



**UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL**

Uso del residuo de vidrio pulverizado como adición en la elaboración de  
concreto ecológico

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

Para optar el grado de bachiller en Ingeniería Civil

**AUTOR(ES)**

Huapaya Tenazoa, Diego Andrés (0000-0001-5663-0712)

Valdivia Farromeque, Joffrey Itamar (0000-0002-4930-5716)

**ASESOR**

Eyzaguirre Acosta, Carlos (0000-0001-9769-2135)

**Lima, julio de 2019**

## *DEDICATORIA*

*Quiero dedicar este trabajo a mis padres, Livia y Héctor, quienes, a pesar de todas las dificultades, se esforzaron para que siga estudiando. Hacerlos sentir orgullosos ha sido y será mi motivación para seguir adelante.*

*Diego Huapaya Tenazoa*

*Dedico este trabajo a mi familia, que estuvo ahí para apoyarme en los momentos más difíciles. En especial dedicarlo mis padres, Jessica y Luis, por el esfuerzo y dedicación que realizan para sacar adelante a nuestra familia. A mis hermanos, Giuseppe, Ariel y Abby, por ser el incentivo que me hace llegar más lejos.*

*Joffrey Valdivia Farromeque*

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación no habría sido posible sin contar con el apoyo de nuestros patrocinadores Cemento Inka y Vidrieria Alejo. Agradecer de forma especial a los ingenieros Marco Correa, Alexander Rojas, Omar Lopez y Daniel Risco por brindarnos su conocimiento, experiencia y paciencia en todo el tiempo que estuvimos bajo su supervisión. Finalmente, hacer mención del apoyo recibido por nuestro asesor el ingeniero Carlos Eyzaguirre.

## RESUMEN

La cantidad de residuos se ha incrementado con el paso del tiempo, siendo actualmente una amenaza grave para el medio ambiente; tal es el caso del vidrio plano, el cual genera cantidades considerables de merma poco reutilizables en su producción. Esto ha generado que sus residuos reciban una mayor atención por las autoridades e investigadores a nivel global en los últimos años, proponiéndose usos respetuosos que contribuyan hacia un entorno más sostenible. Este estudio profundiza en la utilización del residuo de vidrio plano para la reducción de su merma y lo propone como una solución en la elaboración de un concreto ecológico, al ser incluido de forma pulverizada como adición en el concreto. Para ello, se hicieron diferentes diseños de mezcla con porcentajes variables de vidrio plano pulverizado, realizándose comparaciones con respecto a un concreto patrón para identificar su efecto en las propiedades del concreto; evaluándose los ensayos de asentamiento, resistencia a la compresión y resistencia a la compresión en condiciones de ataque por sulfatos. Los resultados muestran que la adición de vidrio plano pulverizado contribuye a la mejora del asentamiento, la resistencia a la compresión y la resistencia a la compresión en condiciones de ataque por sulfatos; y también, presenta un ahorro económico con respecto al concreto patrón.

Palabras clave: polvo de vidrio; resistencia al ataque por sulfatos; adición; resistencia a la compresión; concreto ecológico.

ABSTRACT

The amount of waste has increased over time, currently being a serious threat to the environment. Such is the case of flat glass, which generates considerable quantities of waste that are not reusable in the production. This has generated that its residues receive a greater attention by the authorities and researchers to global level in the last years, proposing respectful uses that contribute towards a more sustainable surroundings. This study deepens in the use of the flat glass waste to reduce its shrinkage and proposes it as a solution in the elaboration of an ecological concrete. For this, different mixing designs were made with varying percentages of flat sprayed glass, making comparisons with respect to a concrete pattern to identify its effect on concrete properties; evaluated by slump tests, compressive strength and compressive strength in sulfate attack conditions. The results show that, the addition of pulverized flat glass contributes to the improvement of slump, compressive strength and compressive strength under sulphate attack conditions; and it presents an economic saving with respect to the reference concrete.

