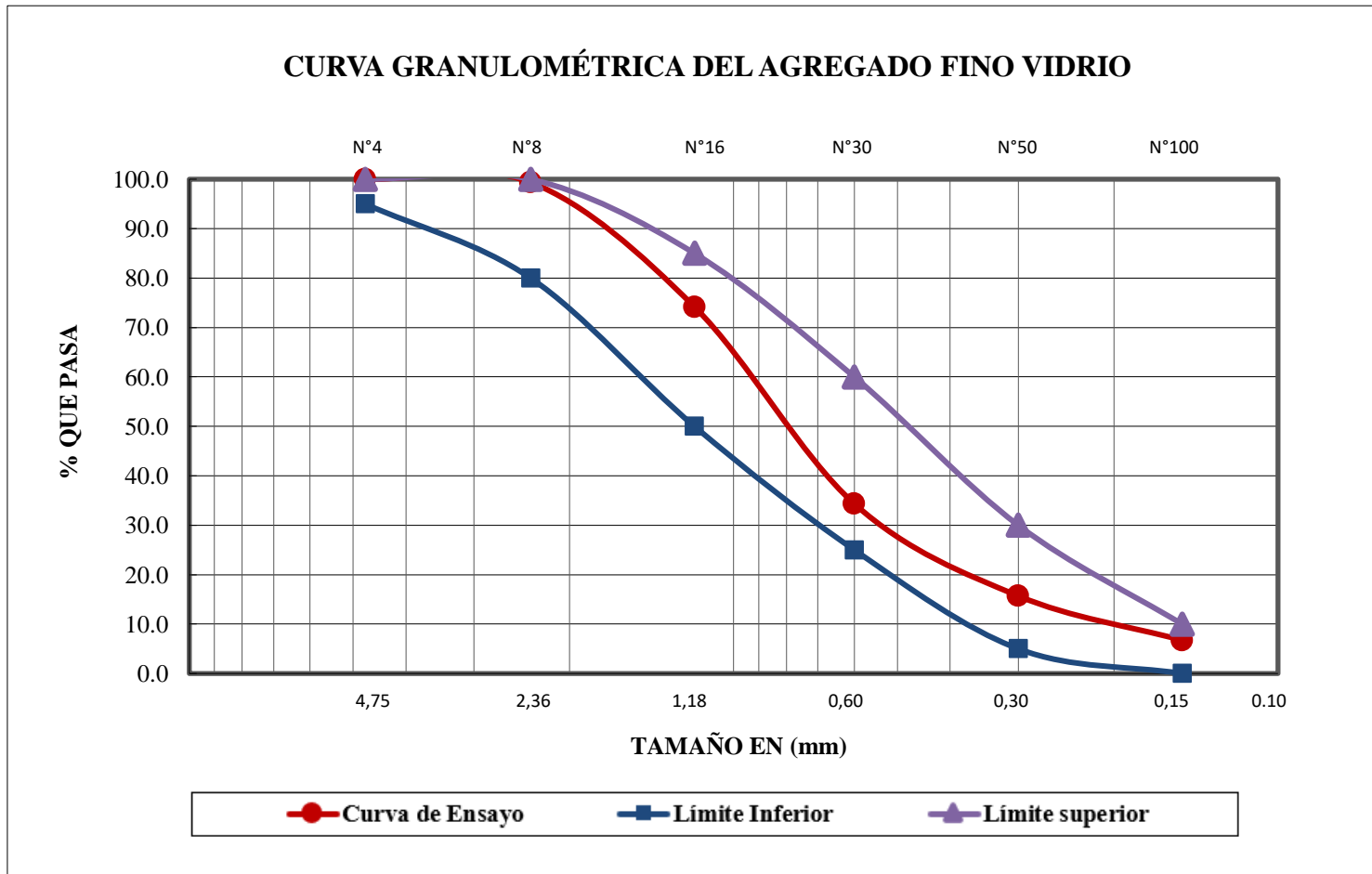
Granulometría del vidrio.

Peso Total (gr.)=			1000				
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum. (gr)	% Ret. Acumulado	% que pasa del total	Especificación ASTM C-33	
N°4	4.75	0.00	0.00	0.00	100.0	95	100
N°8	2.36	6.40	6.40	0.64	99.4	80	100
N°16	1.18	251.90	258.30	25.83	74.2	50	85
N°30	0.60	398.50	656.80	65.68	34.3	25	60
N°50	0.30	186.20	843.00	84.30	15.7	5	30
N°100	0.15	89.70	932.70	93.27	6.7	0	10
Base		67.30	1000.00	100.00	0.0	-	-
SUMA		1000.00					
PÉRDIDAS		0.0					
MF =		2.70					

Fuente: Elaboración propia.

Figura 15.

Curva granulométrica del vidrio.



Fuente: Elaboración propia.

Análisis Granulométrico del Agregado Fino con 10% de Vidrio como Sustituto de la Arena

Para realizar el análisis granulométrico del agregado con 10% de vidrio como sustituto de la arena se utilizó una muestra representativa de 500 gr que se muestra los valores numéricos en la tabla 28 y también se ilustra en la figura 16.

Tabla 28.

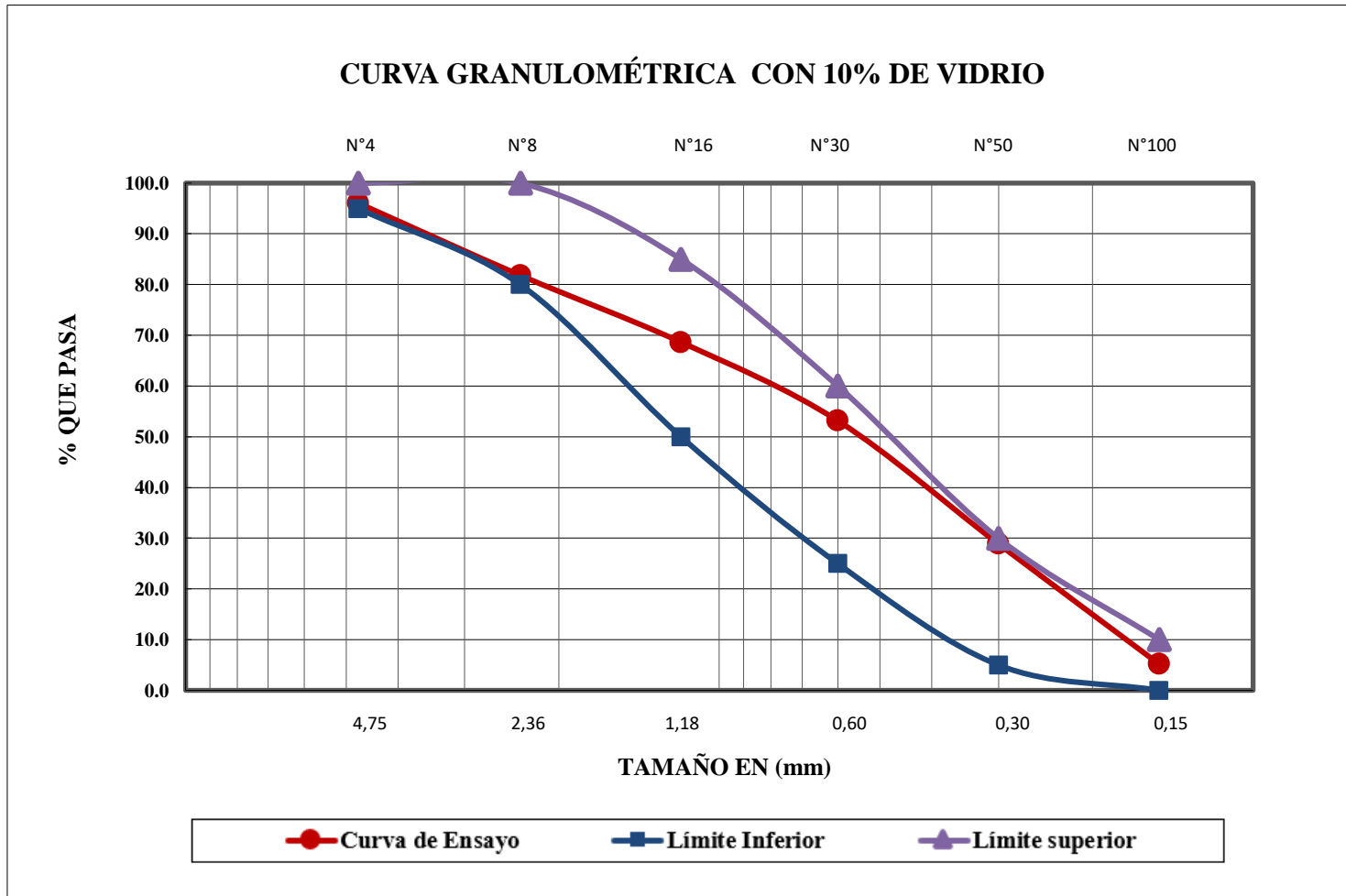
Granulometría del vidrio con 10% de vidrio como sustituto de la arena.

Peso Total (gr.) =			500				
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	% que pasa del total	Especificación ASTM C-33	
N°4	4.75	19.70	19.70	3.94	96.1	95	100
N°8	2.36	71.20	90.90	18.18	81.8	80	100
N°16	1.18	65.90	156.80	31.36	68.6	50	85
N°30	0.60	77.40	234.20	46.84	53.2	25	60
N°50	0.30	121.40	355.60	71.12	28.9	5	30
N°100	0.15	118.50	474.10	94.82	5.2	0	10
Base		25.10	499.20	99.84	0.2	-	-
SUMA		499.20					
PÉRDIDAS		0.8					
MF =		2.66					

Fuente: Elaboración propia.

Figura 16.

Curva granulométrica de 10 % vidrio como sustituto parcial del agregado fino.



Fuente: Elaboración propia.

Análisis Granulométrico del Agregado Fino con 20% de Vidrio como Sustituto de la Arena

Para realizar el análisis granulométrico del agregado con 20% de Vidrio como sustituto de la arena se utilizó una muestra representativa de 500 gr que se muestra los valores numéricos en la tabla 29 y también se enseña en la figura 17.

Tabla 29.

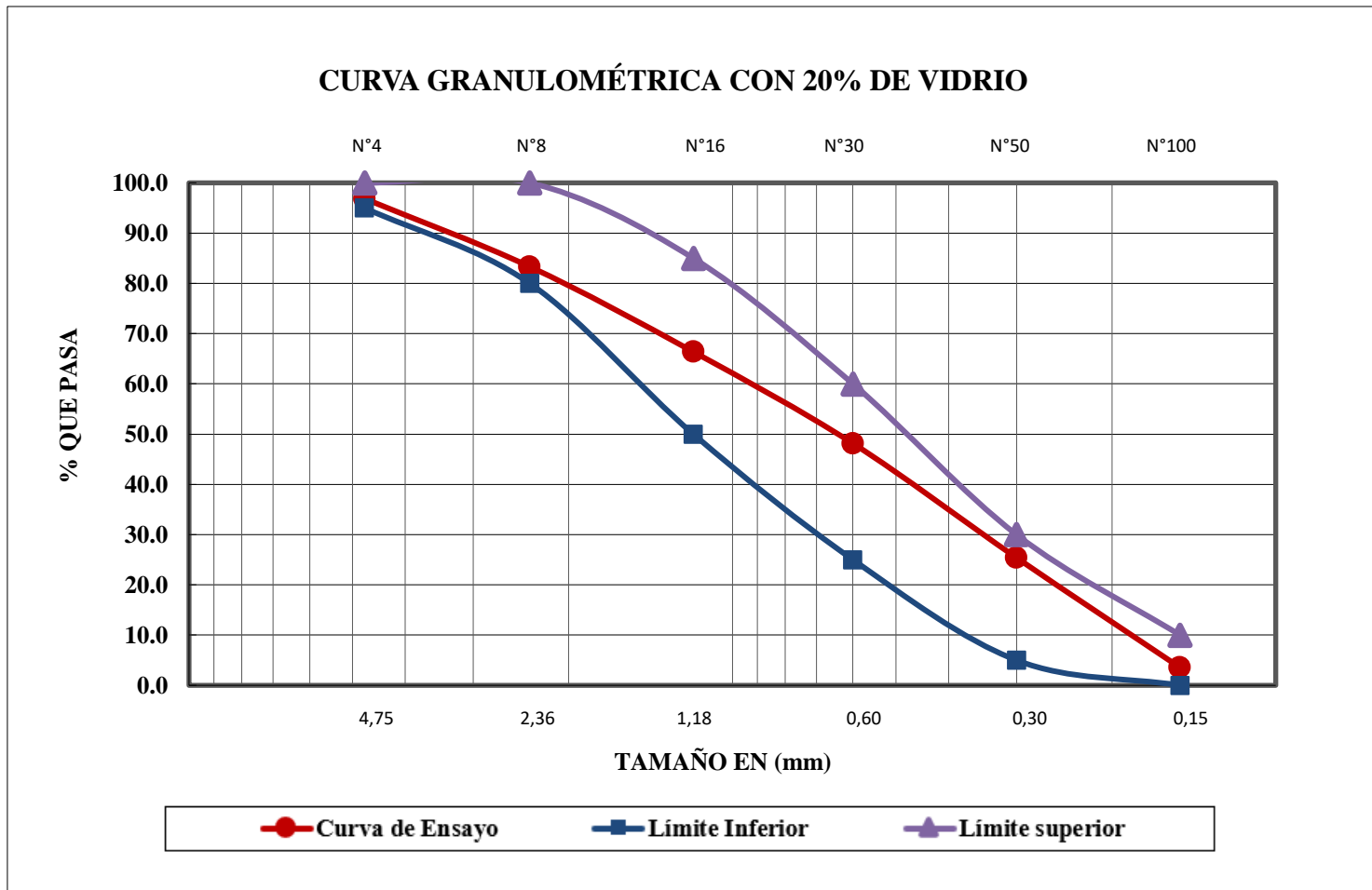
Granulometría del vidrio con 20% de vidrio como sustituto de la arena.

Peso Total (gr.)=			500				
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	% que pasa del total	Especificación ASTM C-33	
N°4	4.75	15.80	15.80	3.16	96.80	95	100
N°8	2.36	67.60	83.40	16.68	83.30	80	100
N°16	1.18	84.70	168.10	33.62	66.40	50	85
N°30	0.60	91.20	259.30	51.86	48.10	25	60
N°50	0.30	113.70	373.00	74.60	25.40	5	30
N°100	0.15	109.30	482.30	96.46	3.50	0	10
Base		17.40	499.70	99.94	0.10	-	-
SUMA		499.70					
PÉRDIDAS		0.3					
MF =		2.76					

Fuente: Elaboración propia.

Figura 17.

Curva granulométrica de 20% vidrio como sustituto parcial del agregado fino.



Fuente: Elaboración propia.

Análisis Granulométrico del Agregado Fino con 30% de Vidrio como Sustituto de la Arena

Para realizar el análisis granulométrico del agregado con 30% de Vidrio como sustituto de la arena se utilizó una muestra representativa de 500 gr que se muestra los valores numéricos en la tabla 30 y también se ilustra en la figura 18.

Tabla 30.

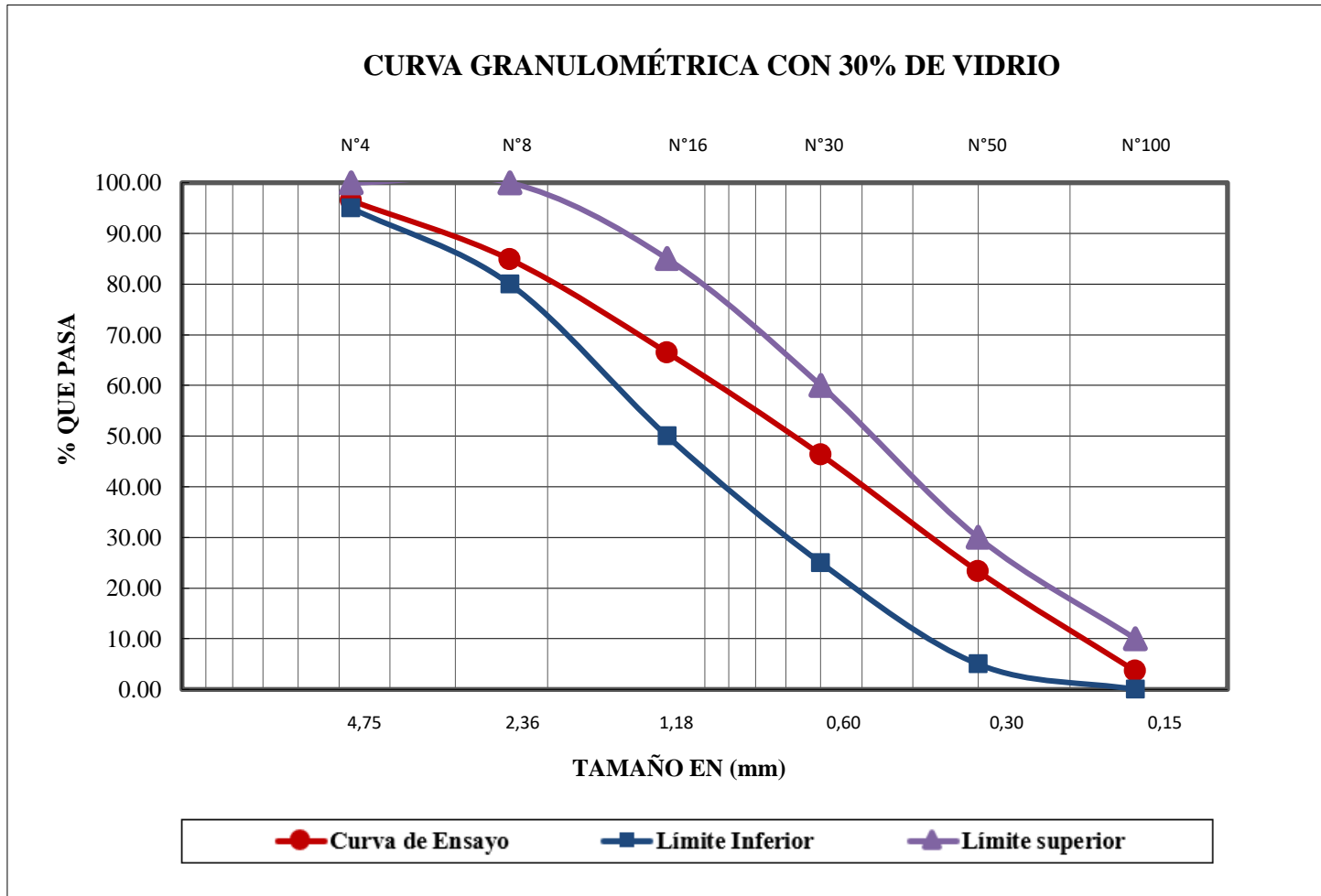
Granulometría del vidrio con 30% de vidrio como sustituto de la arena.

Peso Total (gr.)=			500				
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	% que pasa del total	Especificación ASTM C-33	
N°4	4.75	17.5	17.50	3.50	96.50	95	100
N°8	2.36	58.13	75.63	15.13	84.87	80	100
N°16	1.18	92	167.63	33.53	66.47	50	85
N°30	0.60	100.7	268.33	53.67	46.33	25	60
N°50	0.30	115.1	383.43	76.69	23.31	5	30
N°100	0.15	98.4	481.83	96.37	3.63	0	10
Base		17.20	499.03	99.81	0.19	-	-
	SUMA	499.03					
	PÉRDIDAS	1.0					
	MF =	2.79					

Fuente: Elaboración propia.

Figura 18.

Curva granulométrica de 30 % vidrio como sustituto parcial del agregado fino.



Fuente: Elaboración propia.

Análisis Granulométrico del Agregado Fino con 40% de Vidrio como Sustituto de la Arena

Para realizar el análisis granulométrico del agregado con 40% de Vidrio como sustituto de la arena se utilizó una muestra representativa de 500 gr que se muestra los valores numéricos en la tabla 31 y también se ilustra en la figura 19.

Tabla 31.

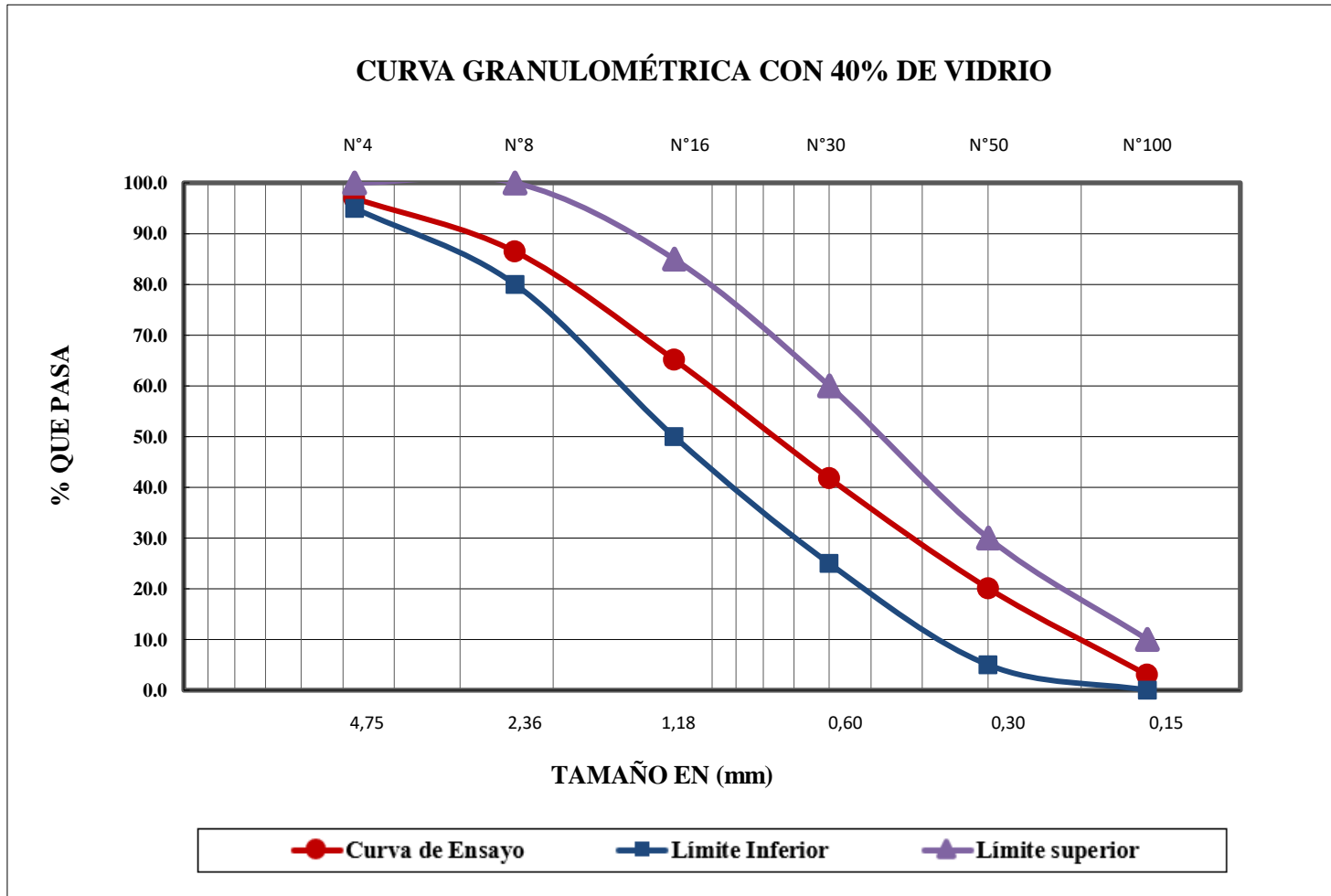
Granulometría del vidrio con 40% de vidrio como sustituto de la arena.

Peso Total (gr.)=			500				
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret.	% que pasa del total	Especificación ASTM C-33	
N°4	4.75	15.20	15.20	3.04	97.00	95	100
N°8	2.36	52.60	67.80	13.56	86.40	80	100
N°16	1.18	106.40	174.20	34.84	65.20	50	85
N°30	0.60	117.00	291.20	58.24	41.80	25	60
N°50	0.30	108.40	399.60	79.92	20.10	5	30
N°100	0.15	85.30	484.90	96.98	3.00	0	10
Base		14.20	499.10	99.82	0.20	-	-
SUMA		499.10					
PÉRDIDAS		0.9					
MF =		2.87					

Fuente: Elaboración propia.

Figura 19.

Curva granulométrica de 40 % vidrio como sustituto parcial del agregado fino.



Fuente: Elaboración propia.

Densidad Aparente "Peso Unitario" del Agregado Grueso.