Keywords: glass powder; sulfate attack resistance; addition; compressive strength; eco-concrete.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>3</b>
2.1	MATERIALES .....	3
2.2	DISEÑO DE MEZCLAS .....	5
2.3	ENSAYOS .....	5
2.4	MÉTODO DE MEZCLA .....	6
<b>3</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>8</b>
3.1	ASENTAMIENTO .....	8
3.2	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	8
3.3	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CONDICIONES DE ATAQUE POR SULFATOS .....	9
3.4	EVALUACIÓN ECONÓMICA .....	10
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS</b> .....	<b>12</b>
4.1	ASENTAMIENTO .....	12
4.2	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	12
4.3	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CONDICIONES DE ATAQUE POR SULFATOS .....	13
4.4	EVALUACIÓN ECONÓMICA .....	14
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>16</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades físicas del CHS.....	3
Tabla 2 Composición química del CHS y VP.....	3
Tabla 3 Dosificación de mezclas.....	5
Tabla 4 Ensayos de concreto.....	5
Tabla 5 Muestras para ensayos de resistencia a la compresión.....	6
Tabla 6 Valores promedio de resistencia a la compresión por mezcla y edad.....	9
Tabla 7 Valores promedio de resistencia a la compresión en condiciones de ataque por sulfatos por mezcla y edad.....	9

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vidrio pulverizado .....	4
Figura 2. Curvas granulométricas de arena gruesa y piedra chancada.....	4
Figura 3. Probetas de 100 x 200 mm.....	6
Figura 4. Slump respecto al porcentaje de VP.....	8
Figura 5. Resistencia a la compresión respecto al porcentaje de VP y edad.....	8
Figura 6. Resistencia a la compresión en condiciones de ataque por sulfatos respecto al porcentaje de VP y edad. ....	9
Figura 7. Probeta de concreto expuesta durante 90 días a la solución de sulfato de magnesio .....	10
Figura 8. Índice de costo y resistencia a la compresión en condiciones de ataque por sulfatos a 90 días respecto al porcentaje de VP .....	11



## 1 INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, la correcta disposición de los residuos ha ido recibiendo mayor atención por las autoridades a nivel global, debido a que su producción ha ido en aumento hasta convertirse en una amenaza grave para el medio ambiente. Tal es el caso del vidrio que, al existir un incremento de su nivel de adquisición por la fácil capacidad de moldear su forma, se han ido convirtiendo en uno de los materiales más usados y comunes en la vida del consumidor, por lo que, en el mejor de los casos, una vez cumplida su vida útil, son reciclados y devueltos al ciclo de producción. Sin embargo, no todos los residuos de vidrio aplican para ser usados como material de reciclaje. Esto es debido a la mezcla de vidrios de colores en los vertederos, al contenido de impurezas que altere su composición y a los costos elevados de recolección y clasificación; siendo desechados y almacenados en vertederos que incrementan sus volúmenes, de tal forma que se generan problemas ambientales que deben ser mitigados y, en la medida de lo posible, eliminados.

Por ello, muchos autores proponen a los residuos sólidos de vidrio como material de investigación en la elaboración de concreto, por los beneficios que se pueden obtener cuando se le usa como adición, reemplazo del material cementicio (RMC) o reemplazo del agregado, convirtiéndose en una de las áreas de estudio más activas, abarcando disciplinas que incluyen a la Ingeniería Civil y a los materiales de construcción [1]. Afshinnia [21] describe que dentro de los beneficios del RMC por vidrio plano pulverizado, en nuestro caso denominado Vidrio Reciclado Pulverizado (VP), produce un aumento del 20% de la resistencia a la compresión con respecto a la mezcla patrón; y también, genera un ligero aumento del 0.6% en el contenido de aire. Otras investigaciones utilizan el VP por la facilidad de uso y por el tamaño de sus partículas, cuando se hallan entre un rango de 45 a 88  $\mu\text{m}$ , inciden en la mejora de la consistencia del concreto [2-3]. Otra ventaja presente, es la disminución de la reacción álcali-sílice (RAS), debido a la formación de silicatos de calcio hidratado (SCH) y a la reducción de los álcalis, al utilizar el VP como RMC [4], llegando a ser considerados como material puzolánico [5-6]. Estudios realizados por Elaqla [7] sobre la resistencia a la compresión y el asentamiento del concreto para el VP con tamaño de partículas menores a 75  $\mu\text{m}$  como RMC, determinan como porcentaje ideal de adición el valor del 5%. Vandhiyan [8] utiliza VP con partículas que pasan la malla N°170 (90  $\mu\text{m}$ ) y que se retienen en la malla N°200 (75  $\mu\text{m}$ ), afirmando que existe una ganancia considerable de resistencia a la

compresión a edades tempranas y que a los 28 días este aumento se reduce hasta 23%, concluyendo que el incremento de la resistencia es óptimo al 10% de RMC. Caso similar sucede con la investigación realizada por Aliabdo [9] que utiliza VP de tamaño de partículas entre 15 y 70  $\mu\text{m}$  para distintos diseños de mezclas, con un porcentaje de reemplazo entre el 5% y 10%. Además, existen ensayos en donde las muestras de concreto, cuando se reemplaza al cemento con VP de tamaño de partícula pasantes de la malla N°100 (150  $\mu\text{m}$ ), son expuestas a soluciones de sulfato de sodio para observar su comportamiento superficial y mecánico. En estos ensayos se encuentra que el porcentaje de reemplazo ideal es del 10%, y que porcentajes superiores pueden afectar negativamente la resistencia a la compresión [10].