Este tipo de ensayo permite calcular los huecos entre las partículas del agregado grueso tanto en estado suelto y compactado, los resultados son mostrados en la tabla 32 y tabla 33.

Peso Unitario Suelto

Tabla 32.

Peso unitario suelto.

Muestra N.º	Peso recipiente (Kg)	Volumen del recipiente "v" (m ³)	Peso Recipiente + muestra suelta (Kg)	Peso muestra suelta (Kg)	Peso unitario suelto (KN/m ³)
1	5.85	0.0099	20.84	14.99	15.13
2	5.85	0.0099	20.75	14.90	15.04
3	5.85	0.0099	20.55	14.70	14.84
Promedio =					15.00

Fuente: Elaboración propia.

Peso Unitario Compactado

Tabla 33.

Peso unitario compactado.

Muestra N.º	Peso recipiente (Kg)	Volumen del recipiente "v" (m ³)	Peso Recipiente + muestra compactada (Kg)	Peso muestra compactada (Kg)	Peso unitario compactado (KN/m ³)
1	5.85	0.0099	21.60	15.75	15.90
2	5.85	0.0099	21.59	15.74	15.89
3	5.85	0.0099	21.56	15.71	15.86
Promedio =					15.88

Fuente: Elaboración propia.

Densidad Aparente "Peso Unitario" del Agregado Fino.

Este tipo de ensayo permite calcular los huecos entre las partículas del agregado fino tanto en estado suelto y compactado, los resultados son mostrados en la tabla 34 y tabla 35.

Peso Unitario Suelto

Tabla 34.

Peso unitario suelto.

Muestra N°	Peso recipiente (Kg)	Volumen del recipiente "v" (m ³)	Peso Recipiente + muestra suelta (Kg)	Peso muestra suelta (Kg)	Peso unitario suelto (KN/m ³)
1	2.61	0.0030	7.39	4.78	16.15
2	2.61	0.0030	7.40	4.79	16.17
3	2.61	0.0030	7.37	4.76	16.08
Promedio =					16.13

Fuente: Elaboración propia.

Peso Unitario Compactado

Tabla 35.

Peso unitario compactado.

Muestra N°	Peso recipiente (Kg)	Volumen del recipiente "v" (m ³)	Peso Recipiente + muestra compactada (Kg)	Peso muestra compactada (Kg)	Peso unitario compactado (KN/m ³)
1	2.61	0.0030	7.60	4.99	16.86
2	2.61	0.0030	7.65	5.04	17.03
3	2.61	0.0030	7.70	5.09	17.18
Promedio =					17.02

Fuente: Elaboración propia.

Densidad Aparente "Peso Unitario" del Vidrio.

Este tipo de ensayo permite calcular los huecos entre las partículas del agregado fino vidrio tanto en estado suelto y compactado, los resultados son mostrados en las tablas 36 y 37.

Peso Unitario Suelto

Tabla 36.

Peso unitario suelto.

Muestra N°	Peso recipiente (Kg)	Volumen del recipiente "v" (m ³)	Peso Recipiente + muestra suelta (Kg)	Peso muestra suelta (Kg)	Peso unitario suelto (KN/m ³)
1	2.61	0.0030	6.46	3.85	13.01
2	2.61	0.0030	6.63	4.02	13.57
3	2.61	0.0030	6.77	4.16	14.06
Promedio =					13.54

Fuente: Elaboración propia.

Peso Unitario Compactado

Tabla 37.

Peso unitario compactado.

Muestra N°	Peso recipiente (Kg)	Volumen del recipiente "v" (m ³)	Peso Recipiente+ muestra suelta (Kg)	Peso muestra suelta (Kg)	Peso unitario suelto (KN/m ³)
1	2.61	0.0030	7.17	4.56	15.41
2	2.61	0.0030	7.02	4.41	14.88
3	2.61	0.0030	7.04	4.43	14.97
Promedio =					15.09

Fuente: Elaboración propia.

Densidad Aparente "Peso Unitario" de los distintos porcentajes de Vidrio como Sustituto de la Arena.

Este tipo de ensayo permite calcular los huecos entre las partículas del agregado fino vidrio como sustituto parcial de arena en distintos porcentajes tanto en estado suelto y compactado, los resultados son mostrados en la tabla 38 y tabla 39.

Peso Unitario Suelto

Tabla 38.

Peso unitario suelto.

Muestra N°	Porcentajes	Peso recipiente (Kg)	Volumen del recipiente "v" (m ³)	Peso Recipiente + muestra suelta (Kg)	Peso muestra suelta (Kg)	Peso unitario suelto (KN/m ³)
1	10%	2.61	0.003	7.35	4.74	16.02
1	20%	2.61	0.003	7.37	4.76	16.08
1	30%	2.61	0.003	7.23	4.62	15.59
1	40%	2.61	0.003	7.25	4.64	15.68

Fuente: Elaboración propia.

Peso Unitario Compactado

Tabla 39.

Peso unitario compactado.

Muestra N°	Porcentajes	Peso recipiente (Kg)	Volumen del recipiente "v" (m ³)	Peso Recipiente + muestra suelta (Kg)	Peso muestra suelta (Kg)	Peso unitario suelto (KN/m ³)
1	10%	2.61	0.003	7.55	4.94	16.68
1	20%	2.61	0.003	7.54	4.93	16.66
1	30%	2.61	0.003	7.53	4.92	16.61
1	40%	2.61	0.003	7.55	4.94	16.69

Fuente: Elaboración propia.

Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso.

Con este tipo de ensayo se determinará la densidad relativa y la absorción del agregado grueso.

Tabla 40.

Peso específico y absorción del agregado grueso.

Muestra N°	Peso muestra seco (Kg)	Peso muestra saturada con sup. Seca "B" (Kg)	Peso muestra saturada dentro del agua "C" (Kg)	Peso específico a Granel (KN/m ³)	Peso específico saturado con sup. Seca (KN/m ³)	Peso específico aparente (KN/ m ³)	% De absorción
1	4.94	5.00	3.11	26.12	26.41	26.91	1.13
2	4.93	5.00	3.10	25.97	26.32	26.90	1.33
3	4.94	5.00	3.10	26.02	26.34	26.88	1.23
Promedio =				26.04	26.36	26.90	1.23

Fuente: Elaboración propia.

Peso Específico y Absorción del Agregado Fino.

Con este tipo de ensayo se determinará la densidad relativa y la absorción del agregado fino.

Tabla 41.

Peso específico y absorción del agregado fino.

Muestra N°	Peso muestra (Kg)	Peso de matraz (Kg)	Peso muestra + matraz+ agua (Kg)	Peso del agua agregado al matraz "W" (Kg)	Peso muestra secada "A" (kg)	Volumen del matraz "v" (Lt)	Peso específico a granel (KN/m ³)	Peso específico saturado con sup. Seca (KN/m ³)	Peso específico aparente (KN/m ³)	% De absorción
1	0.5	0.24	1.02	0.28	0.49	0.48	24.40	25.07	26.15	2.68
2	0.5	0.24	1.03	0.30	0.49	0.49	24.83	25.48	26.56	2.56
3	0.5	0.18	0.99	0.31	0.49	0.51	24.66	25.40	26.63	2.92
Promedio =							24.63	25.31	26.45	2.72

Fuente: Elaboración propia.

Peso Específico del Vidrio.

Para realizar el peso específico del vidrio se utilizó el método de desplazamientos de volumen, los resultados son mostrados en la tabla 42.

Tabla 42.

Peso específico del vidrio.

Muestra N°	Masa de vidrio (kg)	Volumen del Matraz (m ³)	Volumen del matraz + vidrio (m ³)	Volumen desplazado del vidrio (m ³)	Peso específico (kN/m ³)
1	0.10	0.30	0.34	0.040	25.00
2	0.10	0.30	0.34	0.040	25.00
3	0.10	0.30	0.34	0.038	26.32
Promedio =					25.44

Fuente: Elaboración propia.

Peso Específico de Vidrio Molido como Sustituto Parcial de Agregado Fino en Distintos Porcentajes.

Para realizar el peso específico del vidrio molido como sustituto parcial de agregado fino en distintos porcentajes en la arena, se utilizó la norma ASTM C 128, los resultados son mostrados en la tabla 43.

Tabla 43.

Peso específico de arena con porcentaje de vidrio.

%	Peso muestra (Kg)	Peso de matraz (Kg)	Peso muestra + matraz+ agua (Kg)	Peso del agua agregado al matraz "W" (Kg)	Peso muestra secada "A" (kg)	Volumen del matraz "v" (Lt)	Peso específico a granel (KN/m ³)	Peso específico saturado con sup. Seca (KN/m ³)	Peso específico aparente (KN/m ³)	% De absorción
10%	0.4	0.1777	0.9207	0.3430	0.3927	0.49	26.71	27.21	28.11	1.82
20%	0.4	0.2355	0.9305	0.2950	0.3920	0.49	19.71	20.12	20.54	2.00
30%	0.4	0.2369	0.9706	0.3337	0.3935	0.49	24.57	24.98	25.61	1.63
40%	0.4	0.1777	0.9274	0.3497	0.3916	0.51	24.57	25.10	25.94	2.10

Fuente: Elaboración propia

Peso Específico del Cemento

Tabla 44.

Peso específico del cemento.

Muestra	Masa de cemento (kg)	Volumen del matraz (m ³)	Volumen del matraz + Cemento (m ³)	Volumen desplazado del cemento (m ³)	Peso específico (kN/m ³)
1	0.064	0.300	0.3204	0.0204	31.37
2	0.064	0.300	0.3205	0.0205	31.22
3	0.064	0.300	0.3206	0.0206	31.07
Promedio =					31.22

Fuente: Elaboración propia.

3.1.1 Determinación de los materiales para 1 m³ de hormigón

La ejecución de los ensayos previos a la dosificación se ratifica que los agregados son aptos para usarse en la dosificación del hormigón, al cumplir con los parámetros y valores especificados en las normas correspondientes. Con esto se procede a determinar la dosificación para un hormigón de resistencia a la compresión 25 N/mm² a los 28 días.

3.1.1.1 Determinar la resistencia promedio requerida (f'cr)

Para el proyecto se consideró una resistencia especificada de $f'c = 25 \text{ N/mm}^2$.

Se obtiene de la “Resistencia promedio requerida f'cr, Cuando no hay datos disponibles para establecer la desviación estándar.” (Tabla 18).

Se adicionará: 8.5 N/mm² entonces obtenemos:

$$f'cr = f'c + 8.50 \quad \text{Ecuación 2}$$

$$f'cr = 25.00 + 8.50 = 33.50 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Ecuación 3}$$

3.1.1.2 Determinación de la relación agua/cemento (A/C)

Para determinar este valor y teniendo como dato $f'_{cr} = 33.50 \text{ N/mm}^2$, y analizando tanto los límites superior e inferior además de la línea media de la Tabla 14, tenemos:

$f'c$		a/c
28	=	0.57
33.5	=	A/C
35	=	0.48

Interpolando se obtiene:

$$R \text{ a/c} = 0.50$$

3.1.1.3 Determinación de la Cantidad de Agua

Para poder obtener la cantidad de agua primero se seleccionó un Asentamiento “S” de 3” para una consistencia plástica.

Se escoge una consistencia plástica porque el hormigón presenta ventajas en su colocación en obra debido a la facilidad de manejo y compactación.

También en hormigones para edificaciones se recomienda en general que el asiento en el cono de Abrams no sea inferior a 6 centímetros. (Instrucción de Hormigón Estructural EHE, 1999)

Además de necesitar el asentamiento, también se requiere el tamaño máximo del agregado que es de 3/4”.

Con todos estos valores se obtiene la cantidad de agua y el % de contenido de aire de la tabla 13:

$$\text{Agua} = 205 \text{ l/m}^3$$

$$\text{Aire Atrapado} = 2\%$$

3.1.1.4 Cálculo de la cantidad de cemento (Cc).

$$\text{Cantidad de cemento} = \frac{205}{0.5} = 410.59 \text{ kg/m}^3 \quad \text{Ecuación 4}$$

3.1.1.5 Cálculo del Peso Agregado Grueso (Gr)

Se obtiene el Vol. Agr. Grueso / Vol. unitario concreto (V_r/v), para calcular este valor se necesita el Módulo de Finura de la arena (M.F.) y el Tamaño Máximo nominal de la grava (T.M.A) con estos valores ingresamos a la tabla 16:

2.6	0.64	
2.79	=	V_r/v
2.8	0.62	

Realizando la interpolación nos da:

$$V_r/v = 0.621 \quad \text{Ecuación 5}$$

Determinar la cantidad de grava, multiplicando V_r/V y P.U.C

$$Gr = 0.623 * 1534 = 985.92 \text{ kg/m}^3 \quad \text{Ecuación 6}$$

3.1.1.6 Determinación de la Cantidad de Arena (Ar) por el Método de los Volúmenes Absolutos.

Determinadas las cantidades de cemento, agua, grava y aire atrapado para un metro cúbico de hormigón en peso, se procedemos a calcular las cantidades convirtiéndolo en volumen al metro cúbico de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Ar = \left(1\text{m}^3 - \left(\left(\frac{C}{Pe(c)} \right) + \left(\frac{Gr}{Pe(Gr)} \right) + \left(\frac{Ag}{Pe(Ag)} \right) + \left(\frac{\%Aire}{100} \right) \right) \right) * Pe(Ar) \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

Ar.: Arena (Kg/m³).

C.: Masa del cemento (Kg).

Pe (C):. Peso específico del Cemento (Kg/m³).

Gr.: Masa de la grava (Kg).

Pe (Gr):. Peso específico de la grava (Kg/m³).

Ag.: Masa del agua (Kg). Pe (Ag):.

Peso específico del agua (asumimos 1000 Kg/m³).

% Aire: aire atrapado (%).

Pe (Ar):. Peso específico de la arena (Kg/m³).

Reemplazando los datos de las cantidades obtenidas y de los ensayos preliminares en la ecuación anterior, tenemos:

$$Ar = \left(1m^3 - \left(\left(\frac{410.59}{3140} \right) + \left(\frac{985.92}{2898} \right) + \left(\frac{205}{1000} \right) + \left(\frac{2}{100} \right) \right) \right) * 2645 \quad \text{Ecuación 8}$$

$$Ar = 804.30 \text{ kg/m}^3$$

Las cantidades finales son expuestas en la tabla 45 y las proporciones de mezcla son mostrados en la tabla 46.

Tabla 45.

Cantidad de material para 1 m³ de hormigón patrón, para el diseño de mezcla.

Cemento	411	kg/m ³
Agua de diseño	205	lt/m ³
Agregado fino seco	804	kg/m ³
Agregado grueso seco	986	kg/m ³

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 46.

Porciones de mezcla.

Cemento	Arena	Grava	Agua lt/m ³
1.00	1.96	2.40	205

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Análisis y Resultados

Los resultados obtenidos del ensayo de compresión a las distintas edades en las probetas elaboradas se presentan en las siguientes tablas de acuerdo al porcentaje de vidrio en reemplazo parcial de la arena adicionado en la mezcla.

3.2.1 Datos de las rupturas de probetas de hormigón patrón y con los distintos porcentajes de vidrio (10% a 40%)

Tabla 47.

Resistencia de esfuerzo a compresión de hormigón patrón en 14, 21, 28 días.

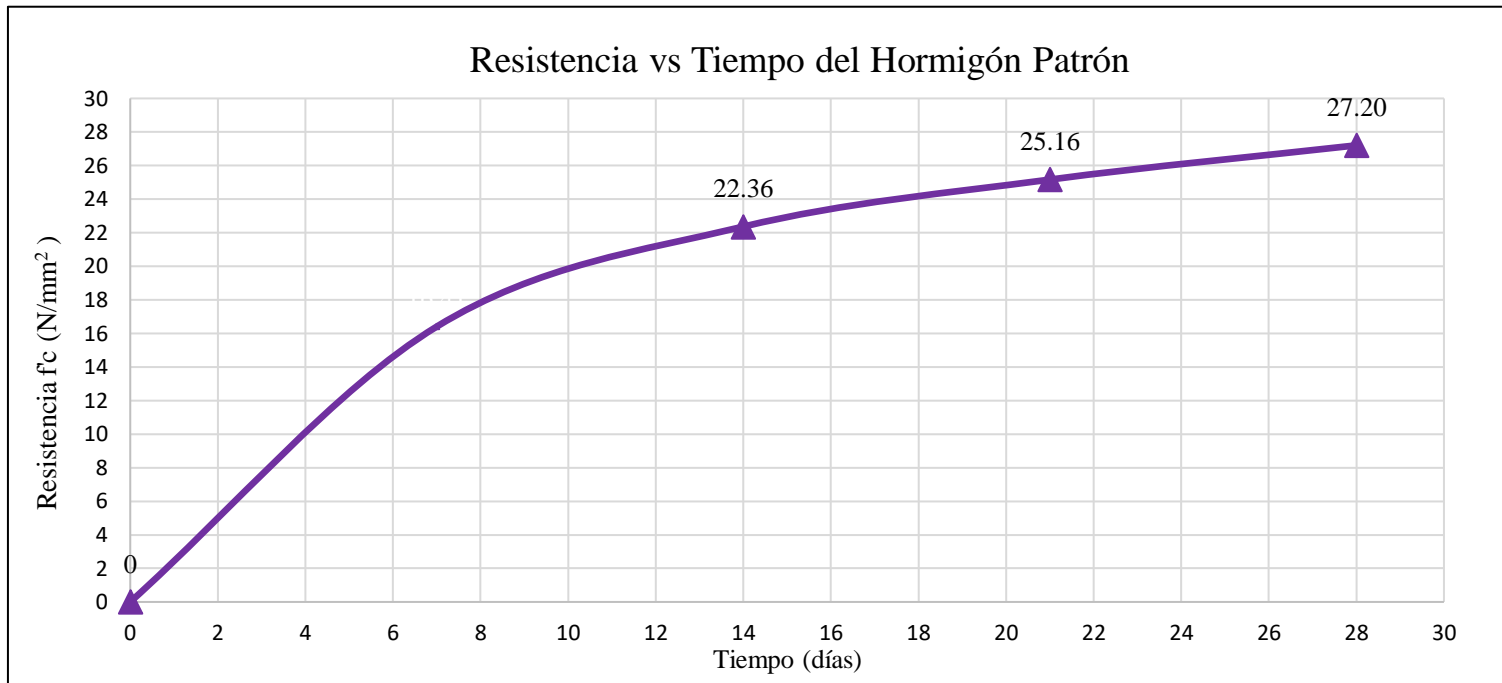
N°	Edad	ø	h	Sección	Slump	Peso	Densidad H°	Densidad promedio	Lectura	Esfuerzo a compresión	% Obtenido	Tipo de Ruptura	Promedio de resistencia a compresión	Proyección 28 días
	(días)	cm	cm	(cm ²)	cm	kg	kg/m ³	kg/m ³	(KN)	(N/mm ²)	-	-	(N/mm ²)	(N/mm ²)
1	14	10	19.70	78.54	7.20	3.32	2142.53	2153.74	169.62	21.60	86.39	Tipo 3	22.36	25.41
2	14	10	19.70	78.54	7.20	3.33	2152.23		169.22	21.55	86.18	Tipo 3		25.35
3	14	10	19.70	78.54	7.20	3.38	2184.54		180.82	23.02	92.09	Tipo 3		27.09
4	14	10	19.70	78.54	7.20	3.32	2145.76		184.16	23.45	93.79	Tipo 3		27.59
5	14	10	19.70	78.54	7.20	3.33	2152.23		184.75	23.52	94.09	Tipo 3		27.67
6	14	10	19.70	78.54	7.20	3.33	2152.23		169.38	21.57	86.26	Tipo 3		25.37
7	14	10	19.70	78.54	7.20	3.34	2158.69		179.51	22.86	91.42	Tipo 2		26.89
8	14	10	19.70	78.54	7.20	3.30	2132.84		171.13	21.79	87.15	Tipo 3		25.63
9	14	10	19.70	78.54	7.20	3.31	2139.30		171.39	21.82	87.29	Tipo 3		25.67
10	14	10	19.70	78.54	7.20	3.35	2165.15		173.09	22.04	88.15	Tipo 2		25.93
11	14	10	19.70	78.54	7.20	3.37	2178.08		180.69	23.01	92.02	Tipo 3		27.07
12	14	10	19.70	78.54	7.20	3.31	2139.30		180.30	22.96	91.82	Tipo 4		27.01
13	14	10	19.70	78.54	7.20	3.30	2132.84		180.61	23.00	91.98	Tipo 3		27.05
14	14	10	19.70	78.54	7.20	3.33	2152.23		169.71	21.61	86.43	Tipo 3		25.42
15	14	10	19.70	78.54	7.20	3.37	2178.08		170.01	21.65	86.59	Tipo 3		25.47
16	21	10	19.70	78.54	7.20	3.35	2165.15	2157.40	192.35	24.49	97.96	Tipo 4	25.16	26.18
17	21	10	19.70	78.54	7.20	3.34	2158.69		191.41	24.37	97.49	Tipo 2		26.06
18	21	10	19.70	78.54	7.20	3.36	2171.62		202.08	25.73	102.92	Tipo 3		27.51

19	21	10	19.70	78.54	7.20	3.34	2158.69		205.81	26.21	104.82	Tipo 4		28.02
20	21	10	19.70	78.54	7.20	3.34	2155.46		207.87	26.47	105.87	Tipo 3		28.30
21	21	10	19.70	78.54	7.20	3.36	2168.39		191.62	24.40	97.59	Tipo 2		26.08
22	21	10	19.70	78.54	7.20	3.35	2165.15		199.99	25.46	101.85	Tipo 3		27.22
23	21	10	19.70	78.54	7.20	3.30	2132.84		194.08	24.71	98.84	Tipo 1		26.42
24	21	10	19.70	78.54	7.20	3.34	2158.69		194.29	24.74	98.95	Tipo 3		26.45
25	21	10	19.70	78.54	7.20	3.33	2149.00		194.53	24.77	99.07	Tipo 3		26.48
26	21	10	19.70	78.54	7.20	3.34	2158.69		202.08	25.73	102.92	Tipo 4		27.51
27	21	10	19.70	78.54	7.20	3.34	2155.46		201.28	25.63	102.51	Tipo 3		27.40
28	21	10	19.70	78.54	7.20	3.34	2155.46		201.43	25.65	102.59	Tipo 3		27.42
29	21	10	19.70	78.54	7.20	3.33	2149.00		192.37	24.49	97.98	Tipo 2		26.19
30	21	10	19.70	78.54	7.20	3.34	2158.69		193.36	24.62	98.48	Tipo 3		26.32
31	28	10	19.70	78.54	7.20	3.37	2178.08		208.17	26.50	106.02	Tipo 3		26.50
32	28	10	19.70	78.54	7.20	3.34	2155.46		207.87	26.47	105.87	Tipo 3		26.47
33	28	10	19.70	78.54	7.20	3.32	2145.76		217.78	27.73	110.92	Tipo 2		27.73
34	28	10	19.70	78.54	7.20	3.34	2158.69		217.98	27.75	111.02	Tipo 2		27.75
35	28	10	19.70	78.54	7.20	3.35	2161.92		217.98	27.75	111.02	Tipo 3		27.75
36	28	10	19.70	78.54	7.20	3.34	2158.69		207.93	26.47	105.90	Tipo 3		26.47
37	28	10	19.70	78.54	7.20	3.35	2161.92		216.91	27.62	110.47	Tipo 3		27.62
38	28	10	19.70	78.54	7.20	3.32	2145.76	2158.69	209.77	26.71	106.84	Tipo 2	27.20	26.71
39	28	10	19.70	78.54	7.20	3.36	2171.62		215.29	27.41	109.65	Tipo 4		27.41
40	28	10	19.70	78.54	7.20	3.34	2155.46		215.29	27.41	109.65	Tipo 3		27.41
41	28	10	19.70	78.54	7.20	3.35	2161.92		217.37	27.68	110.70	Tipo 3		27.68
42	28	10	19.70	78.54	7.20	3.33	2149.00		217.29	27.67	110.66	Tipo 3		27.67
43	28	10	19.70	78.54	7.20	3.34	2158.69		217.37	27.68	110.70	Tipo 3		27.68
44	28	10	19.70	78.54	7.20	3.34	2155.46		208.36	26.53	106.12	Tipo 3		26.53
45	28	10	19.70	78.54	7.20	3.35	2161.92		209.54	26.68	106.72	Tipo 2		26.68

Fuente: Elaboración propia.

Figura 20.

Resistencia de esfuerzo a compresión de hormigón patrón en 14, 21, 28 días.



Fuente: Elaboración propia.

Interpretación: en la figura 20 se muestra la evolución del hormigón para una dosificación de 25 N/mm^2 en el transcurso del tiempo, se puede observar que a los 14 días se llega al 89.45 % de la resistencia requerida, a los 21 días se obtiene una resistencia de 25.16 N/mm^2 que es mayor a la requerida siendo así en porcentaje 100.66 %, y a los 28 días se sobrepasa la resistencia requerida llegando al 108.81 % que es 27.20 N/mm^2 .

Tabla 48.

Resistencia de esfuerzo a compresión con 10% de vidrio como sustituto parcial del agregado fino en 14, 21, 28 días.

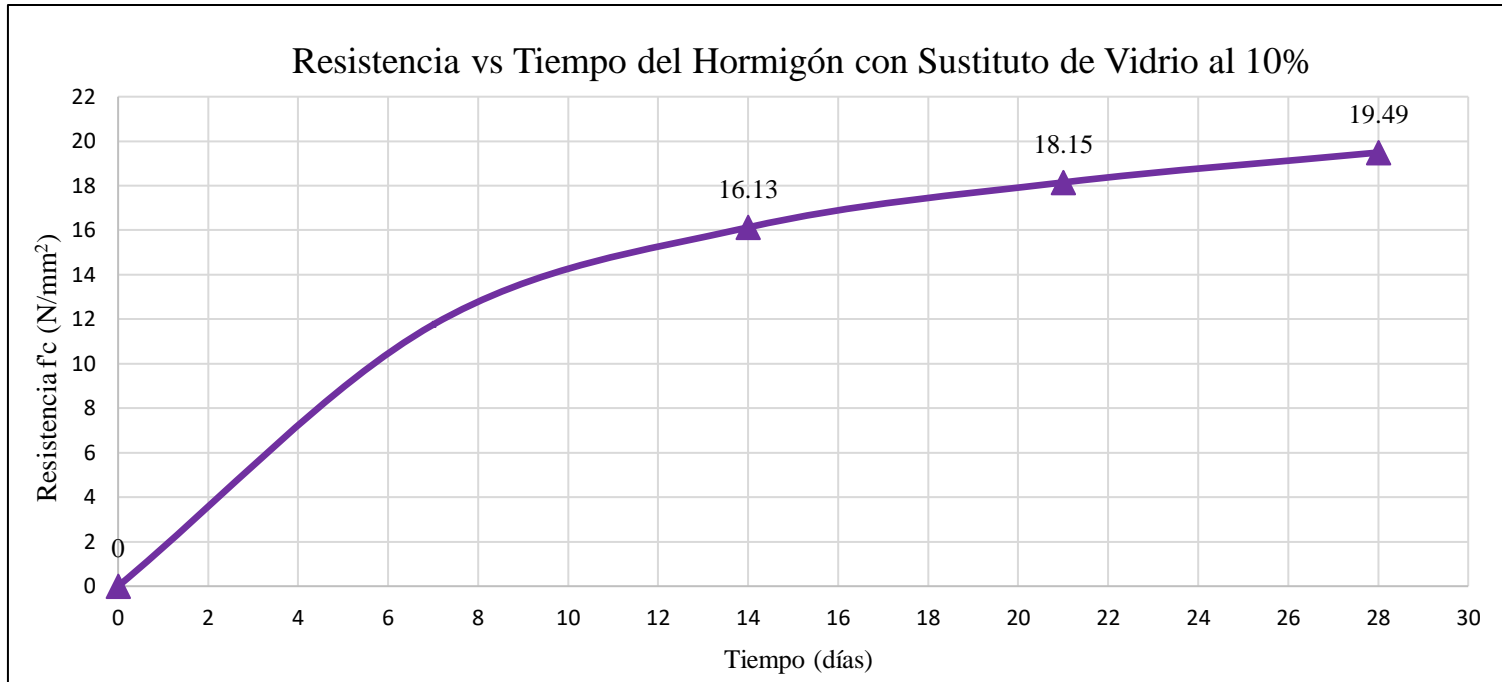
N°	Edad	ø	h	Sección	Slump	Peso	Densidad H°	Densidad promedio	Lectura	Esfuerzo a compresión	% Obtenido	Tipo de Ruptura	Promedio de esfuerzo a compresión	Proyección 28 días
	(días)	cm	cm	(cm2)	(cm)	kg	kg/m ³	kg/m ³	(KN)	(N/mm ²)	-	-	(N/mm ²)	(N/mm ²)
1	14	10	19.70	78.54	6.50	3.30	2132.84	2149.21	126.97	16.17	64.67	Tipo 3	16.13	19.02
2	14	10	19.70	78.54	6.50	3.34	2158.69		127.44	16.23	64.91	Tipo 3		19.09
3	14	10	19.70	78.54	6.50	3.33	2149.00		128.12	16.31	65.25	Tipo 3		19.19
4	14	10	19.70	78.54	6.50	3.34	2158.69		121.62	15.48	61.94	Tipo 4		18.22
5	14	10	19.70	78.54	6.50	3.34	2155.46		122.53	15.60	62.41	Tipo 4		18.35
6	14	10	19.70	78.54	6.50	3.34	2155.46		122.73	15.63	62.51	Tipo 3		18.38
7	14	10	19.70	78.54	6.50	3.33	2149.00		129.41	16.48	65.91	Tipo 2		19.38
8	14	10	19.70	78.54	6.50	3.34	2158.69		112.38	14.31	57.24	Tipo 3		16.83
9	14	10	19.70	78.54	6.50	3.34	2158.69		119.19	15.18	60.70	Tipo 3		17.85
10	14	10	19.70	78.54	6.50	3.30	2132.84		119.19	15.18	60.70	Tipo 2		17.85
11	14	10	19.70	78.54	6.50	3.32	2145.76		137.48	17.50	70.02	Tipo 3		20.59
12	14	10	19.70	78.54	6.50	3.32	2145.76		131.92	16.80	67.18	Tipo 3		19.76
13	14	10	19.70	78.54	6.50	3.30	2132.84		132.00	16.81	67.23	Tipo 3		19.77
14	14	10	19.70	78.54	6.50	3.36	2171.62		132.78	16.91	67.63	Tipo 3		19.89
15	14	10	19.70	78.54	6.50	3.30	2132.84		136.02	17.32	69.28	Tipo 3		20.38
16	21	10	19.70	78.54	6.35	3.33	2152.23	2145.33	156.51	19.93	79.71	Tipo 3	18.15	21.30
17	21	10	19.70	78.54	6.35	3.29	2126.37		138.61	17.65	70.59	Tipo 3		18.87
18	21	10	19.70	78.54	6.35	3.34	2158.69		138.80	17.67	70.69	Tipo 2		18.89

19	21	10	19.70	78.54	6.35	3.31	2139.30		149.15	18.99	75.96	Tipo 3		20.30
20	21	10	19.70	78.54	6.35	3.32	2142.53		135.20	17.21	68.86	Tipo 3		18.40
21	21	10	19.70	78.54	6.35	3.34	2158.69		135.20	17.21	68.86	Tipo 3		18.40
22	21	10	19.70	78.54	6.35	3.33	2149.00		136.27	17.35	69.40	Tipo 3		18.55
23	21	10	19.70	78.54	6.35	3.34	2158.69		147.09	18.73	74.91	Tipo 3		20.02
24	21	10	19.70	78.54	6.35	3.33	2152.23		147.69	18.80	75.22	Tipo 4		20.10
25	21	10	19.70	78.54	6.35	3.32	2145.76		141.25	17.98	71.94	Tipo 3		19.23
26	21	10	19.70	78.54	6.35	3.29	2126.37		141.48	18.01	72.05	Tipo 2		19.26
27	21	10	19.70	78.54	6.35	3.31	2139.30		142.06	18.09	72.35	Tipo 3		19.34
28	21	10	19.70	78.54	6.35	3.31	2139.30		142.36	18.13	72.50	Tipo 2		19.38
29	21	10	19.70	78.54	6.35	3.33	2152.23		142.85	18.19	72.75	Tipo 2		19.45
30	21	10	19.70	78.54	6.35	3.31	2139.30		143.27	18.24	72.97	Tipo 3		19.50
31	28	10	19.70	78.54	6.60	3.32	2145.76		160.24	20.40	81.61	Tipo 3		20.40
32	28	10	19.70	78.54	6.60	3.33	2152.23		160.55	20.44	81.77	Tipo 2		20.44
33	28	10	19.70	78.54	6.60	3.33	2149.00		145.55	18.53	74.13	Tipo 2		18.53
34	28	10	19.70	78.54	6.60	3.35	2165.15		146.48	18.65	74.60	Tipo 3		18.65
35	28	10	19.70	78.54	6.60	3.35	2161.92		157.75	20.08	80.34	Tipo 3		20.08
36	28	10	19.70	78.54	6.60	3.37	2174.85		153.61	19.56	78.23	Tipo 3		19.56
37	28	10	19.70	78.54	6.60	3.35	2161.92		153.70	19.57	78.28	Tipo 4		19.57
38	28	10	19.70	78.54	6.60	3.32	2145.76	2154.38	154.07	19.62	78.47	Tipo 2	19.49	19.62
39	28	10	19.70	78.54	6.60	3.36	2171.62		148.31	18.88	75.53	Tipo 3		18.88
40	28	10	19.70	78.54	6.60	3.30	2132.84		159.00	20.24	80.98	Tipo 3		20.24
41	28	10	19.70	78.54	6.60	3.32	2145.76		159.05	20.25	81.01	Tipo 3		20.25
42	28	10	19.70	78.54	6.60	3.33	2152.23		146.70	18.68	74.71	Tipo 3		18.68
43	28	10	19.70	78.54	6.60	3.30	2132.84		147.10	18.73	74.92	Tipo 3		18.73
44	28	10	19.70	78.54	6.60	3.34	2158.69		147.41	18.77	75.07	Tipo 3		18.77
45	28	10	19.70	78.54	6.60	3.35	2165.15		156.52	19.93	79.72	Tipo 3		19.93

Fuente: Elaboración propia.

Figura 21.

Resistencia de Esfuerzo a Compresión con 10% de Vidrio como Sustituto Parcial del Agregado Fino en 14, 21, 28 Días.



Fuente: Elaboración propia.

Interpretación: en la figura 21 se muestra la evolución del hormigón con 10% de remplazo parcial del agregado fino para una dosificación de 25 N/mm^2 en el transcurso del tiempo, se puede observar que a los 14 días se llega al 64.50 % de la resistencia requerida, a los 21 días se obtiene una en porcentaje de 72.58 %, y a los 28 días se tiene el 77.96% de la resistencia requerida, se observa que a los 28 días de curado no se llega a la resistencia a la cual fue dosificada y no se ve un gran incremento en la resistencia después de los 21 días ya que solo tiene un incremento de 5.37%.

Tabla 49.

Resistencia de esfuerzo a compresión con 20% de vidrio como sustituto parcial del agregado fino en 14, 21, 28 días.

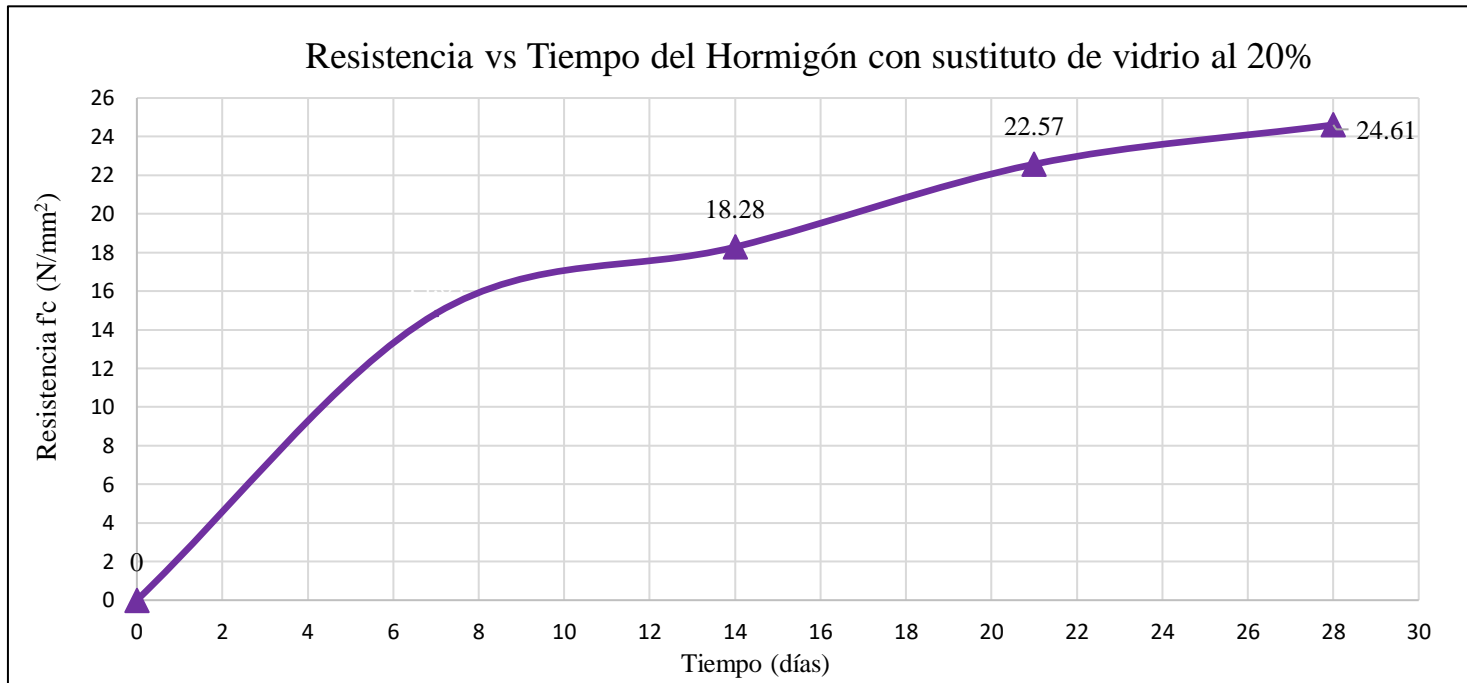
N°	Edad	Ø	h	Sección	Slump	Peso	Densidad H°	Densidad promedio	Lectura	Esfuerzo a compresión	% Obtenido	Tipo de Ruptura	Promedio de esfuerzo a compresión	Proyección 28 días
	(días)	cm	cm	(cm2)	(cm)	kg	kg/m ³	kg/m ³	(KN)	(N/mm ²)	-	-	(N/mm ²)	(N/mm ²)
1	14	10	19.70	78.54	6.30	3.36	2171.62	2153.74	144.02	18.34	73.35	Tipo 2	18.28	21.57
2	14	10	19.70	78.54	6.30	3.34	2155.46		143.71	18.30	73.19	Tipo 2		21.53
3	14	10	19.70	78.54	6.30	3.35	2161.92		143.29	18.24	72.98	Tipo 3		21.46
4	14	10	19.70	78.54	6.30	3.33	2149.00		137.66	17.53	70.11	Tipo 3		20.62
5	14	10	19.70	78.54	6.30	3.34	2158.69		142.31	18.12	72.48	Tipo 3		21.32
6	14	10	19.70	78.54	6.30	3.34	2155.46		142.88	18.19	72.77	Tipo 3		21.40
7	14	10	19.70	78.54	6.30	3.35	2161.92		146.88	18.70	74.81	Tipo 2		22.00
8	14	10	19.70	78.54	6.30	3.34	2158.69		145.63	18.54	74.17	Tipo 3		21.81
9	14	10	19.70	78.54	6.30	3.34	2158.69		150.30	19.14	76.55	Tipo 4		22.51
10	14	10	19.70	78.54	6.30	3.31	2139.30		143.69	18.29	73.18	Tipo 3		21.52
11	14	10	19.70	78.54	6.30	3.32	2145.76		150.05	19.10	76.42	Tipo 3		22.48
12	14	10	19.70	78.54	6.30	3.32	2145.76		137.46	17.50	70.01	Tipo 2		20.59
13	14	10	19.70	78.54	6.30	3.30	2132.84		142.43	18.13	72.54	Tipo 3		21.33
14	14	10	19.70	78.54	6.30	3.36	2171.62		139.71	17.79	71.15	Tipo 3		20.93
15	14	10	19.70	78.54	6.30	3.31	2139.30		144.02	18.34	73.35	Tipo 3		21.57
16	21	10	19.70	78.54	6.30	3.33	2149.00	2153.74	178.13	22.68	90.72	Tipo 3	22.57	24.25
17	21	10	19.70	78.54	6.30	3.36	2168.39		175.49	22.34	89.37	Tipo 3		23.89
18	21	10	19.70	78.54	6.30	3.35	2165.15		173.15	22.05	88.18	Tipo 3		23.57
19	21	10	19.70	78.54	6.30	3.37	2174.85		173.15	22.05	88.18	Tipo 3		23.57
20	21	10	19.70	78.54	6.30	3.31	2136.07		179.81	22.89	91.58	Tipo 2		24.48

21	21	10	19.70	78.54	6.30	3.34	2158.69		176.35	22.45	89.81	Tipo 3		24.01
22	21	10	19.70	78.54	6.30	3.36	2168.39		185.93	23.67	94.70	Tipo 3		25.31
23	21	10	19.70	78.54	6.30	3.34	2158.69		176.09	22.42	89.68	Tipo 3		23.97
24	21	10	19.70	78.54	6.30	3.33	2152.23		186.37	23.73	94.92	Tipo 3		25.37
25	21	10	19.70	78.54	6.30	3.32	2145.76		171.25	21.80	87.22	Tipo 2		23.31
26	21	10	19.70	78.54	6.30	3.29	2126.37		178.43	22.72	90.87	Tipo 3		24.29
27	21	10	19.70	78.54	6.30	3.31	2139.30		178.42	22.72	90.87	Tipo 3		24.29
28	21	10	19.70	78.54	6.30	3.31	2139.30		179.25	22.82	91.29	Tipo 3		24.40
29	21	10	19.70	78.54	6.30	3.33	2152.23		174.43	22.21	88.84	Tipo 2		23.74
30	21	10	19.70	78.54	6.30	3.36	2171.62		173.15	22.05	88.18	Tipo 3		23.57
31	28	10	19.70	78.54	6.10	3.35	2161.92		181.02	23.05	92.19	Tipo 2		23.05
32	28	10	19.70	78.54	6.10	3.33	2152.23		199.63	25.42	101.67	Tipo 3		25.42
33	28	10	19.70	78.54	6.10	3.36	2168.39		192.39	24.50	97.98	Tipo 3		24.50
34	28	10	19.70	78.54	6.10	3.34	2158.69		187.15	23.83	95.31	Tipo 3		23.83
35	28	10	19.70	78.54	6.10	3.36	2171.62		194.47	24.76	99.04	Tipo 3		24.76
36	28	10	19.70	78.54	6.10	3.32	2142.53		188.07	23.95	95.78	Tipo 2		23.95
37	28	10	19.70	78.54	6.10	3.33	2149.00		183.68	23.39	93.55	Tipo 3		23.39
38	28	10	19.70	78.54	6.10	3.31	2139.30	2153.52	195.85	24.94	99.75	Tipo 3	24.61	24.94
39	28	10	19.70	78.54	6.10	3.36	2171.62		196.86	25.06	100.26	Tipo 3		25.06
40	28	10	19.70	78.54	6.10	3.30	2132.84		188.23	23.97	95.86	Tipo 3		23.97
41	28	10	19.70	78.54	6.10	3.32	2145.76		205.27	26.14	104.54	Tipo 3		26.14
42	28	10	19.70	78.54	6.10	3.33	2152.23		202.28	25.76	103.02	Tipo 3		25.76
43	28	10	19.70	78.54	6.10	3.30	2132.84		199.87	25.45	101.80	Tipo 3		25.45
44	28	10	19.70	78.54	6.10	3.34	2158.69		196.16	24.98	99.91	Tipo 2		24.98
45	28	10	19.70	78.54	6.10	3.35	2165.15		188.38	23.99	95.94	Tipo 3		23.99

Fuente: Elaboración propia.

Figura 22.

Resistencia de esfuerzo a compresión con 20% de vidrio como sustituto parcial del agregado fino en 14, 21, 28 días



Fuente: elaboración propia.

Interpretación: en la figura 22 se muestra la evolución del hormigón con 20% de remplazo parcial del agregado fino para una dosificación de 25 N/mm² en el transcurso del tiempo, se puede observar que a los 14 días se llega al 73.14 % de la resistencia requerida, a los 21 días se obtiene una en porcentaje de 90.29 %, y a los 28 días se tiene el 98.44% de la resistencia requerida.

Tabla 50.

Resistencia de esfuerzo a compresión con 30% de vidrio como sustituto parcial del agregado fino en 14, 21, 28 días.

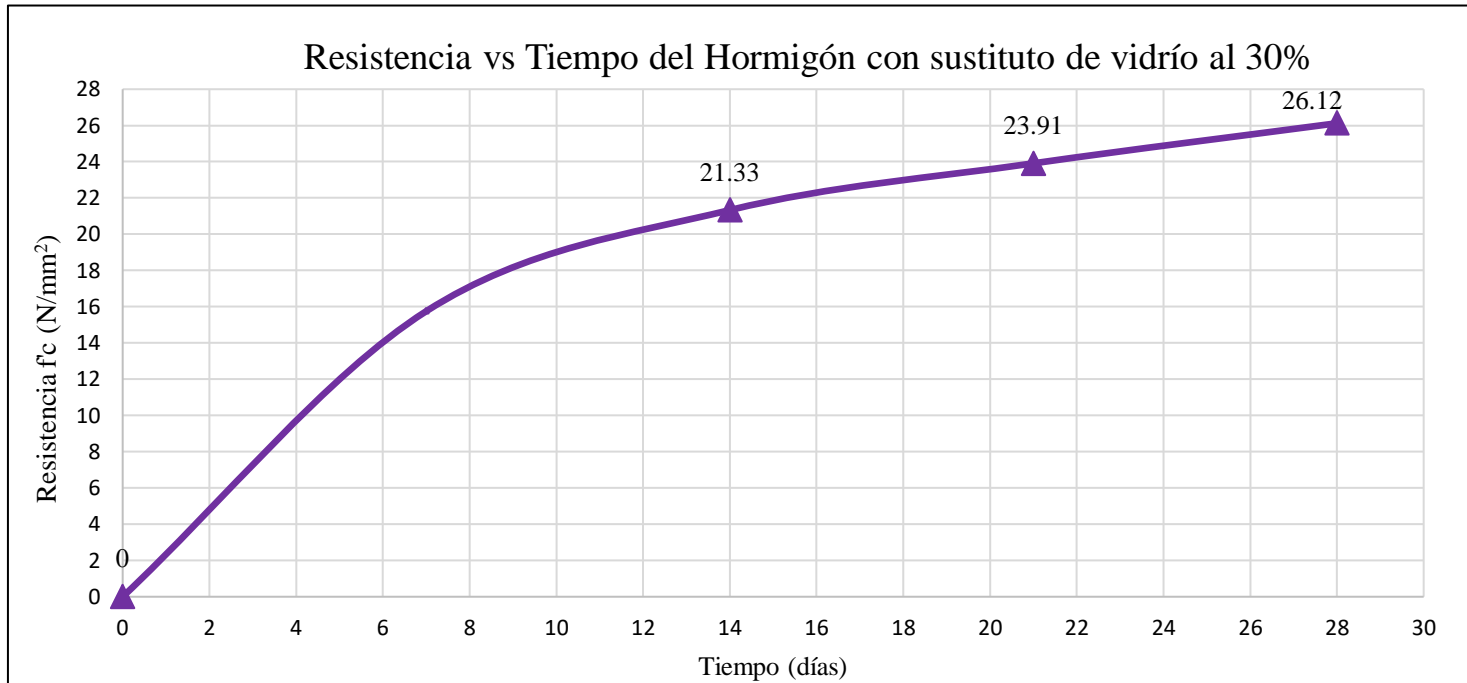
1	Edad	ø	h	Sección	Slump	Peso	Densidad H°	Densidad promedio	Lectura	Esfuerzo a compresión	% Obtenido	Tipo de Ruptura	Promedio de esfuerzo a compresión	Proyección 28 días
	(días)	cm	cm	(cm2)	(cm)	kg	kg/m³	kg/m³	(KN)	(N/mm²)	-	-	(N/mm²)	(N/mm²)
1	14	10	19.70	78.54	5.60	3.32	2145.76	2147.70	163.14	20.77	83.09	Tipo 3	21.33	24.44
2	14	10	19.70	78.54	5.60	3.30	2129.61		165.46	21.07	84.27	Tipo 3		24.78
3	14	10	19.70	78.54	5.60	3.31	2139.30		171.61	21.85	87.40	Tipo 3		25.71
4	14	10	19.70	78.54	5.60	3.32	2145.76		170.73	21.74	86.95	Tipo 3		25.57
5	14	10	19.70	78.54	5.60	3.30	2129.61		169.55	21.59	86.35	Tipo 2		25.40
6	14	10	19.70	78.54	5.60	3.33	2149.00		167.33	21.30	85.22	Tipo 3		25.06
7	14	10	19.70	78.54	5.60	3.35	2165.15		162.42	20.68	82.72	Tipo 2		24.33
8	14	10	19.70	78.54	5.60	3.37	2178.08		171.53	21.84	87.36	Tipo 3		25.69
9	14	10	19.70	78.54	5.60	3.30	2132.84		167.92	21.38	85.52	Tipo 3		25.15
10	14	10	19.70	78.54	5.60	3.37	2178.08		164.12	20.90	83.59	Tipo 3		24.58
11	14	10	19.70	78.54	5.60	3.33	2152.23		168.44	21.45	85.79	Tipo 3		25.23
12	14	10	19.70	78.54	5.60	3.34	2158.69		170.86	21.76	87.02	Tipo 3		25.59
13	14	10	19.70	78.54	5.60	3.31	2139.30		165.82	21.11	84.45	Tipo 3		24.84
14	14	10	19.70	78.54	5.60	3.31	2139.30		171.30	21.81	87.24	Tipo 3		25.66
15	14	10	19.70	78.54	5.60	3.30	2132.84		162.74	20.72	82.88	Tipo 3		24.38
16	21	10	19.70	78.54	5.60	3.30	2132.84	2157.61	190.41	24.24	96.98	Tipo 2	23.91	25.92
17	21	10	19.70	78.54	5.60	3.37	2178.08		190.90	24.31	97.23	Tipo 3		25.99
18	21	10	19.70	78.54	5.60	3.34	2155.46		186.58	23.76	95.03	Tipo 3		25.40
19	21	10	19.70	78.54	5.60	3.32	2145.76		189.03	24.07	96.27	Tipo 3		25.73