De igual manera, el presente estudio lleva a cabo una investigación experimental del efecto del VP como adición en el concreto, con el objetivo de proponer dicho porcentaje. En vista de que en la mayoría de los estudios solo se hace mención del residuo de vidrio encontrado como contenedor (botellas, frascos, etc.), se utilizará al tipo de vidrio plano (ventanas, parabrisas, etc.) para su uso como material pulverizado, del cual se hará referencia a lo largo de la literatura, con la finalidad de estudiar las características presentes en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido con los diferentes porcentajes de VP. Por tal motivo, se eligieron las pruebas de asentamiento, de resistencia a la compresión y de resistencia a la compresión en condiciones de ataque por sulfatos. Así también se llevó a cabo un proceso de mezclado ideal para la homogenización de los componentes del concreto con el VP y poder optimizar cantidades de uso, a fin de realizar una evaluación económica y poder plasmar su uso, del VP, en la realidad teniendo en cuanto sus beneficios.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Materiales

El cemento Inka HS con adición de escoria de alto horno (CHS) fue utilizado para el presente trabajo. En la Tabla 1 se presenta las propiedades físicas del CHS, que fueron ensayadas acorde a lo estipulado en [11]. A su vez, en la Tabla 2 se presenta la composición química del CHS y del VP.

Tabla 1  
*Propiedades físicas del CHS*

Características	Tiempo	Resultados
Resistencia a la compresión (MPa)	3 días	20.8
	7 días	30.9
	28 días	43.0
Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )		2990
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		4400
Tiempo de fraguado (min)	Inicial	147
	Final	319
Expansión autoclave (%)		0.05
Expansión álcali-sílice reactivo (%)	14 días	0.013
	56 días	0.028
Expansión de barra del mortero por sulfato (%)	6 meses	0.04
	1 año	0.06

Tabla 2  
*Composición química del CHS y VP*

Componentes	CHS (%)	VP (%)
SiO <sub>2</sub>	24.95	71.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.37	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.09	3.8
CaO	56.06	9.0
SO <sub>3</sub>	2.14	
MgO	3.47	1.6
K <sub>2</sub> O	0.63	
Na <sub>2</sub> O	0.14	14.0
PF	3.88	
RI	0.95	
Cal libre	0.86	

La caracterización de este último fue realizada mediante ensayos según lo establecido [12] y en [13] para su caracterización, con resultados de  $1956 \text{ cm}^2/\text{g}$  y  $61.3\%$  respectivamente. Se observa dicho material en la Figura 1.

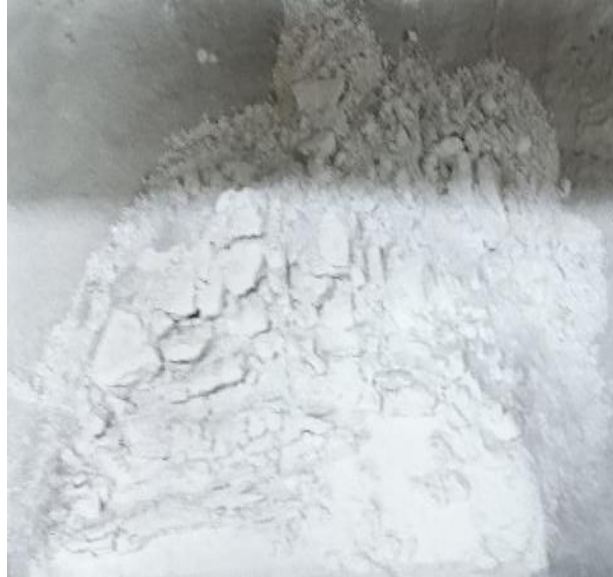


Figura 1. Vidrio pulverizado

Los agregados se ensayaron cumpliendo con las especificaciones de [14], siendo usados una arena gruesa de módulo de fineza 2.42 y piedra chancada de tamaño máximo nominal de 12.5 mm. En la Figura 2 se presenta las curvas granulométricas de dichos agregados.