20	21	10	19.70	78.54	5.60	3.34	2158.69		176.64	22.49	89.96	Tipo 3		24.04
21	21	10	19.70	78.54	5.60	3.35	2161.92		186.08	23.69	94.77	Tipo 3		25.33
22	21	10	19.70	78.54	5.60	3.34	2158.69		188.04	23.94	95.77	Tipo 2		25.60
23	21	10	19.70	78.54	5.60	3.35	2161.92		188.04	23.94	95.77	Tipo 3		25.60
24	21	10	19.70	78.54	5.60	3.32	2145.76		191.54	24.39	97.55	Tipo 3		26.07
25	21	10	19.70	78.54	5.60	3.29	2126.37		193.99	24.70	98.80	Tipo 3		26.41
26	21	10	19.70	78.54	5.60	3.37	2178.08		189.47	24.12	96.49	Tipo 3		25.79
27	21	10	19.70	78.54	5.60	3.33	2152.23		190.61	24.27	97.07	Tipo 3		25.95
28	21	10	19.70	78.54	5.60	3.37	2178.08		191.39	24.37	97.48	Tipo 3		26.05
29	21	10	19.70	78.54	5.60	3.34	2158.69		181.97	23.17	92.68	Tipo 3		24.77
30	21	10	19.70	78.54	5.60	3.36	2171.62		182.04	23.18	92.71	Tipo 3		24.78
31	28	10	19.70	78.54	5.50	3.34	2158.69		2150.50	203.28	25.88	103.53		Tipo 3	26.12	25.88
32	28	10	19.70	78.54	5.50	3.37	2178.08	207.52		26.42	105.69	Tipo 3	26.42	
33	28	10	19.70	78.54	5.50	3.30	2132.84	203.79		25.95	103.79	Tipo 3	25.95	
34	28	10	19.70	78.54	5.50	3.33	2152.23	206.81		26.33	105.33	Tipo 3	26.33	
35	28	10	19.70	78.54	5.50	3.33	2149.00	207.20		26.38	105.52	Tipo 3	26.38	
36	28	10	19.70	78.54	5.50	3.32	2145.76	208.35		26.53	106.11	Tipo 3	26.53	
37	28	10	19.70	78.54	5.50	3.31	2136.07	202.02		25.72	102.89	Tipo 2	25.72	
38	28	10	19.70	78.54	5.50	3.33	2152.23	202.29		25.76	103.03	Tipo 3	25.76	
39	28	10	19.70	78.54	5.50	3.30	2132.84	202.54		25.79	103.15	Tipo 3	25.79	
40	28	10	19.70	78.54	5.50	3.33	2152.23	202.63		25.80	103.20	Tipo 3	25.80	
41	28	10	19.70	78.54	5.50	3.31	2139.30	205.18		26.12	104.50	Tipo 4	26.12	
42	28	10	19.70	78.54	5.50	3.36	2171.62	204.95		26.09	104.38	Tipo 3	26.09	
43	28	10	19.70	78.54	5.50	3.36	2171.62	205.67		26.19	104.75	Tipo 3	26.19	
44	28	10	19.70	78.54	5.50	3.31	2139.30	206.67		26.31	105.26	Tipo 2	26.31	
45	28	10	19.70	78.54	5.50	3.32	2145.76	208.35		26.53	106.11	Tipo 2	26.53	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 23.

Resistencia de esfuerzo a compresión con 30% de vidrio como sustituto parcial del agregado fino en 14, 21, 28 días.



Fuente: Elaboración propia.

Interpretación: en la figura 23 se muestra la evolución del hormigón con 30% de remplazo parcial del agregado fino para una dosificación de 25 N/mm² en el transcurso del tiempo, se puede observar que a los 14 días se llega al 85.32 % de la resistencia solicitada, a los 21 días se obtiene una en porcentaje de 95.64 %, y a los 28 días se tiene el 104.48% de la resistencia requerida dando una resistencia de 26.12 N/mm² está superando a la resistencia de dosificación con un 4.48%.

Tabla 51.

Resistencia de esfuerzo a compresión con 40% de vidrio como sustituto parcial del agregado fino en 14, 21, 28 días.

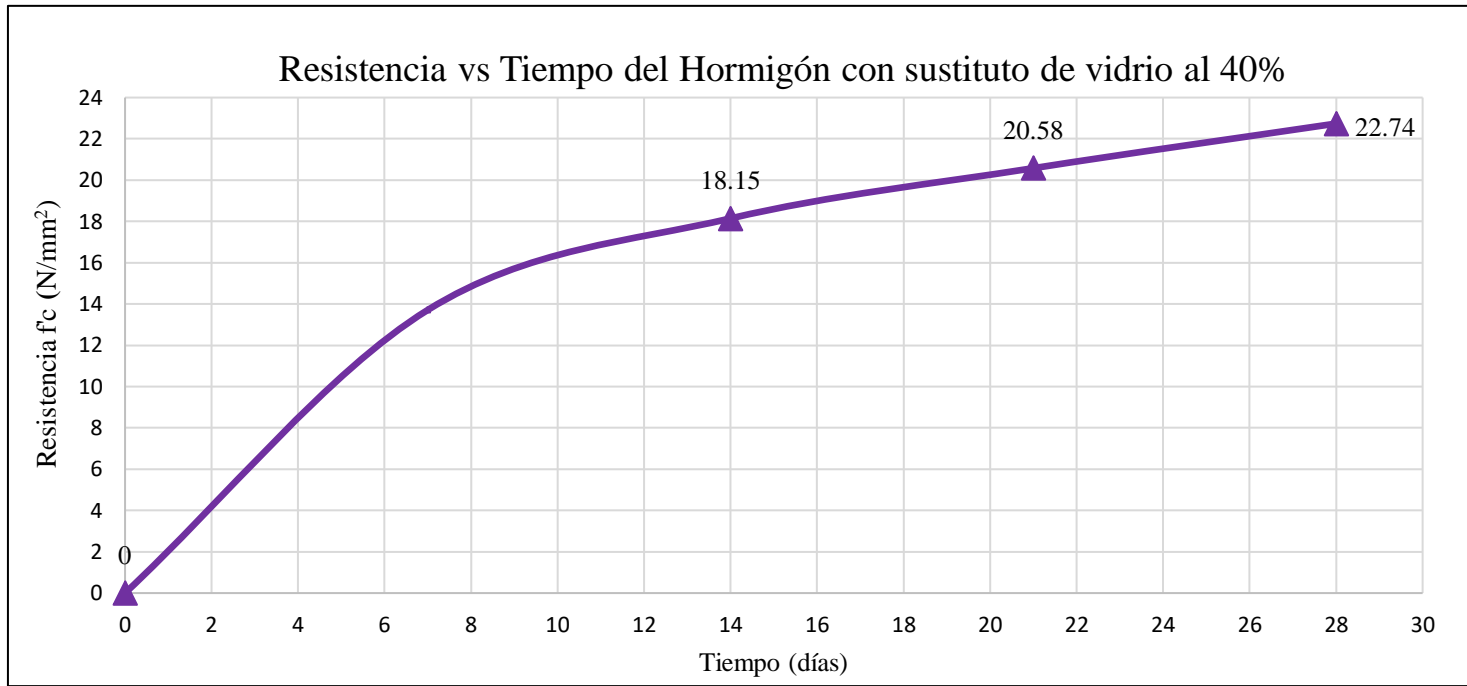
N°	Edad	ø	h	Sección	Slump	Peso	Densidad H°	Densidad promedio	Lectura	Esfuerzo a compresión	% Obtenido	Tipo de Ruptura	Promedio de esfuerzo a compresión	Proyección 28 días
	(días)	cm	cm	(cm2)	(cm)	kg	kg/m ³	kg/m ³	(KN)	(N/mm ²)	-	-	(N/mm ²)	(N/mm ²)
1	14	10	19.70	78.54	5.00	3.30	2132.84	2146.63	147.96	18.84	75.35	Tipo 3	18.15	22.16
2	14	10	19.70	78.54	5.00	3.32	2145.76		147.96	18.84	75.35	Tipo 3		22.16
3	14	10	19.70	78.54	5.00	3.33	2149.00		148.79	18.94	75.78	Tipo 3		22.29
4	14	10	19.70	78.54	5.00	3.32	2142.53		151.02	19.23	76.91	Tipo 3		22.62
5	14	10	19.70	78.54	5.00	3.31	2136.07		151.61	19.30	77.21	Tipo 3		22.71
6	14	10	19.70	78.54	5.00	3.30	2129.61		133.80	17.04	68.14	Tipo 2		20.04
7	14	10	19.70	78.54	5.00	3.32	2142.53		138.58	17.64	70.58	Tipo 2		20.76
8	14	10	19.70	78.54	5.00	3.32	2142.53		144.80	18.44	73.75	Tipo 3		21.69
9	14	10	19.70	78.54	5.00	3.30	2132.84		136.74	17.41	69.64	Tipo 3		20.48
10	14	10	19.70	78.54	5.00	3.36	2171.62		142.90	18.19	72.78	Tipo 3		21.41
11	14	10	19.70	78.54	5.00	3.35	2165.15		136.02	17.32	69.28	Tipo 2		20.38
12	14	10	19.70	78.54	5.00	3.36	2171.62		137.07	17.45	69.81	Tipo 3		20.53
13	14	10	19.70	78.54	5.00	3.33	2152.23		138.71	17.66	70.64	Tipo 3		20.78
14	14	10	19.70	78.54	5.00	3.29	2126.37		134.45	17.12	68.48	Tipo 3		20.14
15	14	10	19.70	78.54	5.00	3.34	2158.69		147.50	18.78	75.12	Tipo 3		22.09
16	21	10	19.70	78.54	5.00	3.34	2158.69	2150.72	163.92	20.87	83.49	Tipo 3	20.58	22.31
17	21	10	19.70	78.54	5.00	3.36	2168.39		164.22	20.91	83.64	Tipo 3		22.35
18	21	10	19.70	78.54	5.00	3.31	2139.30		164.42	20.93	83.74	Tipo 3		22.38
19	21	10	19.70	78.54	5.00	3.33	2152.23		168.49	21.45	85.81	Tipo 3		22.94

20	21	10	19.70	78.54	5.00	3.32	2142.53		169.21	21.55	86.18	Tipo 3		23.03
21	21	10	19.70	78.54	5.00	3.35	2165.15		168.42	21.44	85.77	Tipo 3		22.93
22	21	10	19.70	78.54	5.00	3.32	2145.76		168.63	21.47	85.88	Tipo3		22.95
23	21	10	19.70	78.54	5.00	3.36	2168.39		154.59	19.68	78.73	Tipo 3		21.04
24	21	10	19.70	78.54	5.00	3.28	2119.91		154.44	19.66	78.66	Tipo 3		21.02
25	21	10	19.70	78.54	5.00	3.36	2171.62		151.92	19.34	77.37	Tipo 3		20.68
26	21	10	19.70	78.54	5.00	3.32	2145.76		156.24	19.89	79.57	Tipo 3		21.27
27	21	10	19.70	78.54	5.00	3.33	2152.23		160.28	20.41	81.63	Tipo 3		21.82
28	21	10	19.70	78.54	5.00	3.31	2139.30		163.16	20.77	83.10	Tipo 2		22.21
29	21	10	19.70	78.54	5.00	3.33	2152.23		154.30	19.65	78.58	Tipo 3		21.00
30	21	10	19.70	78.54	5.00	3.31	2139.30		162.15	20.65	82.58	Tipo 3		22.07
31	28	10	19.70	78.54	4.70	3.28	2116.68		175.52	22.35	89.39	Tipo 3		22.35
32	28	10	19.70	78.54	4.70	3.32	2145.76		176.66	22.49	89.97	Tipo 3		22.49
33	28	10	19.70	78.54	4.70	3.32	2145.76		177.34	22.58	90.32	Tipo 3		22.58
34	28	10	19.70	78.54	4.70	3.31	2139.30		180.83	23.02	92.09	Tipo 2		23.02
35	28	10	19.70	78.54	4.70	3.32	2145.76		181.34	23.09	92.36	Tipo 3		23.09
36	28	10	19.70	78.54	4.70	3.33	2152.23		178.24	22.69	90.77	Tipo 3		22.69
37	28	10	19.70	78.54	4.70	3.30	2129.61		183.24	23.33	93.32	Tipo 3		23.33
38	28	10	19.70	78.54	4.70	3.33	2152.23	2143.18	180.15	22.94	91.75	Tipo 3	22.74	22.94
39	28	10	19.70	78.54	4.70	3.36	2171.62		179.54	22.86	91.44	Tipo 3		22.86
40	28	10	19.70	78.54	4.70	3.33	2152.23		178.47	22.72	90.89	Tipo 3		22.72
41	28	10	19.70	78.54	4.70	3.28	2119.91		177.70	22.63	90.50	Tipo 3		22.63
42	28	10	19.70	78.54	4.70	3.28	2119.91		179.30	22.83	91.32	Tipo 3		22.83
43	28	10	19.70	78.54	4.70	3.32	2145.76		179.43	22.85	91.38	Tipo 3		22.85
44	28	10	19.70	78.54	4.70	3.34	2158.69		175.36	22.33	89.31	Tipo 3		22.33
45	28	10	19.70	78.54	4.70	3.33	2152.23		175.78	22.38	89.52	Tipo 3		22.38

Fuente: elaboración propia.

Figura 24.

Resistencia de esfuerzo a compresión con 40% de vidrio como sustituto parcial del agregado fino en 14, 21, 28 días.



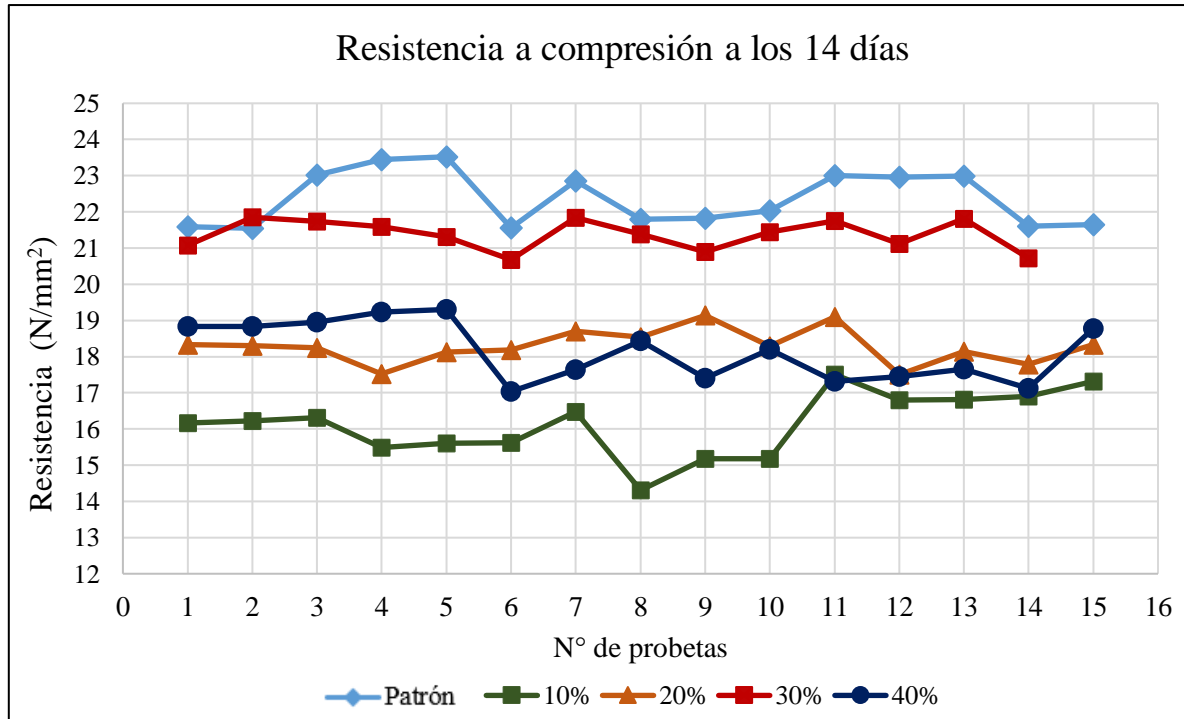
Fuente: Elaboración propia.

Interpretación: en la figura 24 se muestra la evolución del hormigón con 40% de remplazo parcial del agregado fino para una dosificación de 25 N/mm² en el transcurso del tiempo, se puede observar que a los 14 días se llega al 72.59% de la resistencia requerida, a los 21 días se obtiene una en porcentaje de 89.31%, y a los 28 días se tiene el 90.96 % de la resistencia requerida.

3.2.1.1 Evolución de Resistencia del Hormigón en los Distintos Días para el Hormigón Patrón y Para Los Distintos Porcentajes De Vidrio

Figura 25.

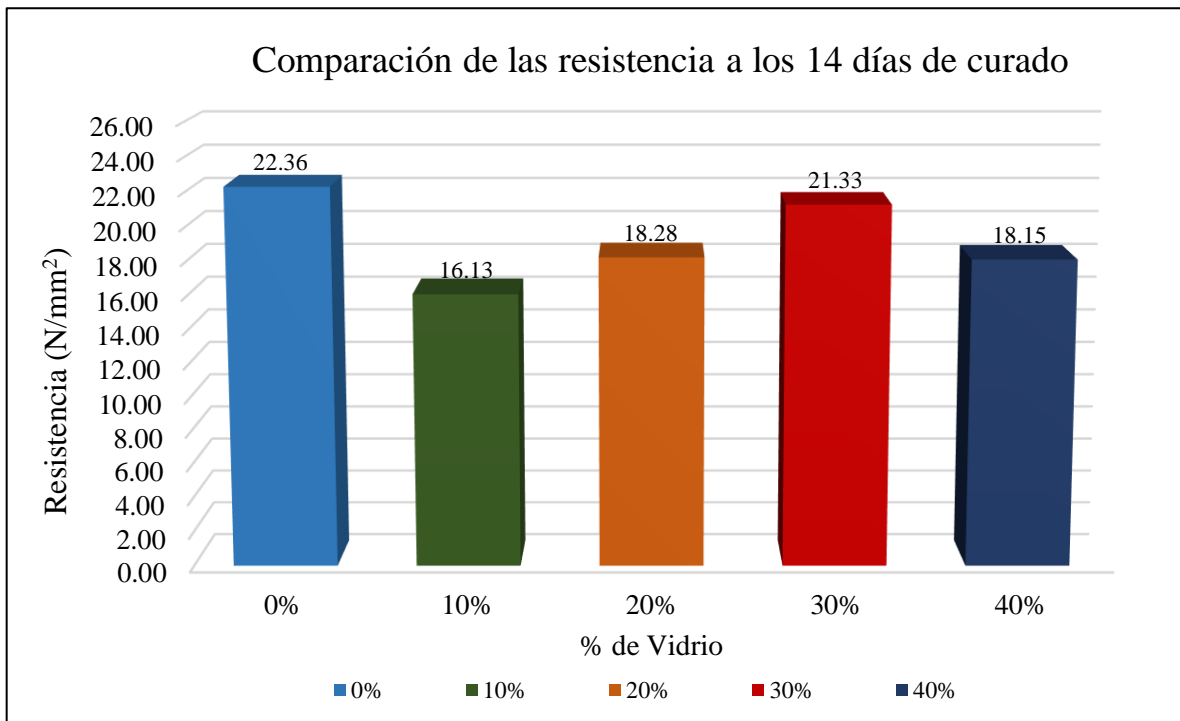
Comparación de la resistencia a compresión a los 14 días.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 26.

Resistencia a compresión del hormigón a los 14 días de edad vs. porcentaje de vidrio molido.

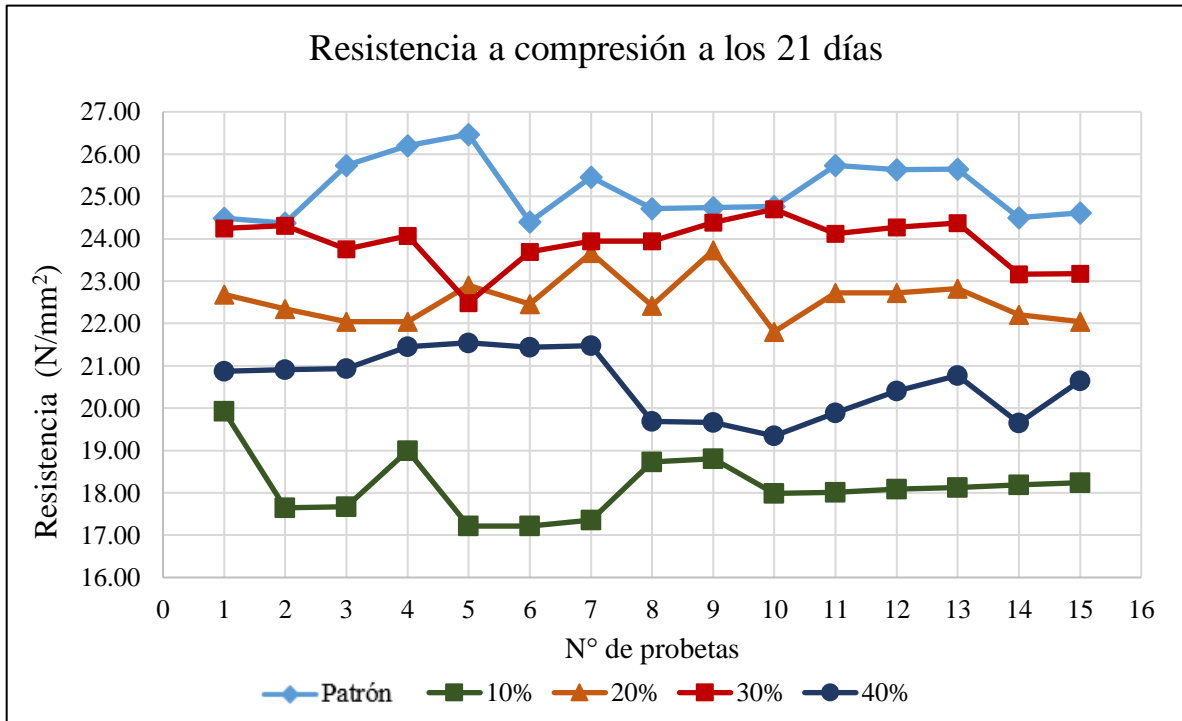


Fuente: Elaboración propia.

Interpretación: en la figura 25 y 26 se representa el ensayo de resistencia a la compresión de especímenes de hormigón a los 14 días de edad los cuales revelan que los especímenes de concreto estándar alcanzan una mayor resistencia de $f_c = 22.36 \text{ N/mm}^2$. Sin embargo, la muestra que contiene un 30 % de vidrio reciclado tiene una resistencia de $f_c = 21.33 \text{ N/mm}^2$ la cual es el que a mayor resistencia llego teniendo vidrio triturado a diferencia de los porcentajes de 10%, 20% y 40% los cuales tienen una resistencia de $f_c = 16.13 \text{ N/mm}^2$, $f_c = 18.28 \text{ N/mm}^2$ y $f_c = 18.15 \text{ N/mm}^2$ respectivamente.

Figura 27.

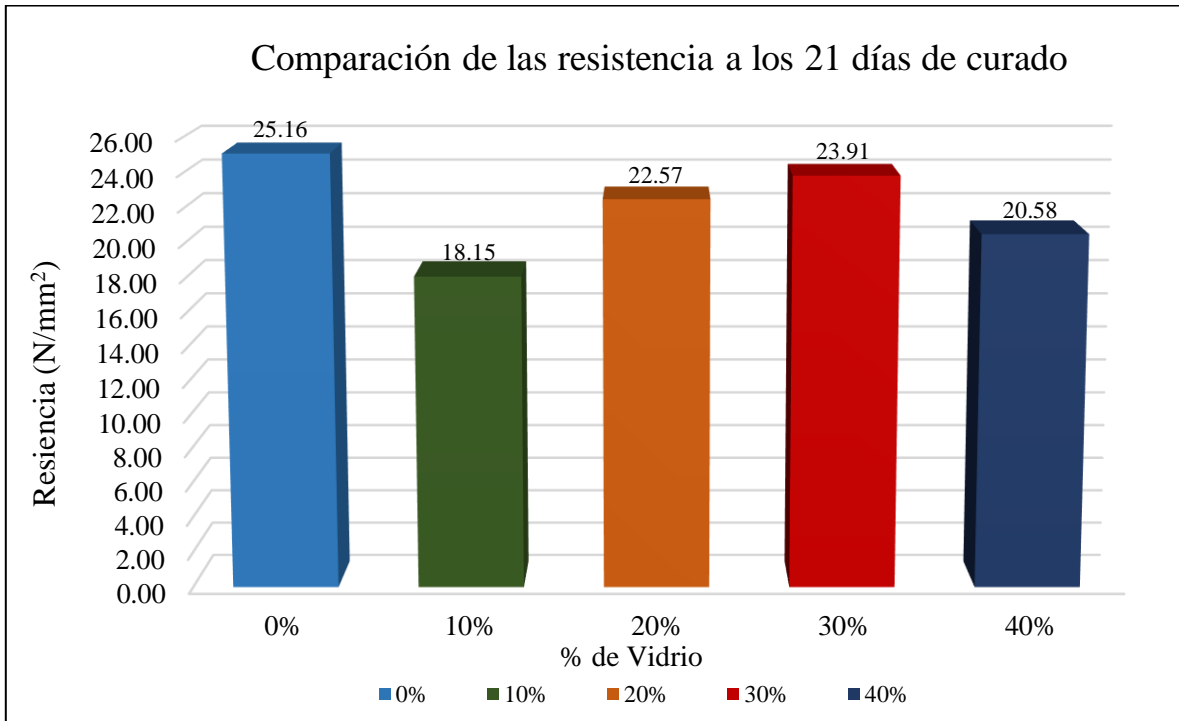
Comparación de la resistencia a compresión a los 21 días.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 28.

Resistencia a compresión del hormigón a los 21 días de edad vs. porcentaje de vidrio molido.

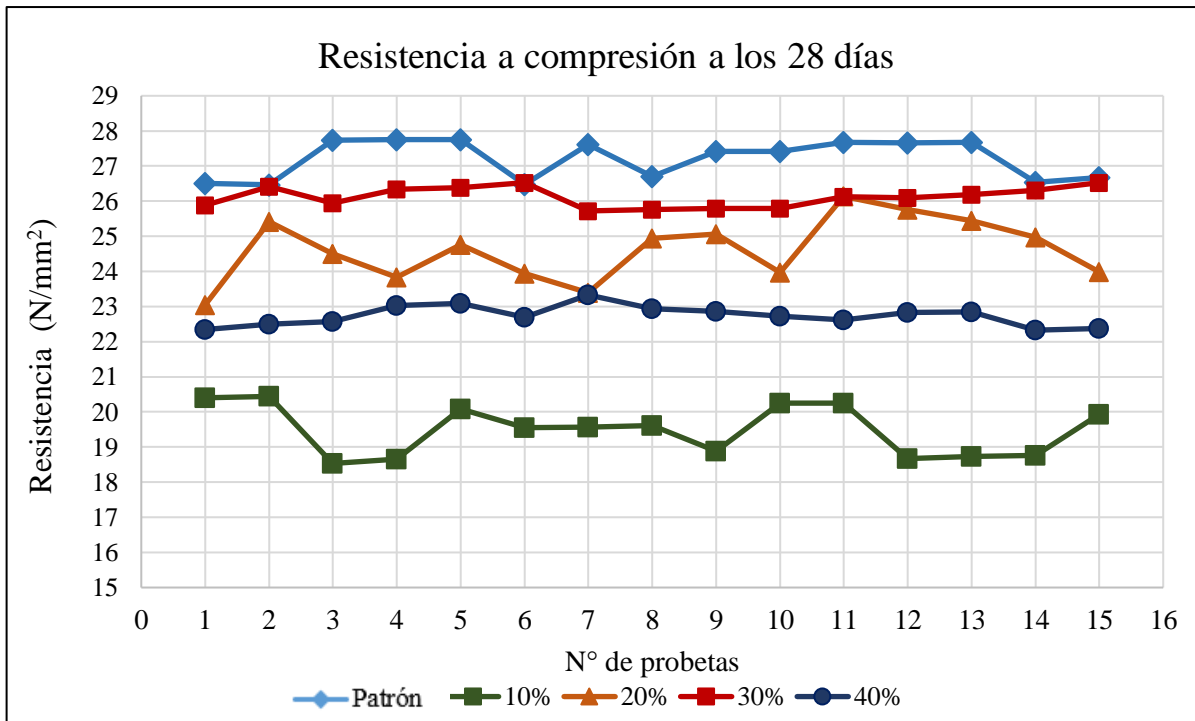


Fuente: Elaboración propia.

Interpretación: en las figuras 27 y 28 se demuestra que al igual que a los 14 días las muestras de hormigón patrón alcanza la mayor resistencia a compresión a los 21 días con un valor de $f_c = 25.16 \text{ N/mm}^2$. Esto confirma que el hormigón base mantiene buenas propiedades resistente con el tiempo. A su vez, la muestra con un porcentaje de vidrio del 30% tiene mayor resistencia que las muestras con diferentes porcentajes de vidrio con un valor de $f_c = 23.91 \text{ N/mm}^2$. Para un porcentaje de 20% se tiene $f_c = 22.57 \text{ N/mm}^2$, 40% se tiene $f_c = 20.58 \text{ N/mm}^2$ y como último se tiene el 10% con $f_c = 18.15 \text{ N/mm}^2$ siendo el porcentaje de menor resistencia.

Figura 29.

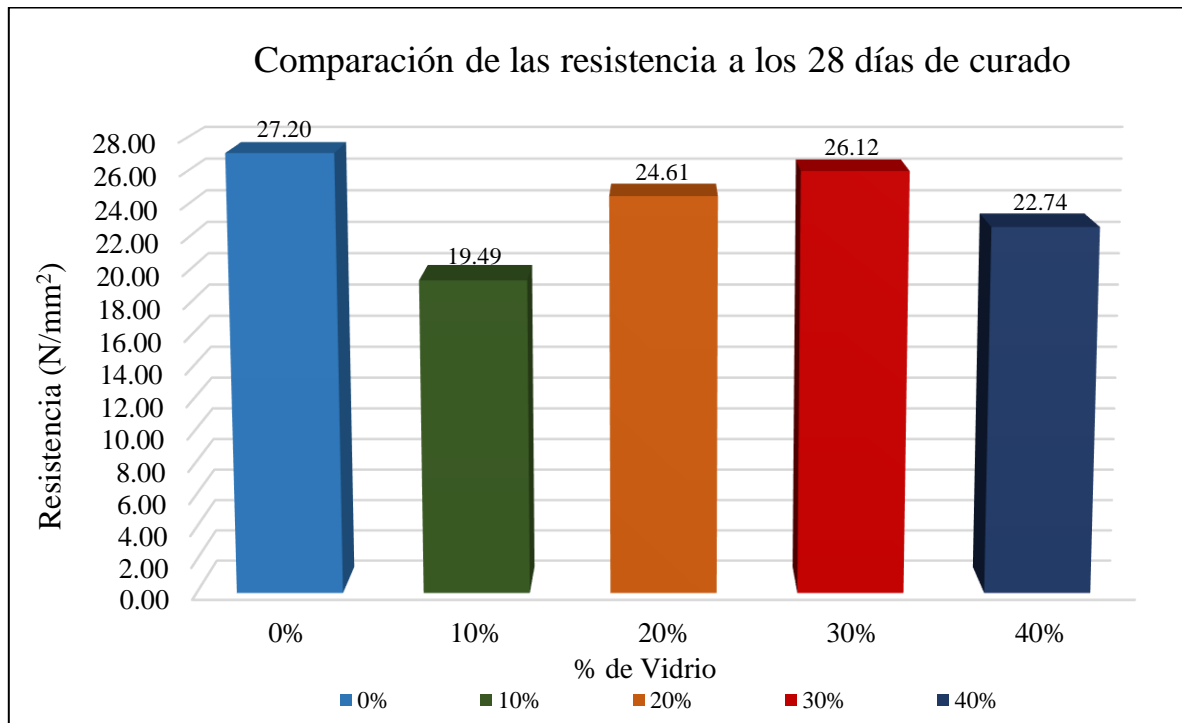
Comparación de la resistencia a compresión a los 28 días.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 30.

Resistencia a compresión del hormigón a los 28 días de edad vs. porcentaje de vidrio molido.

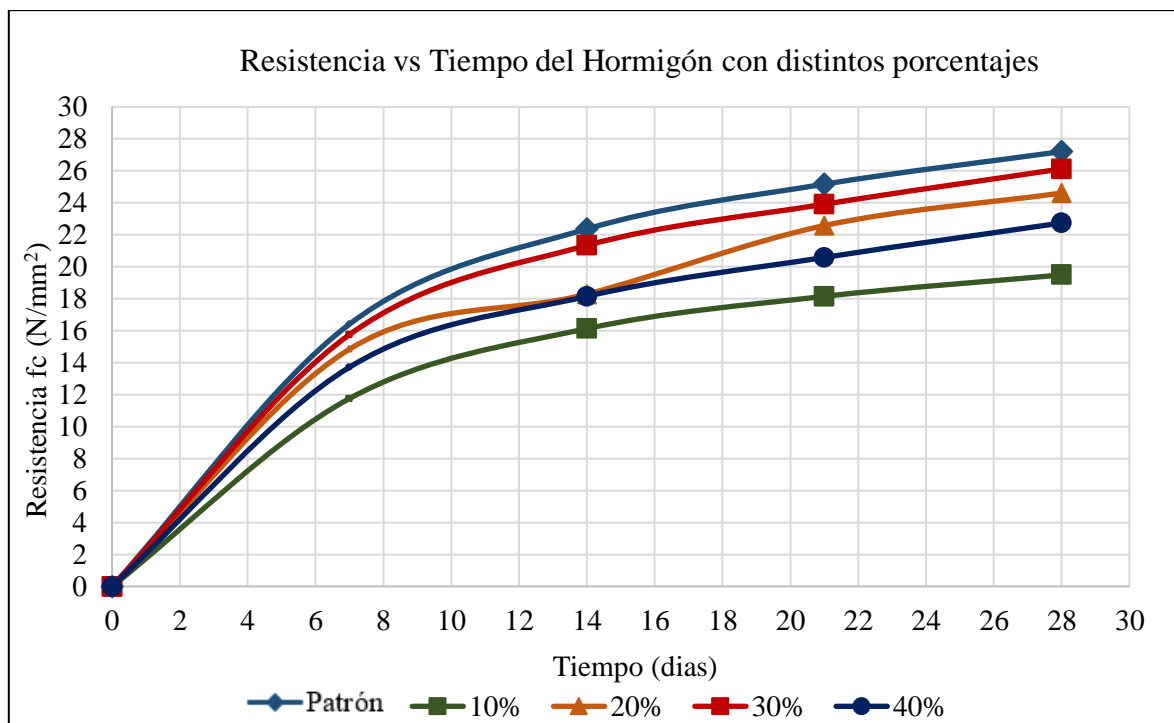


Fuente: Elaboración propia.

Interpretación: en la figura 29 y 30 se representa el ensayo a compresión de las muestras de hormigón a los 28 días de edad permite identificar que el hormigón patrón alcanzan una mayor resistencia $f'c = 27.70 \text{ N/mm}^2$, cumpliendo la dosificación deseada que era de $f'c = 25 \text{ N/mm}^2$, a la vez se observa que la muestra con porcentaje de vidrio de 30% cumple con la resistencia deseada con $f'c = 26.12 \text{ N/mm}^2$ siendo mayor a los $f'c = 25 \text{ N/mm}^2$. Los porcentajes con menor cantidad de vidrio y mayor cantidad de vidrio al de 30% no llegan a la resistencia esperada disminuyendo esta, para un porcentaje de 20% se tiene $f'c = 24.61 \text{ N/mm}^2$, 40% se tiene $f'c = 22.74 \text{ N/mm}^2$ y como último se tiene el 10% con $f'c = 19.49 \text{ N/mm}^2$ siendo el porcentaje de menor resistencia.

Figura 31.

Comparación de las resistencias a compresión del hormigón con distintos porcentajes de vidrio.



Fuente: Elaboración propia.

Interpretación: en la figura 31 se comparan las evoluciones de la resistencia del hormigón a lo largo del tiempo. Se observa que la curva correspondiente al hormigón patrón presenta los mejores resultados de resistencia. En contraste, la curva correspondiente al uso de un sustituto parcial de vidrio del 10% como arena esta curva muestra los menores resultados de resistencia en comparación con las demás curvas. Por otro lado, la curva correspondiente al uso de un 30% de vidrio molido como sustituto de la arena presenta una evolución que se acerca a los valores del hormigón patrón. En general, estos resultados sugieren que el uso de un sustituto parcial de vidrio en la mezcla de hormigón puede tener un impacto significativo en su resistencia a lo largo del tiempo, y que un porcentaje de sustitución óptimo podría estar en torno al 30%.

En conclusión, el 30% de adición de vidrio molida como sustitución parcial de árido es el porcentaje óptimo para mejorar propiedades del hormigón sin comprometer su elevada resistencia mecánica. Por debajo del 20% la adición de vidrio reduce notablemente la resistencia, mientras que por encima la disminución es igual de considerable.

3.2.1.2 Validación de Datos

Para hacer el análisis estadístico de los resultados de las probetas de hormigón se tuvo que proyectar las resistencias a los 28 días de los hormigones rotos a los 14 y 21 días.

En las siguientes tablas se observa el análisis.

Para estos datos se siguió la norma (ACI 214, 2011).

Tabla 52.

Distribución normal del hormigón patrón.

Nº	Resistencia a los 28 días (N/mm ²)	Resistencia a los 28 días de menor a mayor (N/mm ²)	Resistencia Promedio móvil de tres cilindros (N/mm ²)	Frecuencia	DISTR-NORMAL
1	25.41	25.35	25.38	1	0.09
2	25.35	25.37	25.40	1	0.10
3	27.09	25.41	25.43	1	0.11
4	27.59	25.42	25.51	1	0.13
5	27.67	25.47	25.59	1	0.15
6	25.37	25.63	25.74	1	0.20
7	26.89	25.67	25.89	1	0.25
8	25.63	25.93	26.02	1	0.31
9	25.67	26.06	26.11	1	0.34
10	25.93	26.08	26.15	1	0.36
11	27.07	26.18	26.23	1	0.39
12	27.01	26.19	26.31	1	0.42
13	27.05	26.32	26.40	1	0.45
14	25.42	26.42	26.44	1	0.46
15	25.47	26.45	26.46	1	0.47
16	26.18	26.47	26.47	1	0.47
17	26.06	26.47	26.49	1	0.47
18	27.51	26.48	26.50	1	0.48
19	28.02	26.50	26.57	1	0.49
20	28.30	26.53	26.64	1	0.50
21	26.08	26.68	26.76	1	0.51
22	27.22	26.71	26.87	1	0.51
23	26.42	26.89	26.98	1	0.50
24	26.45	27.01	27.04	1	0.49
25	26.48	27.05	27.07	1	0.49
26	27.51	27.07	27.12	1	0.47
27	27.40	27.09	27.24	1	0.44
28	27.42	27.22	27.34	1	0.40
29	26.19	27.40	27.41	1	0.38

30	26.32	27.41	27.41	1	0.38
31	26.50	27.41	27.45	1	0.37
32	26.47	27.42	27.48	1	0.35
33	27.73	27.51	27.53	1	0.33
34	27.75	27.51	27.57	1	0.32
35	27.75	27.59	27.62	1	0.30
36	26.47	27.62	27.65	1	0.28
37	27.62	27.67	27.67	1	0.28
38	26.71	27.67	27.68	1	0.27
39	27.41	27.68	27.69	1	0.27
40	27.41	27.68	27.72	1	0.26
41	27.68	27.73	27.75	1	0.25
42	27.67	27.75	27.84	1	0.21
43	27.68	27.75	28.02	1	0.15
44	26.53	28.02	-	-	-
45	26.68	28.30	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 53.

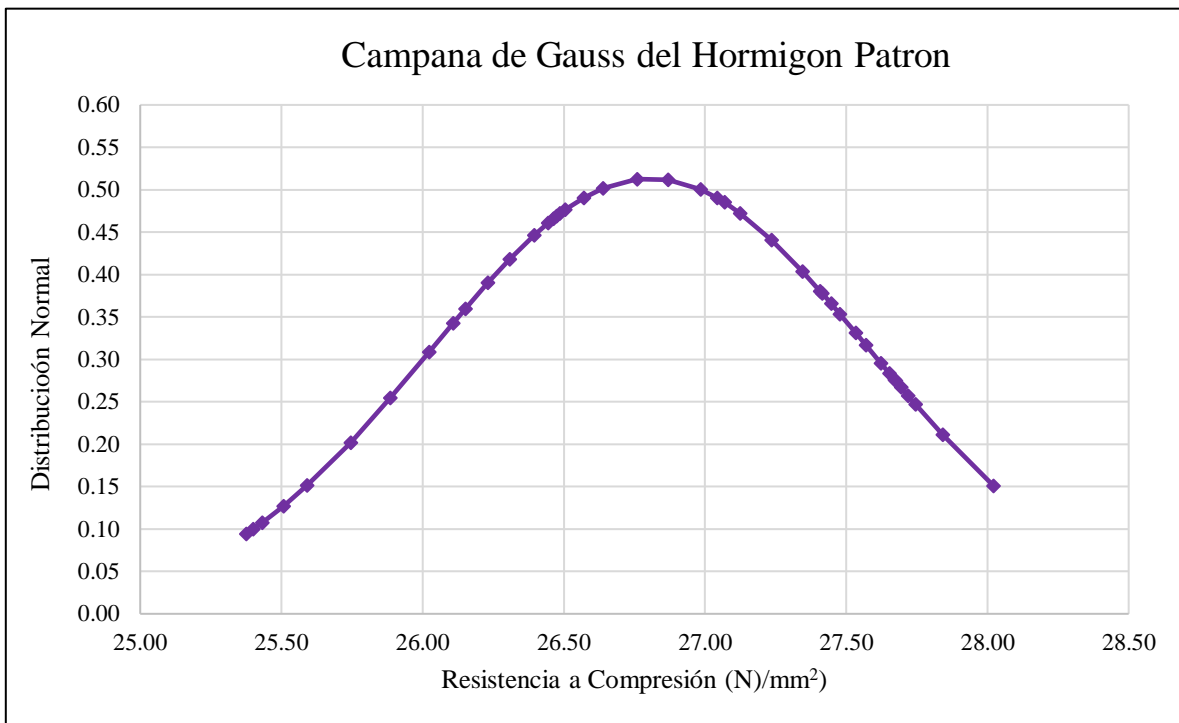
Análisis estadístico.

	Datos	Unidades	Valores de Dispersión	Criterio
Tamaño de muestra	43.00	-	-	-
Promedio	26.81	N/mm ²	-	-
Desviación estándar	0.78	N/mm ²	< 1.40	Excelente
Coefficiente de variación	2.90	-	de 3 a 4	Bueno
Comprobación del factor T	2.32	-	-	-
Máximo	28.30	N/mm ²	-	-
Mínimo	25.35	N/mm ²	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Figura 32.

Campana de Gauss del hormigón patrón.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 54.

Distribución normal del hormigón con 10% de vidrio.

Nº	Resistencia a los 28 días (N/mm ²)	Resistencia a los 28 días de menor a mayor (N/mm ²)	Resistencia Promedio móvil de tres cilindros (N/mm ²)	Frecuencia	DISTR-NORMAL
1	19.02	16.83	17.51	1	0.04
2	19.09	17.85	17.98	1	0.12
3	19.19	17.85	18.14	1	0.17
4	18.22	18.22	18.32	1	0.23
5	18.35	18.35	18.38	1	0.26
6	18.38	18.38	18.40	1	0.26
7	19.38	18.40	18.45	1	0.28
8	16.83	18.40	18.49	1	0.30
9	17.85	18.53	18.58	1	0.34
10	17.85	18.55	18.63	1	0.36
11	20.59	18.65	18.69	1	0.38
12	19.76	18.68	18.73	1	0.39

13	19.77	18.73	18.79	1	0.42
14	19.89	18.77	18.84	1	0.44
15	20.38	18.87	18.88	1	0.45
16	21.30	18.88	18.93	1	0.46
17	18.87	18.89	19.00	1	0.48
18	18.89	19.02	19.10	1	0.50
19	20.30	19.09	19.17	1	0.51
20	18.40	19.19	19.23	1	0.52
21	18.40	19.23	19.27	1	0.52
22	18.55	19.26	19.32	1	0.52
23	20.02	19.34	19.37	1	0.52
24	20.10	19.38	19.40	1	0.51
25	19.23	19.38	19.44	1	0.51
26	19.26	19.45	19.50	1	0.50
27	19.34	19.50	19.54	1	0.49
28	19.38	19.56	19.58	1	0.48
29	19.45	19.57	19.65	1	0.47
30	19.50	19.62	19.72	1	0.45
31	20.40	19.76	19.81	1	0.41
32	20.44	19.77	19.86	1	0.39
33	18.53	19.89	19.95	1	0.36
34	18.65	19.93	20.01	1	0.34
35	20.08	20.02	20.07	1	0.31
36	19.56	20.08	20.14	1	0.28
37	19.57	20.10	20.20	1	0.26
38	19.62	20.24	20.27	1	0.23
39	18.88	20.25	20.31	1	0.22
40	20.24	20.30	20.36	1	0.20
41	20.25	20.38	20.41	1	0.18
42	18.68	20.40	20.48	1	0.16
43	18.73	20.44	20.78	1	0.08
44	18.77	20.59	-	-	-
45	19.93	21.30	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 55.

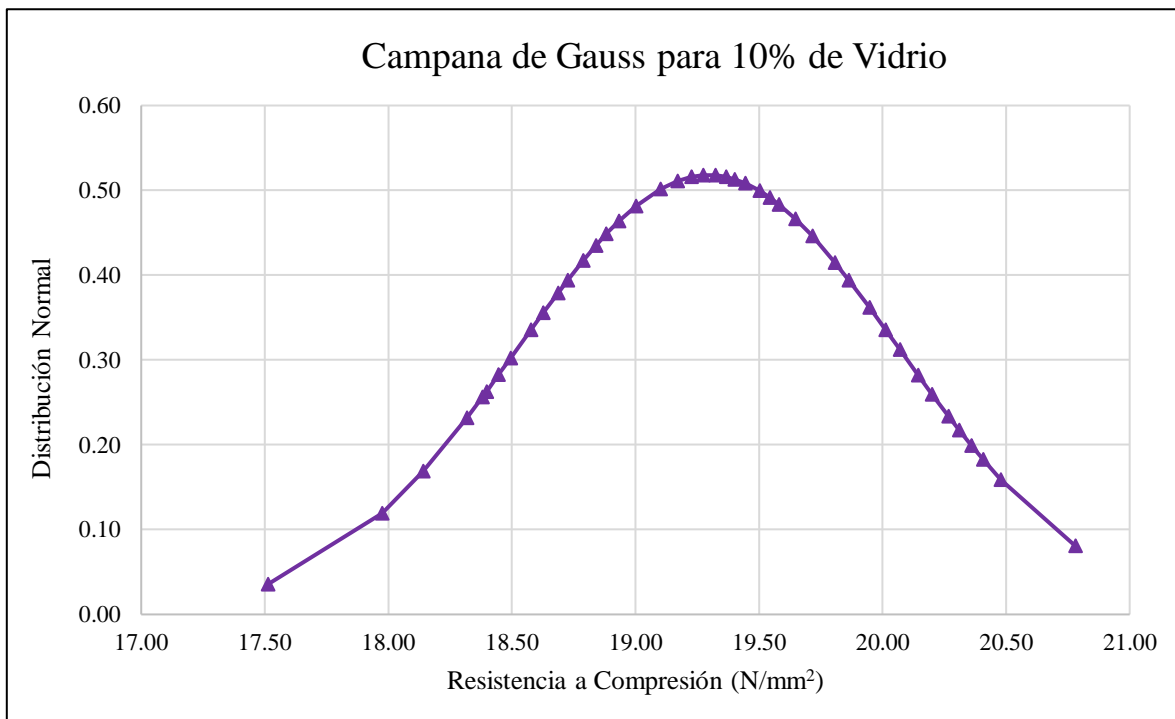
Análisis Estadístico.