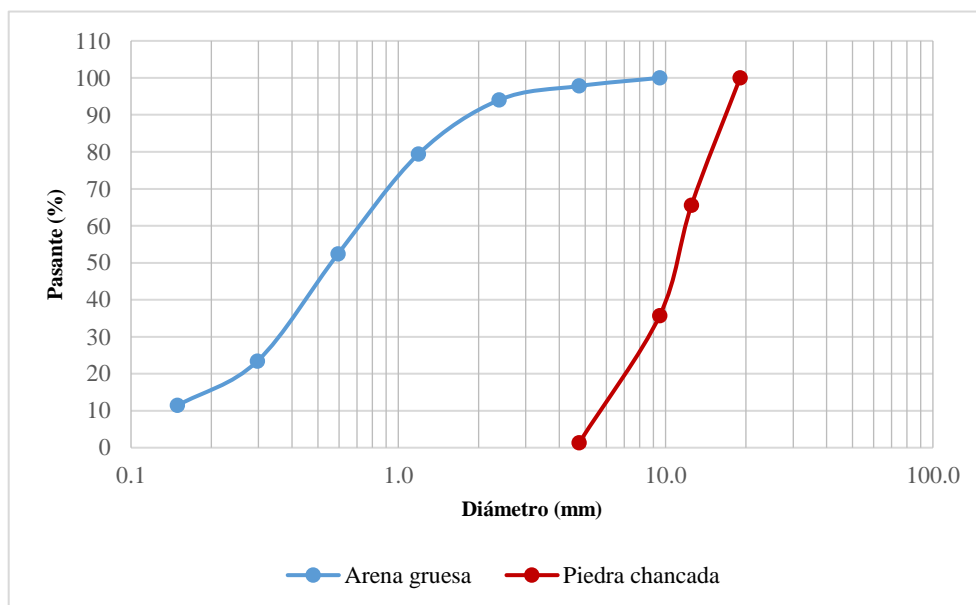


Figura 2. Curvas granulométricas de arena gruesa y piedra chancada

## 2.2 Diseño de mezclas

Las mezclas fueron diseñadas mediante el método de módulo de fineza de la combinación de los agregados, para una resistencia de 31 MPa y un slump de 100 mm. Se utilizó un aditivo superplastificante con un valor de 1.5% respecto al peso del cemento y un valor de relación agua/cemento de 0.5 para todas las mezclas. La adición de vidrio pulverizado tuvo un rango de 6-9% con aumentos de 1%, teniendo cuatro mezclas y una mezcla control sin adición de VP. En la Tabla 3 se detalla la dosificación de mezclas de concreto.

Tabla 3  
*Dosificación de mezclas*

<b>Descripción</b>	<b>HSV0</b>	<b>HSV6</b>	<b>HSV7</b>	<b>HSV8</b>	<b>HSV9</b>
CHS (kg/m <sup>3</sup> )	332	332	332	332	332
VP (kg/m <sup>3</sup> )	0	19.92	23.24	26.56	29.88
Agua (kg/m <sup>3</sup> )	169	169	169	169	169
Relación a/c	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Arena (kg/m <sup>3</sup> )	883	873.64	872.08	870.52	868.96
Piedra (kg/m <sup>3</sup> )	990	979.44	977.68	975.92	974.16
Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98
Índice de costo (PEN/PEN)	1.000	0.994	0.993	0.992	0.991

## 2.3 Ensayos

Para el presente trabajo se realizaron los ensayos mostrados en la Tabla 4. En los ensayos de asentamiento se optó por realizar el muestreo de 3 pruebas para cada mezcla y utilizar el promedio de cada una.

Tabla 4  
*Ensayos de concreto*

<b>Descripción</b>	<b>Norma</b>	<b>Edad (días)</b>
Asentamiento	NTP 339.035	-
Resistencia a la compresión	NTP 339.034	7, 28 y 90
Resistencia a la compresión en condiciones de ataque por sulfatos	NTP 334.094 NTP 339.034	7, 28 y 90

El ensayo de resistencia a la compresión utilizó 105 probetas detalladas en la Tabla 5. Todas las probetas tenían dimensiones de 100 x 200 mm como se observa en la Figura 3.