	Datos	Unidades	Valores de Dispersión	Criterio
Tamaño de muestra	43.00	-	-	-
Promedio	19.29	N/mm ²	-	-
Desviación estándar	0.77	N/mm ²	< 1.41	Excelente
Coefficiente de variación	3.99	-	de 3 a 4	Bueno
Comprobación del factor T	-7.41	-	-	-
Máximo	21.30	N/mm ²	-	-
Mínimo	16.83	N/mm ²	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Figura 33.

Campana de Gauss de hormigón con 10% de vidrio.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 56.*Distribución normal del hormigón con 20% de vidrio.*

Nº	Resistencia a los 28 días (N/mm ²)	Resistencia a los 28 días de menor a mayor (N/mm ²)	Resistencia Promedio móvil de tres cilindros (N/mm ²)	Frecuencia	DISTR-NORMAL
1	21.57	20.59	20.71	1	0.05
2	21.53	20.62	20.96	1	0.06
3	21.46	20.93	21.19	1	0.08
4	20.62	21.32	21.35	1	0.10
5	21.32	21.33	21.40	1	0.10
6	21.40	21.40	21.46	1	0.11
7	22.00	21.46	21.50	1	0.11
8	21.81	21.52	21.54	1	0.12
9	22.51	21.53	21.56	1	0.12
10	21.52	21.57	21.65	1	0.13
11	22.48	21.57	21.80	1	0.15
12	20.59	21.81	22.10	1	0.18
13	21.33	22.00	22.33	1	0.21
14	20.93	22.48	22.68	1	0.24
15	21.57	22.51	22.96	1	0.26
16	24.25	23.05	23.25	1	0.27
17	23.89	23.31	23.42	1	0.27
18	23.57	23.39	23.51	1	0.27
19	23.57	23.57	23.57	1	0.27
20	24.48	23.57	23.63	1	0.27
21	24.01	23.57	23.71	1	0.27
22	25.31	23.74	23.82	1	0.26
23	23.97	23.83	23.89	1	0.26
24	25.37	23.89	23.93	1	0.26
25	23.31	23.95	23.96	1	0.26
26	24.29	23.97	23.97	1	0.26
27	24.29	23.97	23.99	1	0.25
28	24.40	23.99	24.08	1	0.25
29	23.74	24.01	24.18	1	0.24
30	23.57	24.25	24.27	1	0.23
31	23.05	24.29	24.33	1	0.23
32	25.42	24.29	24.39	1	0.22
33	24.50	24.40	24.46	1	0.21
34	23.83	24.48	24.58	1	0.20
35	24.76	24.50	24.73	1	0.18

36	23.95	24.76	24.89	1	0.16
37	23.39	24.94	24.99	1	0.15
38	24.94	24.98	25.12	1	0.14
39	25.06	25.06	25.25	1	0.12
40	23.97	25.31	25.37	1	0.11
41	26.14	25.37	25.41	1	0.11
42	25.76	25.42	25.54	1	0.10
43	25.45	25.45	25.78	1	0.07
44	24.98	25.76	-	-	-
45	23.99	26.14	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 57.

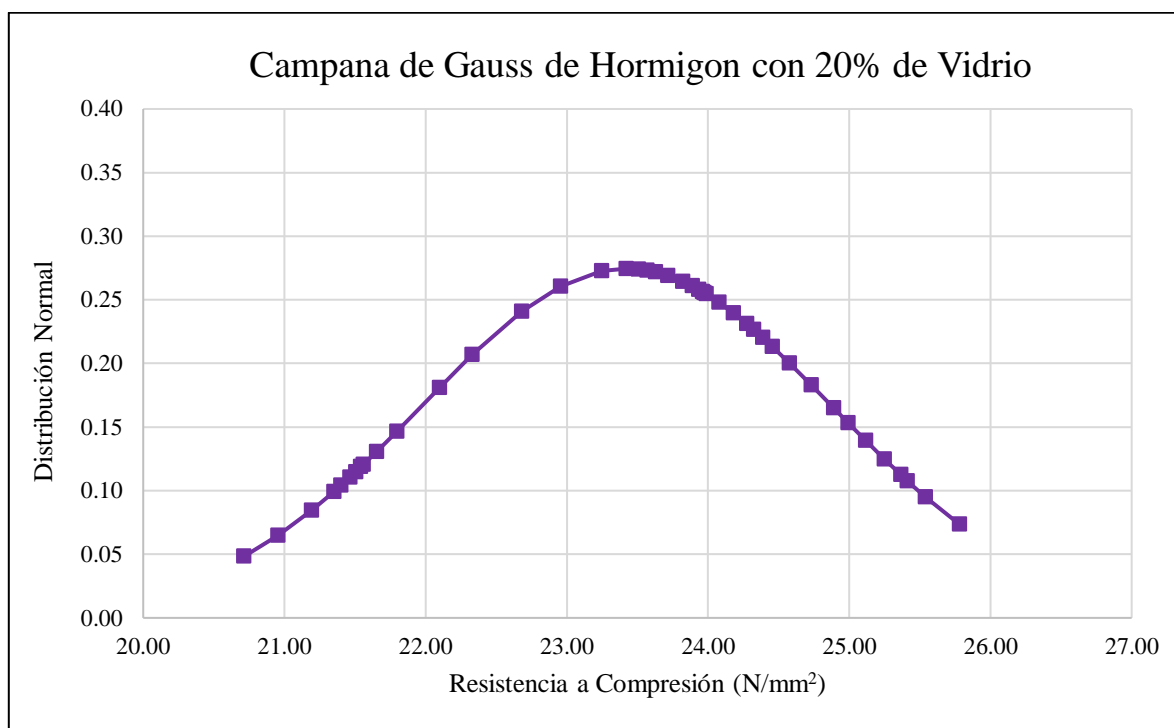
Análisis estadístico.

	Datos	Unidades	Valores de Dispersión	Criterio
Tamaño de muestra	43.00	-	-	-
Promedio	23.42	N/mm ²	-	-
Desviación estándar	1.45	N/mm ²	1.4 a 1.7	Muy bueno
Coefficiente de variación	6.21	-	>5	Deficiente
Comprobación del factor T	-1.08	-	-	-
Máximo	26.14	N/mm ²	-	-
Mínimo	20.59	N/mm ²	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Figura 34.

Campana de Gauss de hormigón con 20% de vidrio.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 58.

Distribución normal del hormigón con 30% de vidrio.

Nº	Resistencia a los 28 días (N/mm ²)	Resistencia a los 28 días de menor a mayor (N/mm ²)	Resistencia Promedio móvil de tres cilindros (N/mm ²)	Frecuencia	DISTR-NORMAL
1	24.44	24.04	24.25	1	0.05
2	24.78	24.33	24.38	1	0.08
3	25.71	24.38	24.47	1	0.11
4	25.57	24.44	24.60	1	0.16
5	25.40	24.58	24.71	1	0.22
6	25.06	24.77	24.78	1	0.26
7	24.33	24.78	24.80	1	0.27
8	25.69	24.78	24.90	1	0.33
9	25.15	24.84	25.02	1	0.41
10	24.58	25.06	25.15	1	0.50
11	25.23	25.15	25.24	1	0.55

12	25.59	25.23	25.32	1	0.60
13	24.84	25.33	25.38	1	0.62
14	25.66	25.40	25.46	1	0.65
15	24.38	25.40	25.52	1	0.66
16	25.92	25.57	25.59	1	0.67
17	25.99	25.59	25.60	1	0.67
18	25.40	25.60	25.62	1	0.67
19	25.73	25.60	25.65	1	0.67
20	24.04	25.66	25.69	1	0.66
21	25.33	25.69	25.71	1	0.66
22	25.60	25.71	25.72	1	0.66
23	25.60	25.72	25.74	1	0.65
24	26.07	25.73	25.76	1	0.65
25	26.41	25.76	25.78	1	0.64
26	25.79	25.79	25.79	1	0.64
27	25.95	25.79	25.82	1	0.63
28	26.05	25.80	25.87	1	0.61
29	24.77	25.88	25.92	1	0.58
30	24.78	25.92	25.94	1	0.57
31	25.88	25.95	25.96	1	0.56
32	26.42	25.95	26.00	1	0.54
33	25.95	25.99	26.04	1	0.51
34	26.33	26.05	26.07	1	0.49
35	26.38	26.07	26.10	1	0.48
36	26.53	26.09	26.13	1	0.45
37	25.72	26.12	26.21	1	0.40
38	25.76	26.19	26.28	1	0.35
39	25.79	26.31	26.34	1	0.31
40	25.80	26.33	26.37	1	0.29
41	26.12	26.38	26.40	1	0.27
42	26.09	26.41	26.45	1	0.24
43	26.19	26.42	26.49	1	0.22
44	26.31	26.53	-	-	-
45	26.53	26.53	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 59.

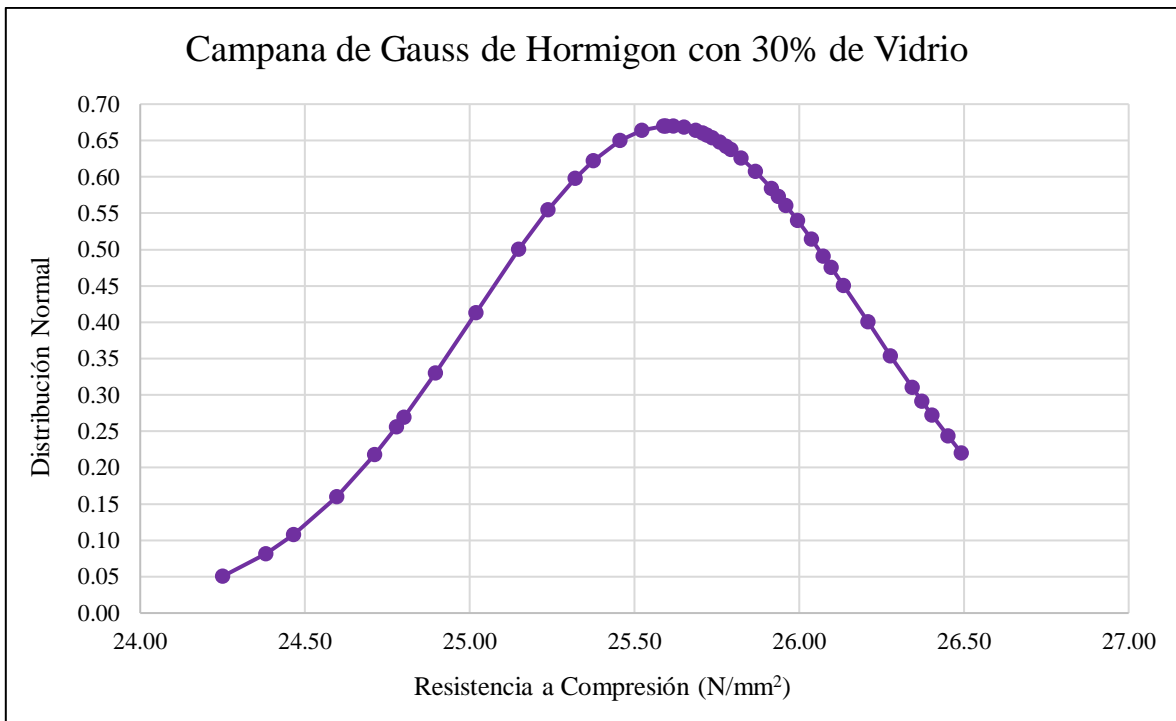
Análisis estadístico.

	Datos	Unidades	Valores de Dispersión	Criterio
Tamaño de muestra	43.00	-	-	-
Promedio	25.60	N/mm ²	-	-
Desviación estándar	0.60	N/mm ²	< 1.41	Excelente
Coefficiente de variación	2.33	-	de 3 a 4	Bueno
Comprobación del factor T	1.02	-	-	-
Máximo	26.53	N/mm ²	-	-
Mínimo	24.04	N/mm ²	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Figura 35.

Campana de Gauss de hormigón con 30% de vidrio.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 60.*Distribución normal del hormigón con 40% de vidrio.*

Nº	Resistencia a los 28 días (N/mm2)	Resistencia a los 28 días de menor a mayor (N/mm2)	Resistencia Promedio móvil de tres cilindros (N/mm2)	Frecuencia	DISTR-NORMAL
1	22.16	20.04	20.19	1	0.05
2	22.16	20.14	20.33	1	0.07
3	22.29	20.38	20.46	1	0.09
4	22.62	20.48	20.57	1	0.11
5	22.71	20.53	20.66	1	0.13
6	20.04	20.68	20.74	1	0.15
7	20.76	20.76	20.85	1	0.18
8	21.69	20.78	20.93	1	0.20
9	20.48	21.00	21.02	1	0.23
10	21.41	21.02	21.11	1	0.26
11	20.38	21.04	21.24	1	0.30
12	20.53	21.27	21.45	1	0.36
13	20.78	21.41	21.64	1	0.41
14	20.14	21.69	21.86	1	0.45
15	22.09	21.82	21.99	1	0.46
16	22.31	22.07	22.11	1	0.46
17	22.35	22.09	22.14	1	0.45
18	22.38	22.16	22.18	1	0.45
19	22.94	22.16	22.22	1	0.45
20	23.03	22.21	22.27	1	0.44
21	22.93	22.29	22.31	1	0.44
22	22.95	22.31	22.33	1	0.43
23	21.04	22.33	22.34	1	0.43
24	21.02	22.35	22.36	1	0.43
25	20.68	22.35	22.37	1	0.43
26	21.27	22.38	22.42	1	0.42
27	21.82	22.38	22.48	1	0.40
28	22.21	22.49	22.56	1	0.38
29	21.00	22.58	22.61	1	0.37
30	22.07	22.62	22.65	1	0.36
31	22.35	22.63	22.68	1	0.35
32	22.49	22.69	22.71	1	0.34
33	22.58	22.71	22.75	1	0.33
34	23.02	22.72	22.80	1	0.32
35	23.09	22.83	22.85	1	0.30
36	22.69	22.85	22.88	1	0.29
37	23.33	22.86	22.91	1	0.28
38	22.94	22.93	22.93	1	0.27
39	22.86	22.94	22.94	1	0.27

40	22.72	22.94	22.97	1	0.26
41	22.63	22.95	23.00	1	0.25
42	22.83	23.02	23.05	1	0.24
43	22.85	23.03	23.15	1	0.21
44	22.33	23.09	-	-	-
45	22.38	23.33	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 61.

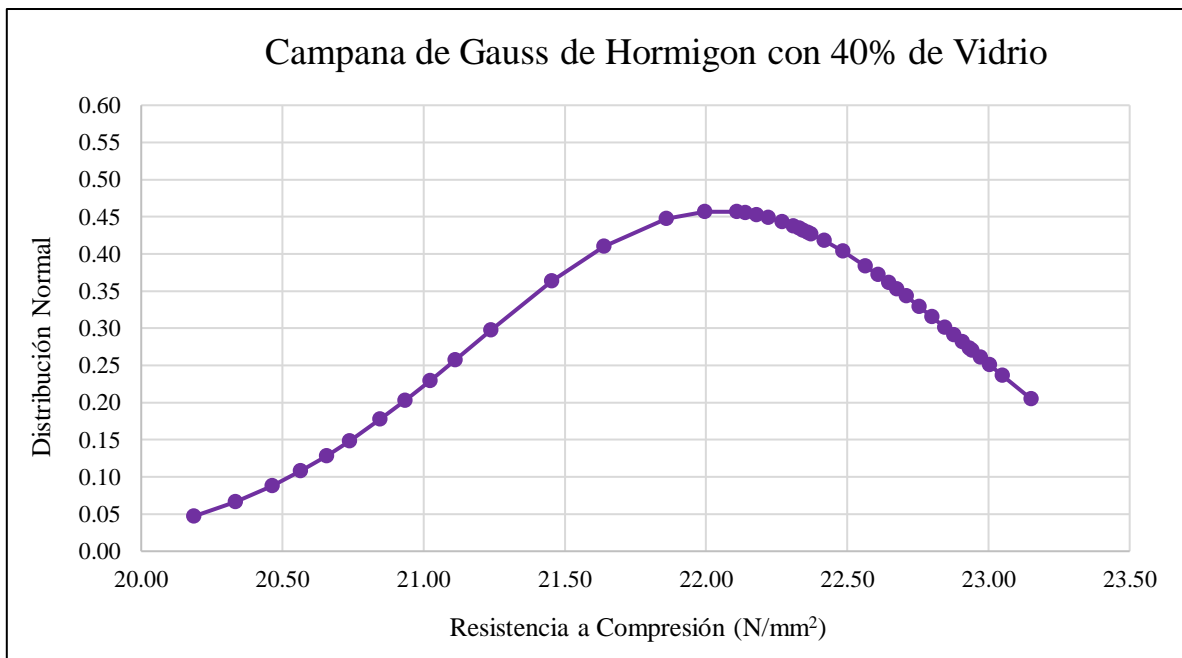
Análisis estadístico.

	Datos	Unidades	Valores de Dispersión	Criterio
Tamaño de muestra	43.00	-	-	-
Promedio	22.05	N/mm ²	-	-
Desviación estándar	0.87	N/mm ²	< 1.41	Excelente
Coefficiente de variación	3.96	-	de 3 a 4	Bueno
Comprobación del factor T	-3.39	-	-	-
Máximo	23.33	N/mm ²	-	-
Mínimo	20.04	N/mm ²	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Figura 36.

Campana de Gauss de hormigón con 40% de vidrio.



Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.3 Determinación del Porcentaje Óptimo de Vidrio como Sustituto Parcial de Agregado Fino

Tabla 62.

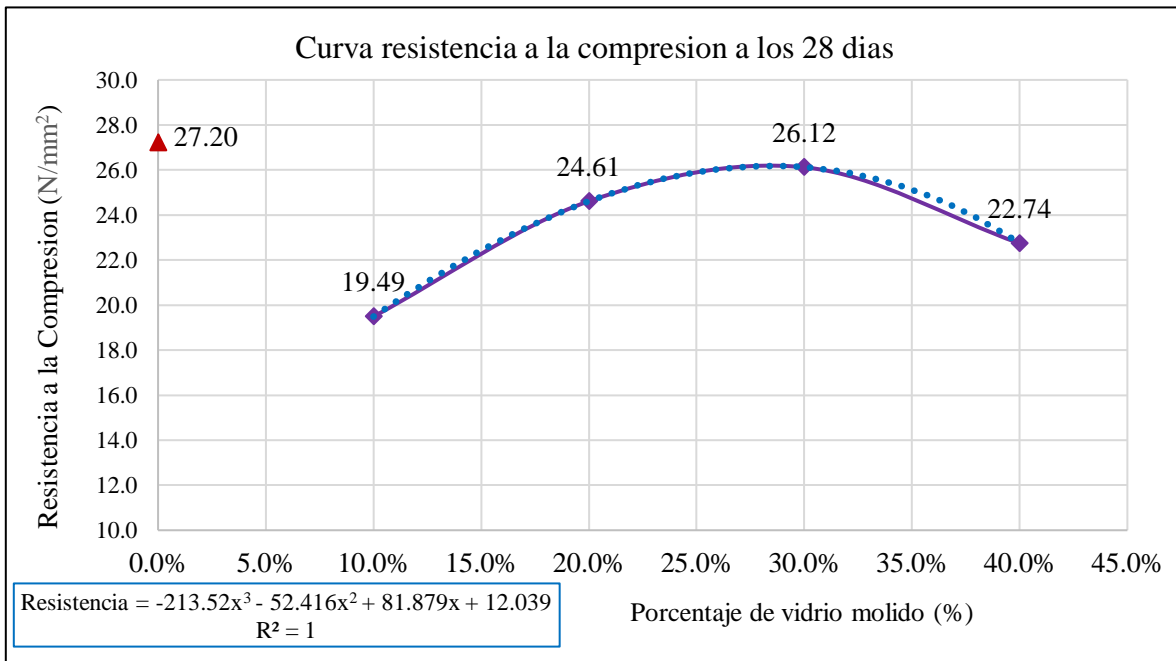
Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días de edad.

N°	% de Vidrio	∅ cm	h cm	Área cm ²	V m ³	Densidad promedio kg/m ³	Promedio de esfuerzo a compresión Fc N/mm ²
1	0%	10.00	19.70	78.54	0.0015	2158.69	27.20
2	10%	10.00	19.70	78.54	0.0015	2154.38	19.49
3	20%	10.00	19.70	78.54	0.0015	2153.52	24.61
4	30%	10.00	19.70	78.54	0.0015	2150.50	26.12
5	40%	10.00	19.70	78.54	0.0015	2143.18	22.74

Fuente: Elaboración propia.

Figura 37.

Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días de edad.



Fuente: Elaboración propia.

Interpretación: En la figura 37 se comparan las evoluciones de la resistencia del hormigón a lo largo del tiempo. Se observa que la curva correspondiente al hormigón patrón presenta los mejores resultados de resistencia. En contraste, la curva correspondiente al uso de un sustituto parcial de vidrio del 10% como arena muestra los menores resultados de resistencia en comparación con las demás curvas. Por otro lado, la curva correspondiente al uso de un 30% de vidrio molido como sustituto de la arena presenta una evolución que se acerca a los valores del hormigón patrón. En general, estos resultados sugieren que el uso de un sustituto parcial de vidrio en la mezcla de hormigón puede tener un impacto significativo en su resistencia a lo largo del tiempo, y que un porcentaje de sustitución óptimo podría estar en torno al 30%. De acuerdo a la ecuación conseguida se puede obtener el porcentaje óptimo:

$$R = -213.52 * X^3 - 52.416 * X^2 + 81.879 * X + 12.039 \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

R = Resistencia (N/mm²)

X = Porcentaje óptimo de vidrio

Si remplazamos en la fórmula para un porcentaje de 28.5% que sería X= 0.285 se tiene:

$$R = -213.52 * 0.285^3 - 52.416 * 0.285^2 + 81.879 * 0.285 + 12.039 \quad \text{Ecuación 10}$$

$$R = 26.18 \text{ N/mm}^2$$

De la ecuación 9 para un porcentaje de 28.5% de vidrio triturado como sustituto parcial del agregado fino da la dureza más alta que se puede lograr con un sustituto del vidrio como la arena.

CAPÍTULO IV

CAPÍTULO IV

4 Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

Durante el desarrollo de este trabajo se analizó la resistencia a la compresión del hormigón $f'c = 25 \text{ N/mm}^2$ empleando vidrio molido reciclado como sustituto parcial del agregado fino en distintas proporciones.

Se analizaron 4 porcentajes de sustitución (10%, 20%, 30% y 40%) para determinar su efecto sobre la resistencia mecánica ($f'c = 25 \text{ N/mm}^2$). El hormigón sin adición de vidrio (patrón) se empleó como referencia.

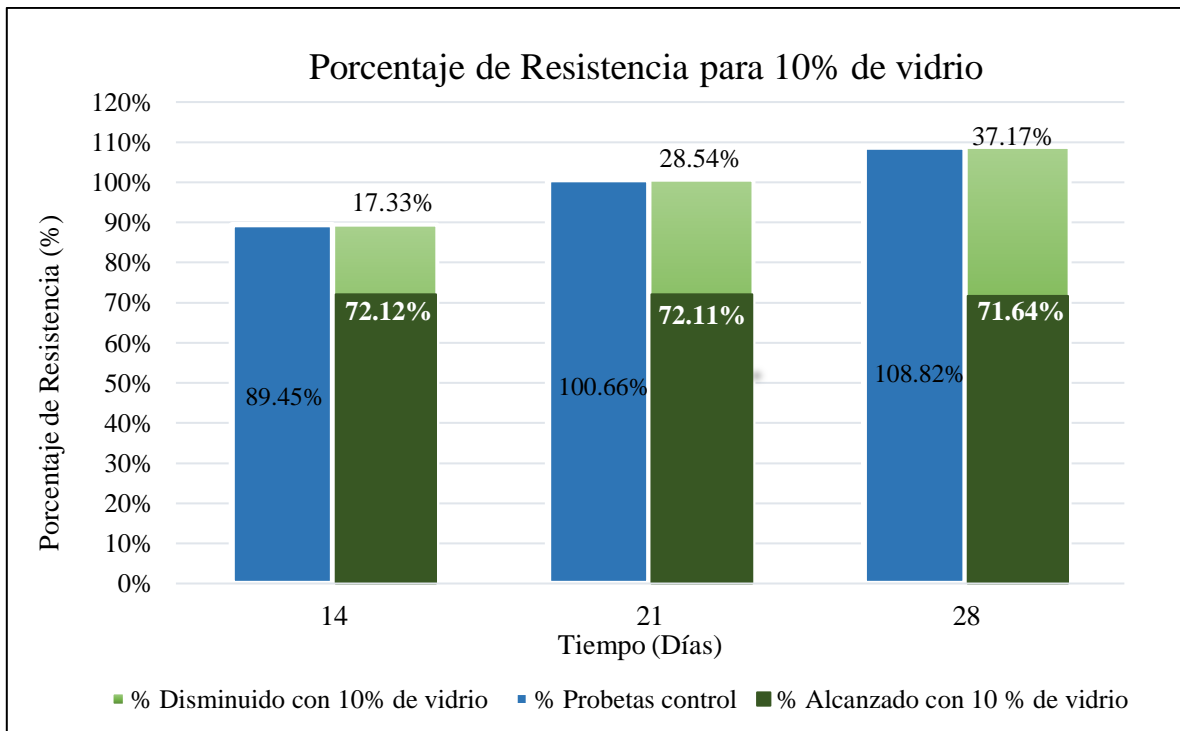
En este trabajo, no se pudo validar la hipótesis planteada ya que, contrariamente a lo esperado, la resistencia a compresión del hormigón disminuyó con los distintos porcentajes de sustitución de vidrio como agregado fino. Sin embargo, se logró determinar que el porcentaje óptimo de sustitución es del 28.5%, lo que minimiza la pérdida de resistencia en un 1.5%. Estos resultados indican que el vidrio puede ser utilizado como sustituto parcial del agregado fino en la producción de materiales de construcción, aunque se debe tener en cuenta que el aumento del porcentaje de sustitución puede tener efectos negativos en la resistencia del material.

- En conclusión, el estudio demostró que, al agregar vidrio molido como sustituto parcial del agregado fino en diferentes porcentajes, no se logró incrementar la resistencia a compresión en comparación con el hormigón patrón, ya que se observó una disminución en la resistencia en todos los porcentajes de remplazo.

- La adición de 10% de vidrio produjo las mayores disminuciones de resistencia, del 17.33%-28.54% y 37.17% a los 14-21 y 28 días en comparación con el hormigón de control como se puede observar en la figura 38. Se considera poco recomendable por el elevado impacto.

Figura 38.

Porcentaje de resistencia con 10% de vidrio molido como sustituto.

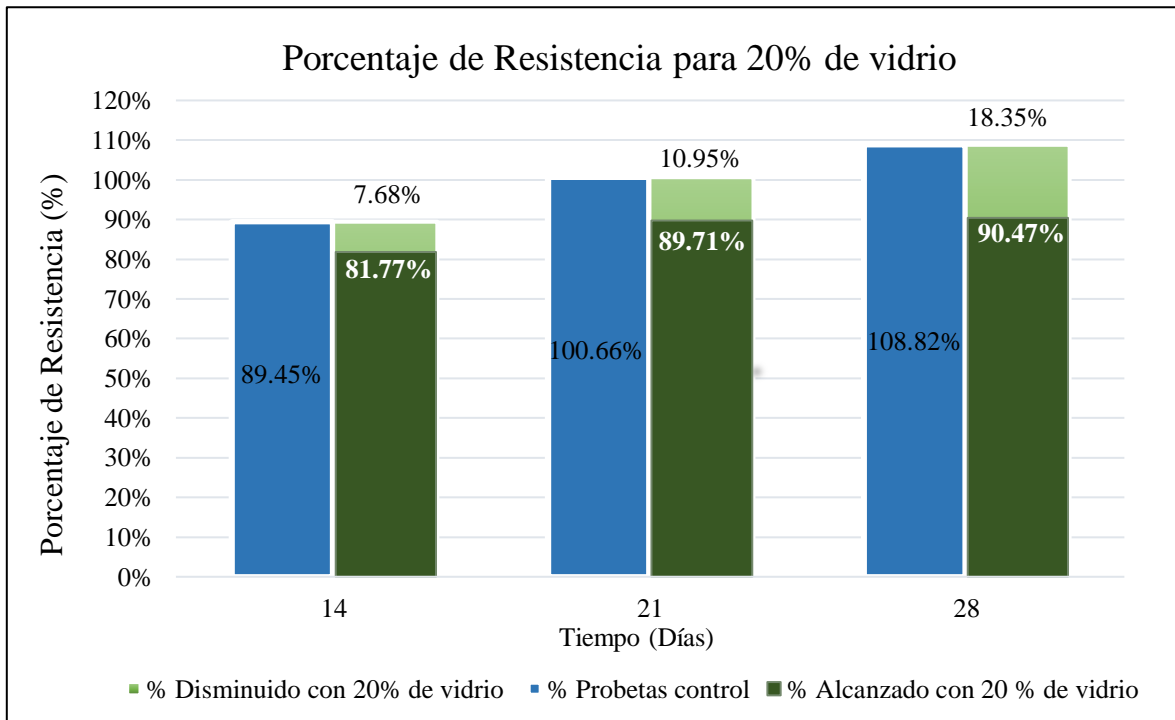


Fuente: Elaboración propia.

- La adición de 20% de vidrio reducido resistencia en 7.68%-10.95% y 18.35% a los 14-21 y 28 días en comparación con el hormigón de control que se muestra en la figura 39. Se sugiere que puede ampliar los beneficios ambientales con mayor impacto, aunque todavía moderado, en propiedades estructurales.

Figura 39.

Porcentaje de resistencia con 20% de vidrio molido como sustituto.

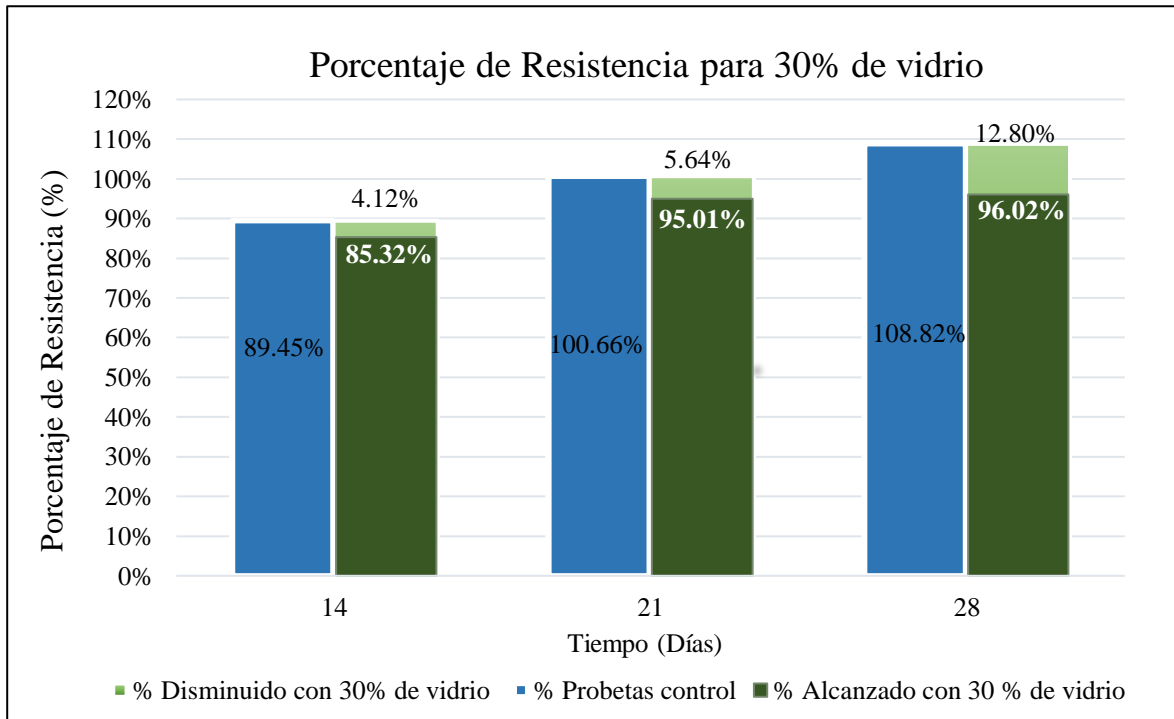


Fuente: Elaboración propia.

- La adición de 30% de vidrio ocasionó la menor disminución de resistencia al tener una disminución de 4.12%-5.64% y 12.80% a los 14-21 y 28 días en comparación con el hormigón de control esto se expone en la figura 40.

Figura 40.

Porcentaje de resistencia con 30% de vidrio molido como sustituto.



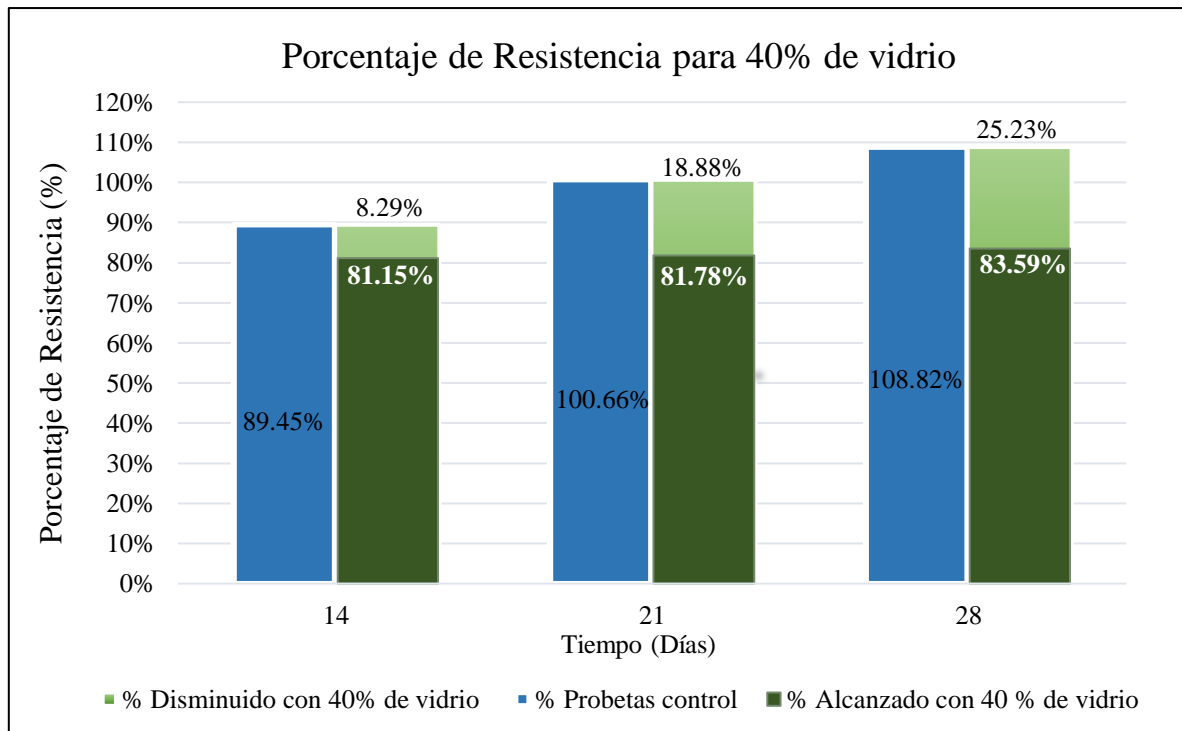
Fuente: Elaboración propia

- Al tener una disminución de 12.80% a 28 días, alcanzando una resistencia de 26.12 N/mm² que es mayor a la resistencia calculada Se considera la opción más óptima que maximiza los beneficios ambientales con menor riesgo para la capacidad estructural.

- La adición de 40% vidrio reducido resistencia en 8.29%-18.88% y 25,23% a los 14-21 y 28 días en comparación con el hormigón de control, esto es mostrada en a figura 41. Nuevamente, no se recomienda por el alto impacto que podría suponer para la seguridad estructural.

Figura 41.

Porcentaje de resistencia con 40% de vidrio molido como sustituto.



Fuente: Elaboración propia.

- De acuerdo a la ecuación 9 y los resultados que arroja para 28.5% de adición de vidrio triturado como sustitución parcial del agregado fino, se pueden extraer las siguientes conclusiones:
 - La ecuación 9 es un polinomio de tercer grado ajustado a los valores de resistencia a compresión de las probetas de hormigón a los 28 días con distintos porcentajes de adición de vidrio. Su resolución para 28.5% de sustitución permite determinar la resistencia máxima que puede alcanzarse con este porcentaje.
 - La resistencia máxima calculada por la ecuación 9 para un 28.5% de adición de vidrio triturado asciende a 26.18 N/mm². Este valor se presenta como la

resistencia óptima que puede obtenerse sustituyendo parcialmente el agregado fino por este porcentaje de vidrio.

- En conclusión, la ecuación 9 y sus resultados confirman que entre un 20-30% de adición de vidrio es el rango en el que se optimizan las propiedades del hormigón sin reducir considerablemente su alta resistencia mecánica (superior a 25 N/mm^2).
 - Se afirma la recomendación de no superar el 30% de adición de vidrio para enriquecer al hormigón preservando intactas propiedades mecánicas a largo plazo. Valores mayores, como 28.5%, suponen un riesgo de comprometer su capacidad estructural a pesar de los aparentes beneficios en resistencia.
- Se cumplido con la metodología de recolección de los desechos de vidrio y la limpieza adecuada de las botellas de vidrio antes de su uso en la mezcla de hormigón.
- La limpieza de las botellas de vidrio es esencial para garantizar que no haya contaminantes externos presentes en la mezcla de hormigón, lo que podría afectar negativamente la calidad del material.
 - La eliminación de todo el material orgánico e inorgánico, tanto del interior como del exterior de las botellas de vidrio, ayuda a asegurar que el vidrio molido reciclado sea lo más puro posible y que no contenga impurezas que puedan afectar la calidad del hormigón.
 - Es fundamental que se sigan los procedimientos adecuados para la recolección y la limpieza del vidrio reciclado antes de su uso en la producción de hormigón. Esto no solo garantiza la calidad del hormigón, sino que también ayuda a reducir el impacto ambiental al dar un segundo uso a los desechos de vidrio en lugar de desecharlos en la basura.
- Se logró realizar con éxito todos los ensayos que requiere de la norma ASTM para la caracterización física de los agregados gruesos y finos y la por lo tanto también se aplicó la misma norma para caracterizar el árido reciclado de vidrio y asegurar su idoneidad para utilizarlo en la mezcla de hormigón. Los ensayos realizados específicamente para el árido de vidrio fueron:
- Análisis granulométrico: para determinar la distribución del tamaño de partículas del árido de vidrio en el cual se determinó que el vidrio cumple con los rangos

exigidos por la norma así obteniendo un módulo de finura de: 2.70 entrando en el rango de 2.3 a 3.1.

- También se realizó un análisis granulométrico con la mezcla de arena y vidrio en los distintos porcentajes (10%,20%,30%, y 40%) teniendo diferentes módulos de finuras las cuales se encuentran en la tabla 63:

Tabla 63.

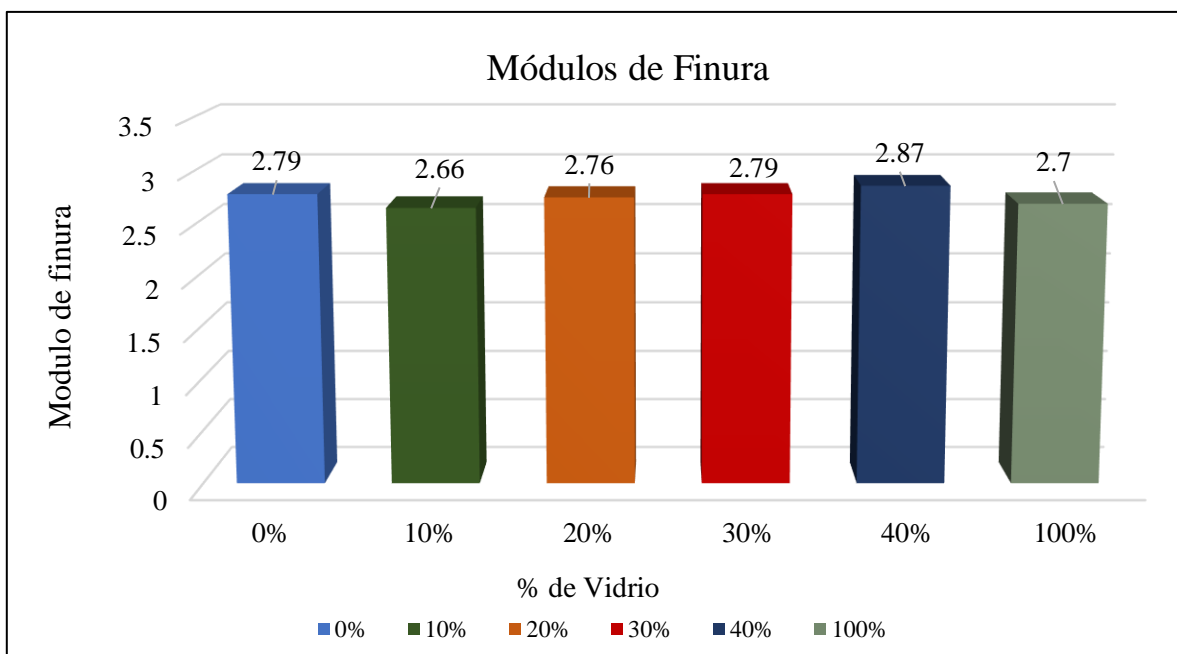
Módulo de finura de la arena y los distintos porcentajes de vidrio.

Módulo de finura	
0%	2.79
10%	2.66
20%	2.76
30%	2.79
40%	2.87
100%	2.7

Fuente: Elaboración propia.

Figura 42.

Módulo de finura de la arena y los distintos porcentajes de vidrio,

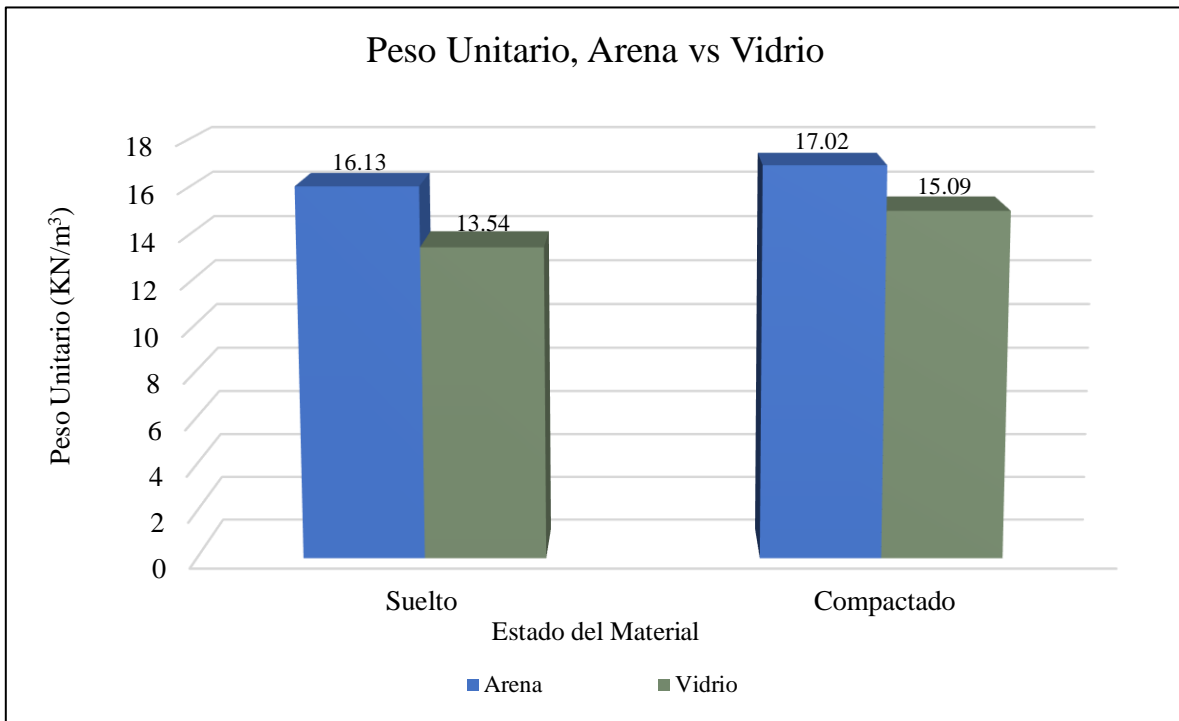


Fuente: Elaboración propia.

- Se ha analizado la granulometría y el módulo de finura del árido de vidrio reciclado para diferentes porcentajes de sustitución de arena (10%, 20%, 30% y 40%). Los resultados permiten extraer las siguientes conclusiones:
 - ✓ Para un 10% de sustitución, se obtiene el módulo de finura más bajo, lo que indica que la granulometría es la más fina y por tanto la más fina de todas las muestras. Un porcentaje bajo de sustitución produce un árido más fino.
 - ✓ El máximo módulo de finura, por tanto, el árido más gruesa, corresponde al 40% de sustitución. Un alto porcentaje de sustitución da lugar a un árido más grueso.
 - ✓ El módulo de finura de la arena natural sin modificar es 2,79, valor que coincide con la muestra que sustituye el 30% de arena por vidrio reciclado. Esto significa que un 30% de sustitución produce un árido con la misma granulometría que la arena original.
 - ✓ Por tanto, se puede concluir que el 30% es el porcentaje óptimo de sustitución de arena por árido de vidrio reciclado, ya que proporciona un árido con la misma granulometría que la arena natural, lo que presumiblemente no afecta negativamente a las propiedades del hormigón resultante.
- Densidad Aparente “Peso Unitario” del Vidrio se realizó el ensayo tanto en estado suelto como en compactado. Los resultados son mostrados en la figura 43.

Figura 43.

Peso unitario del agregado fino vs vidrio molido.



Fuente: Elaboración propia.

- ✓ Peso unitario suelto del vidrio: 13.54 KN/m³. La densidad suelta del árido de vidrio es menor que la del agregado fino (arena). La diferencia es de un 16.06%.
- ✓ Peso unitario compactado del vidrio: 15.09 KN/m³. La densidad aparente compactada del vidrio también es menor que la del agregado fino, en este caso la diferencia es del 11.34 %.
- ✓ Por tanto, se puede concluir que la densidad del árido de vidrio reciclado, tanto suelto como compactado, es inferior a la de un agregado fino convencional como la arena. Las diferencias son del orden del 16-11% aproximadamente.
- El peso específico del vidrio no se logró realizar por la norma ASTM C 128 ya que el vidrio no presenta absorción por lo tanto se utilizó el método de desplazamiento de volúmenes.

- ✓ Este método dio como resultado un peso específico del vidrio de 25.4 KN/m³.
- ✓ El valor del peso específico del vidrio 25.4 KN/m³ obtenido es inferior al de los agregados minerales comunes, que suelen tener valores en torno a 26.45 KN/m³. Este hecho puede tener cierta influencia en las propiedades del hormigón en el que se utilice, como se ha comentado previamente para la densidad aparente. No obstante, se trata de una diferencia relativamente pequeña, por lo que probablemente el impacto en el hormigón final no sea muy significativo.
- ✓ También se analizó el peso específico de la arena mezclada con los diferentes porcentajes de vidrio (10%, 20%, 30% y 40%) y se muestran en la tabla 64 y su representación figura en la figura 44 estos ensayos fueron realizados con la norma ASTM C 128 del cual se tiene distintos resultados del peso específico ya que el vidrio no presenta absorción.

Tabla 64.

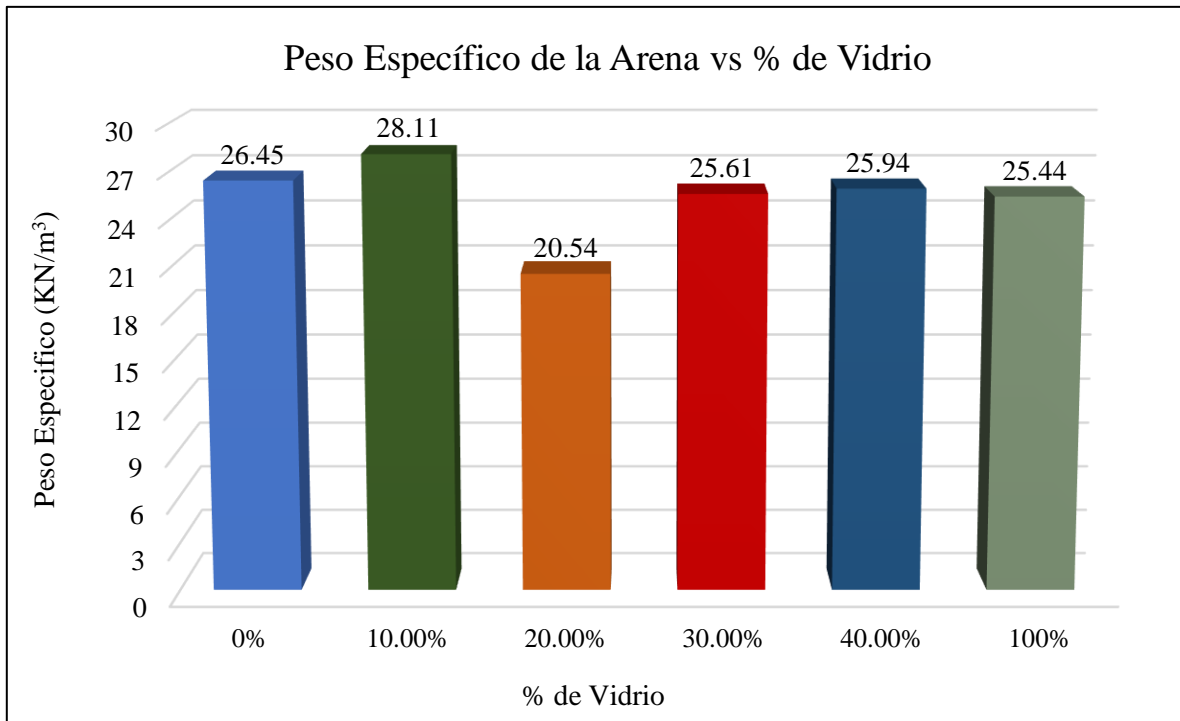
Peso específico de la arena y arena con distintos porcentajes de vidrio

Porcentajes	P. E. Aparente (kN/m ³)
0.00%	26.45
10.00%	28.11
20.00%	20.54
30.00%	25.61
40.00%	25.94
100.00%	25.44

Fuente: Elaboración propia.

Figura 44.

Peso específico de la arena y arena con distintos porcentajes de vidrio.



Fuente: Elaboración propia.

- ✓ Se ha constatado que la determinación del peso específico del hormigón con un 10% y un 20% de sustitución de arena por árido de vidrio reciclado ha dado resultados erróneos o incoherentes.
- ✓ Con un 10% de sustitución, el peso específico obtenido fue muy alto. Esto se debe a que la mezcla no era homogénea y el comportamiento no era el adecuado.
- ✓ Con un 20% de sustitución, el peso específico resultante fue menor que el de la arena y el propio vidrio. Esto también se debe a problemas de homogeneidad y comportamiento de la mezcla.
- ✓ Por el contrario, las determinaciones con 30% y 40% de sustitución han dado resultados más coherentes, situándose en el rango de pesos específicos del vidrio y de la arena.
- ✓ Se puede concluir que, para lograr una mezcla homogénea y unos resultados fiables, el porcentaje de sustitución de arena por árido de

vidrio reciclado debe ser superior al 20%. Valores del 30% y 40% parecen garantizar un comportamiento adecuado.

- ✓ Por debajo del 20% de sustitución, la influencia del vidrio es insuficiente para que la mezcla sea homogénea, dando lugar a resultados erráticos. Por encima de ese umbral, la mezcla es óptima y el peso específico resultante se sitúa en el rango esperado.

- Contenido de Humedad de los Agregados no se realizó el contenido de humedad del vidrio ya que no presenta absorción.

- Se diseñó la mezcla de hormigón patrón por el método ACI 211.1 para una resistencia característica de $f'c = 25 \text{ N/mm}^2$

La dosificación obtenida en volumen es:

1:1.96:2.40/205 (lt/m³).

Donde:

1 = Cemento

1.96 = Arena.

2.40 = Grava.

205 Lt/m³ = Agua.

Esta dosificación se ha obtenido para lograr un hormigón de 25 N/mm² de resistencia característica, siguiendo la metodología prescriptiva de la norma ACI 211.1, que relaciona los materiales, resistencia y relación agua/cemento.

- Para el diseño de la mezcla con remplazo de vidrio molido con 10%, 20%, 30% y 40%, se utilizó el diseño de la mezcla patrón, sustituyendo los porcentajes en peso del agregado fino.

- Para diseñar las mezclas de hormigón con sustitución parcial de arena por árido de vidrio molido, se ha partido de la mezcla patrón diseñada previamente con una resistencia de 25 N/mm².

- Para cada mezcla con vidrio, se ha sustituido el agregado fino por el árido de vidrio reciclado en los siguientes porcentajes en peso:

- ✓ 10% de sustitución: Se ha sustituido el 10% del peso del agregado fino por árido de vidrio molido.

- ✓ 20% de sustitución: Se ha sustituido el 20% del peso del agregado fino por árido de vidrio molido.
- ✓ 30% de sustitución: Se ha sustituido el 30% del peso del agregado fino por árido de vidrio molido.
- ✓ 40% de sustitución: Se ha sustituido el 40% del peso del agregado fino por árido de vidrio molido.
- Las mezclas resultantes permitirán analizar el impacto de la sustitución progresiva de arena por árido de vidrio reciclado en las propiedades del hormigón. Se podrá determinar el porcentaje óptimo de sustitución que no comprometa la idoneidad del hormigón resultante.
- Se ha elaborado probetas de hormigón patrón (sin adición de árido de vidrio) para determinar su resistencia a compresión. Estas probetas son fundamentales para validar la mezcla patrón diseñada y servirán de referencia.
Las probetas patrón se han sometido a las siguientes condiciones de curado y ensayo:
 - Curado de 14 días: Las probetas se han curado durante 14 días antes de romperlas a compresión. Esto permitirá analizar su resistencia a corto plazo.
 - Curado de 21 días: Las probetas se han curado durante 21 días antes de romperlas a compresión. Proporcionará información sobre la resistencia a medio plazo.
 - Curado de 28 días: Las probetas se han curado durante 28 días antes de romperlas a compresión. Dará lugar a la resistencia característica del hormigón patrón.
 - El análisis de los resultados permitirá validar la mezcla patrón, determinar el porcentaje óptimo de sustitución de arena por vidrio molido que no comprometa la resistencia del hormigón, y conocer posibles cambios en la evolución de resistencia en función del tiempo de curado.
- Adicionalmente, se han elaborado probetas con adición de árido de vidrio molido (10%, 20%, 30% y 40% de sustitución) y sometido a los mismos curados y ensayos. Esto permitirá comparar su resistencia a compresión con la del hormigón patrón y analizar el impacto de la adición de vidrio reciclado.
- Los resultados muestran una tendencia clara: las probetas con un 30% de sustitución de arena por árido de vidrio alcanzan las resistencias más próximas a las probetas patrón (sin vidrio) en todos los tiempos de curado.

Concretamente:

- ✓ A los 14 días de curado, las probetas con 30% de vidrio alcanzan el 85,32% de la resistencia del patrón.
 - ✓ A los 21 días de curado, representan el 95.01% de las resistencias patrón.
 - ✓ A los 28 días de curado (resistencia característica), alcanzan el 96,02% de las resistencias patrón.
- Por tanto, se concluye que el 30% es el porcentaje más cercano al óptimo de sustitución de arena por árido de vidrio reciclado molido, ya que es el que proporciona unas resistencias más similares a las del hormigón patrón en todos los tiempos de curado ensayados.
 - Sustituir el agregado fino por encima de este umbral (40% de sustitución) supone una mayor diferencia de resistencia con las probetas patrón. Por debajo de ese umbral (10-20% de sustitución), el impacto de la adición de vidrio es menor y las resistencias también se alejan más del patrón.
 - Para las dosificaciones que son propuestas se tuvo una masa de hormigón uniformemente heterogénea es decir homogénea tanto para el hormigón de control y el hormigón con vidrio como sustituto parcial del agregado fino, a pesar que para el hormigón con sustituto de vidrio su trabajabilidad disminuye al igual que su asentamiento.
- Se analizó una comparación del hormigón patrón y de los porcentajes propuestas con la adición de vidrio y reveló que la masa de hormigón en ambos casos presentó una uniformidad de heterogeneidad, lo que indica que tanto el hormigón de control como el hormigón con vidrio como sustituto parcial del agregado fino tuvieron una homogeneidad adecuada. Sin embargo, se observó que el hormigón con sustituto de vidrio presentó una disminución en su trabajabilidad y asentamiento, lo que sugiere que se requiere un mayor esfuerzo para su manipulación y colocación.
 - Para cada dosificación se observan variaciones en el asentamiento al agregar los porcentajes de vidrio triturado, lo cual muestra una disminución del 9,03 %, 13,43 %, 22,69 % y 31,94 % para los aditivos de 10 %, 20 %, 30 % y 40 % de vidrio triturado respectivamente, en sustitución de arena la cual se muestra en la tabla 65 y figura 45.

Al aumentar el contenido de vidrio triturado como sustituto de arena, el asentamiento disminuye; esto hace que la mezcla sea menos trabajable.

Tabla 65.

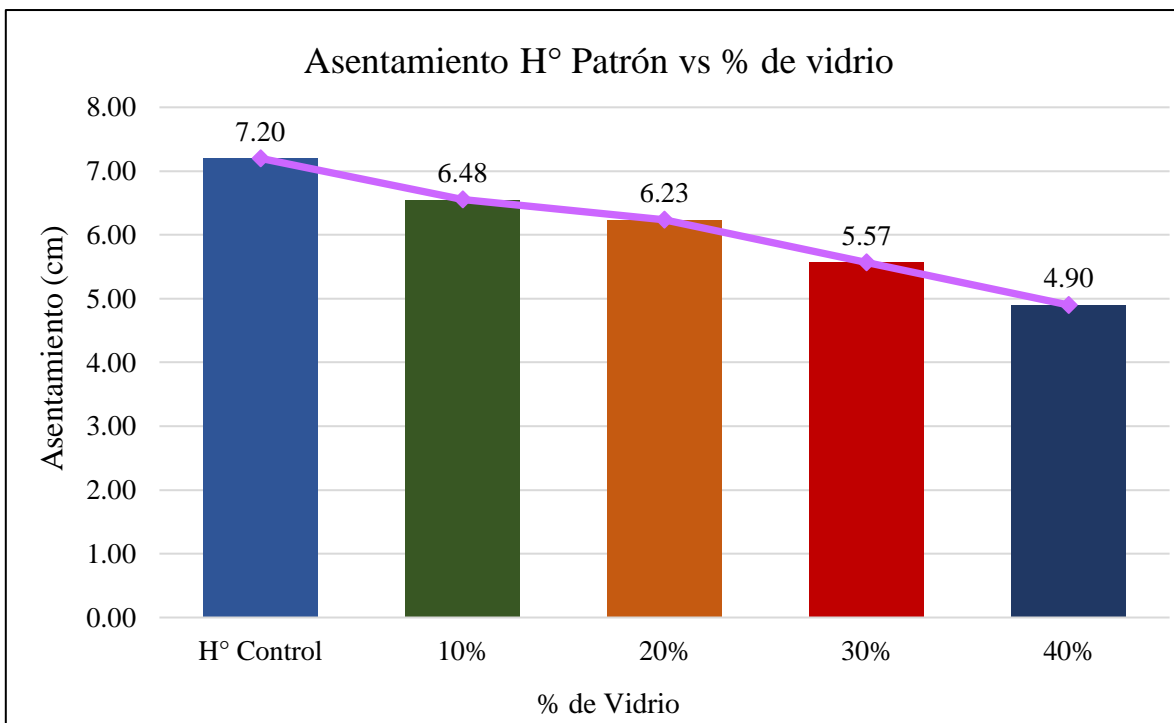
Asentamiento del H° Patrón y H° con distintos porcentajes de vidrio

% Vidrio como Sustituto de la Arena	Slump (cm)	Porcentaje Disminuido (%)
0.00%	7.20	0.00%
10.00%	6.48	9.95%
20.00%	6.23	13.43%
30.00%	5.57	22.69%
40.00%	4.90	31.94%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 45.

Asentamiento del H° patrón y H° con distintos porcentajes de vidrio.



Fuente: Elaboración propia.

- Por lo tanto, la trabajabilidad del hormigón con el vidrio como sustituto de árido fino se ve afectada negativamente, tal y como se demostró en los ensayos. Al aumentar el porcentaje de sustitución (del 10% al 40%), disminuye la fluidez y manejo del hormigón.
 - ✓ Esta variación se debe a las propiedades intrínsecas del vidrio molido como material, las cuales difieren de la arena y modifican el comportamiento reológico del hormigón.
 - ✓ Mayor angularidad: El vidrio molido tiene partículas con bordes más vivos e irregularidades, lo que favorece la floculación y disminuye la lubricidad. La arena es más redondeada.
 - ✓ Mayor dureza: El vidrio es más difícil de deformar y mover en la masa de hormigón. Requiere mayor energía de compactación y vibrado.
 - ✓ Menor absorción de agua: El vidrio no absorbe el agua de amasado como la arena. Por tanto, a igual agua, la fluidez del hormigón se resiente.
 - ✓ Distinta superficie específica: La superficie de contacto del vidrio molido difiere de la arena, modificando las interacciones entre partículas y la cohesión de la masa.

Por estas razones, a mayor porcentaje de sustitución de arena por vidrio molido, mayor es la disminución de la trabajabilidad del hormigón. El vidrio penaliza el manejo y fluidez del material.

- Para minimizar este efecto perjudicial serán necesarias medidas como:
 - ✓ Aumentar el contenido de agua de amasado para facilitar el manejo, aunque puede repercutir en la resistencia final.
 - ✓ Incorporar aditivos reductores de agua y plastificantes, para aumentar la fluidez con la misma relación a/c.
- La influencia del vidrio en la trabajabilidad del hormigón es un aspecto importante a tener en cuenta para lograr hormigones modificados viables. Comprender su comportamiento reológico aportará claves para optimizarlo.
- Se observa una disminución en la densidad del hormigón al agregar vidrio como sustituto parcial del agregado fino, como se muestra en la Figura 45. Sin embargo, la

magnitud de la disminución no está directamente relacionada con los porcentajes de vidrio agregado:

- ✓ Con un 10% de vidrio, la densidad disminuye en 0.32%.
- ✓ Con un 20%, la densidad disminuye solo en 0.14%.
- ✓ Con un 30%, disminuye en 0.22%.
- ✓ Finalmente, con un 40%, la densidad es 0.45% menor.

Esto demuestra que la disminución de la densidad no sigue directamente el porcentaje de vidrio agregado. Las menores disminuciones de densidad se obtienen al agregar el 20% y 30% de vidrio, en lugar de aumentar de manera constante a medida que se agrega un mayor porcentaje de vidrio. Esto sugiere que hay un rango óptimo del 20% al 30% de vidrio para mantener una densidad relativamente alta del hormigón al agregar vidrio como reemplazo parcial del agregado fino.

Los resultados son mostrados en la tabla 66 y figura 46.

Tabla 66.

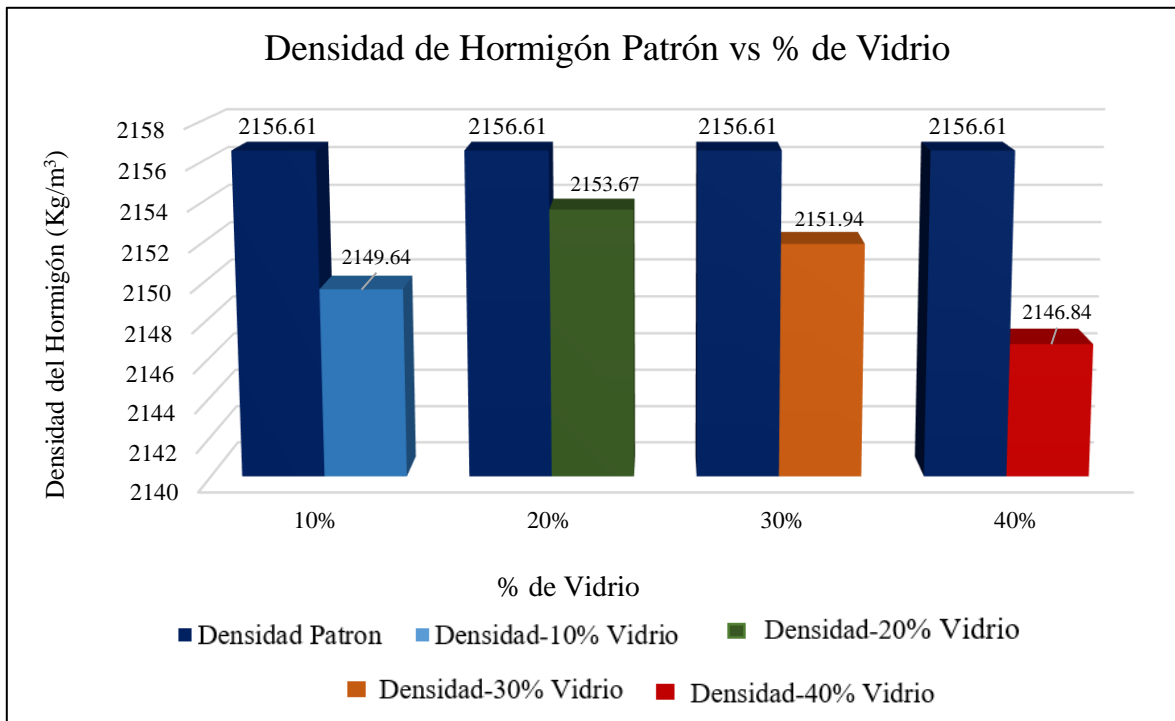
Densidad del H° patrón y H° con distinto porcentajes de vidrio.

% Vidrio como sustituto de la arena	Densidad del H°	Porcentaje Disminuido (%)
0.00%	2156.61	0.00%
10.00%	2149.64	0.32%
20.00%	2153.67	0.14%
30.00%	2151.94	0.22%
40.00%	2146.84	0.45%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 46.

Densidad del H° patrón y H° con distinto porcentajes de vidrio.



Fuente: Elaboración propia.

- Los tipos de rotura que presentaban las probetas de hormigón en la mayoría son de tipo 3 ya existe concavidad en el equipo que se utiliza que fue la placa de aplicación de carga.

Este tipo de rotura se debe a:

Irregularidades o defectos en la superficie de aplicación de carga de la placa de ensayo. La presencia de oquedades, convexidades o rugosidad en la placa puede concentrar las tensiones en determinados puntos, provocando la aparición prematura de daños (fisuras, grietas) que degeneran en roturas frágiles del espécimen.

- Se ha analizado el coste de producción de 1 m³ de hormigón convencional (ANEXO 3) y de hormigón con un 30% de sustitución de arena por árido de vidrio molido (porcentaje óptimo determinado previamente en base a las resistencias).

Los resultados son:

- ✓ Hormigón convencional: Coste de 789,08 Bs por m³. Este es el coste de referencia.

- ✓ Hormigón con 30% de vidrio molido: Coste de 2126.34 Bs por m³. Este coste es inferior al convencional, con una diferencia de 1337.26 Bs por m³, lo que supone un aumento de 169 %.
- Por tanto, se concluye que la adición de árido de vidrio molido en un 30% de la arena no permite obtener un hormigón más económico.

4.2 Recomendaciones

- Si se desea seguir con los estudios del vidrio en el hormigón se recomienda:
 - Utilizar equipo de protección personal adecuado, como guantes, gafas y mascarilla, durante la trituración del vidrio para evitar la inhalación de polvo. El vidrio y sus fragmentos son materiales abrasivos que pueden provocar cortes y el polvo puede ser perjudicial si se inspira en grandes cantidades.
 - Usar guantes de trabajo en todo momento durante la manipulación y dosificación del árido de vidrio molido. Esto evitará el contacto directo con la piel y cualquier corte o lesión.
 - Es posible que el vidrio molido también tenga bordes cortantes, por lo que el contacto manual debe limitarse en la medida de lo posible. El uso de guantes gruesos y resistentes es fundamental.
 - En general, tomar todas las precauciones necesarias para trabajar con seguridad con materiales inertes, pero con posibles bordes cortantes como el vidrio.
 - Estas recomendaciones son muy acertadas para continuar los estudios de adición de árido de vidrio molido de forma segura. Nos permitirán evitar cualquier daño físico al personal y seguir analizando las ventajas técnicas y económicas de esta alternativa constructiva de forma rigurosa.
 - El uso de equipos de protección personal y las precauciones en la manipulación de materiales con bordes cortantes son fundamentales en cualquier trabajo. Su indicación es acertada para seguir profundizando en los estudios sobre la adición de árido de vidrio molido en el hormigón de forma segura y eficiente.
- Se recomienda realizar más estudios variando los siguientes parámetros relativos al árido de vidrio molido sería muy interesante:

- Porcentajes de sustitución: Se ha trabajado con 10%, 20%, 30% y 40% de sustitución de arena por vidrio molido. Probar otros rangos como 50-70% permitirá conocer el límite máximo de adición viable.
- Granulometría: El vidrio molido empleado tenía una granulometría fina comparable a la arena. Ensayar vidrios con tamaños de partícula mayores, e incluso de engrase, aportará información para su posible uso como árido grueso o en la fabricación de zahorra reciclada.
- Otras propiedades: Explorar la influencia de la adición de vidrio molido en otras propiedades mecánicas (tracción, flexión), durabilidad (resistencia, desgaste), contracción, etc. Conocer el comportamiento global para viabilizar su aplicación práctica.
- Diferentes tipos de vidrio: El vidrio molido procedía de envases. Ensayar la adición de vidrios de diferentes orígenes (ventanas, espejos, tubos, etc.) aportará valiosa información sobre su idoneidad y comportamiento.
- Todos estos estudios permitirán avanzar sustancialmente en el conocimiento del hormigón modificado con vidrio molido y su optimización como material constructivo sostenible. Será crucial para superar los obstáculos que todavía impiden su empleo comercial y extendernos cada vez más hacia la construcción ecoeficiente.
- Se puede sugerir realizar más investigaciones en las cuales se utilice materiales reciclables para la industria del hormigón, así para poder cuidar el medio ambiente y disminuir el uso de materiales no renovables.

La línea de investigación seguida, sobre la adición de árido de vidrio molido en el hormigón, es muy pertinente y prometedora. Algunas sugerencias para continuar en esta línea serían:

- Profundizar en la adición de otros materiales reciclados como árido de cerámica, plástico, neumáticos, etc. Cada uno tendrá ventajas e inconvenientes, por lo que habrá que analizarlos para determinar su grado de sustitución óptimo.
- Estudiar mezclas de diferentes materiales reciclados. Por ejemplo, un 20% de árido de vidrio y un 10% de árido de cerámica. La combinación podría complementarse y potenciarse.

- Analizar otras propiedades del hormigón modificado como durabilidad, resistencia a diferentes tipos de agresiones ambientales, comportamiento mecánico a largo plazo, etc. No sólo la resistencia, también otras prestaciones de interés práctico.
- Realizar ensayos a mayor escala y con vigas, placas y paneles de hormigón armado. Los resultados a escala real serán más fiables para concluir sobre su viabilidad constructiva.
- Estudiar la posibilidad de aplicación de estos hormigones en diferentes tipologías como pavimentos, prefabricación, hormigón proyectado, etc.
- Analizar los aspectos económicos a mayor profundidad, incluyendo el coste energético global de producción y vida útil. Factor clave para su implantación comercial.
- Todas estas líneas de investigación futura lograrán avanzar hacia una construcción más sostenible, reduciendo el impacto ambiental del sector mediante el uso de materiales y recursos renovables. Es imprescindible para un desarrollo más verde y responsable.
- La adición de árido de vidrio molido ha dado resultados prometedores, por lo que se abre una vía de gran interés para la industria de la construcción. Continuar profundizando en ella y explorando otras alternativas similares será crucial para su progreso sostenible.