Tabla 5  
*Muestras para ensayos de resistencia a la compresión*

Inmersión	VP (%)	Edad (días)	N° de probetas
En agua	0, 6, 7, 8 y 9	7, 28 y 90	60
En solución de sulfato de magnesio	0, 6, 7, 8 y 9	7, 28 y 90	45

Para el caso particular del ensayo de resistencia a la compresión en condiciones de ataque por sulfatos, se curó las probetas en una solución de sulfato de magnesio (50 gramos por litro de agua), con la finalidad de simular el ataque que genera el agua de mar. Tras la espera de un día de fraguado se desmoldaron y se procedió a colocar en los cuartos de curado en agua y en soluciones de sulfato.



Figura 3. Probetas de 100 x 200 mm

#### 2.4 Método de mezcla

El VP, al ser considerado como un material puzolánico, debe tener un método de mezcla especial para optimizar la homogenización de los materiales. Antes de dar inicio a la mezcla se realizaron los siguientes pasos previos:

1. Se recolecta los materiales para el concreto patrón y con adiciones de vidrio.
2. Se pesan las cantidades necesarias para cada mezcla.
3. Una vez listas las cantidades exactas se da inicio a la mezcla.

Dentro de la secuencia para la mezcla de concreto patrón y con adiciones se realizaron los siguientes pasos:

4. Se comienza con el vaciado total de la piedra en la mezcladora, seguido de su humedecimiento con el 10% de la cantidad de agua.
5. De igual manera, se añade toda la cantidad de cemento HS y se humedece con 10% del agua. Esto con la finalidad de evitar el esparcimiento del polvo de cemento y optimizar cantidades.
6. Se inicia la homogenización de los materiales contenidos mediante la acción giratoria de la mezcladora durante dos minutos.
7. Una vez cumplido el tiempo se añade el aditivo sin parar el proceso, dejando girar la mezcla durante 5 minutos más.
8. Cumplido el tiempo se detiene el proceso de mezclado y en estado de reposo se añade la arena gruesa, el VP y la cantidad restante de agua y se deja girar una última vez por 10 minutos. Esto con la finalidad de evitar el esparcimiento del VP por efecto del viento.
9. Culminado el tiempo de mezclado se vacía el contenido en una carretilla o buggy, para realizar posteriormente los ensayos en estado fresco correspondientes.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Asentamiento

En la Figura 4 se muestra la incidencia del porcentaje de VP sobre el asentamiento del concreto. Los resultados indican que el asentamiento crece al aumentar el porcentaje de VP, así se tiene que con un 6% de vidrio pulverizado el asentamiento es de 168 mm y para un 9% de VP se alcanza un valor de 190 mm; siendo el incremento del 13% al pasar de 6% a 9%.

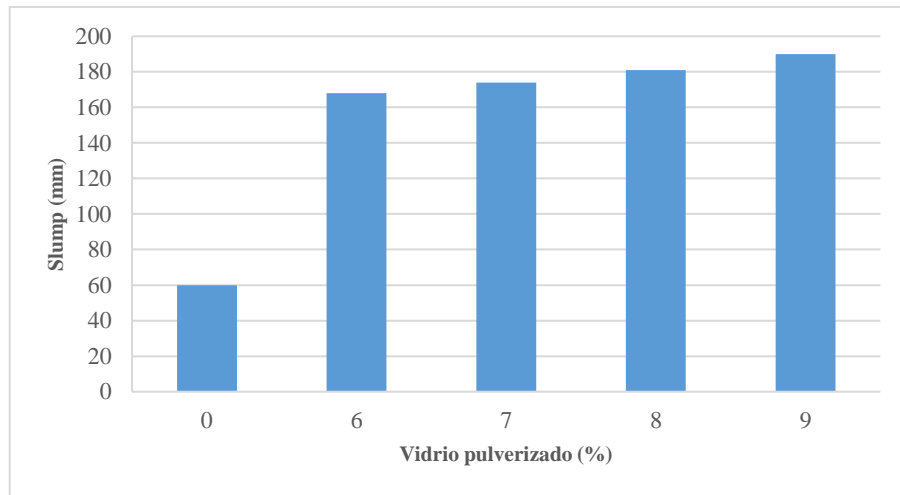


Figura 4. Slump respecto al porcentaje de VP

#### 3.2 Resistencia a la compresión

En la Figura 5 se muestra la incidencia del porcentaje de VP sobre la resistencia a la compresión. Conforme a los resultados, se puede afirmar que la resistencia a la compresión aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de VP en todas las edades, siendo el valor máximo de 62.2 MPa alcanzado por la mezcla con 9%, con un incremento de 4% al pasar de 6% a 9%. Los demás resultados se muestran en la Tabla 6.

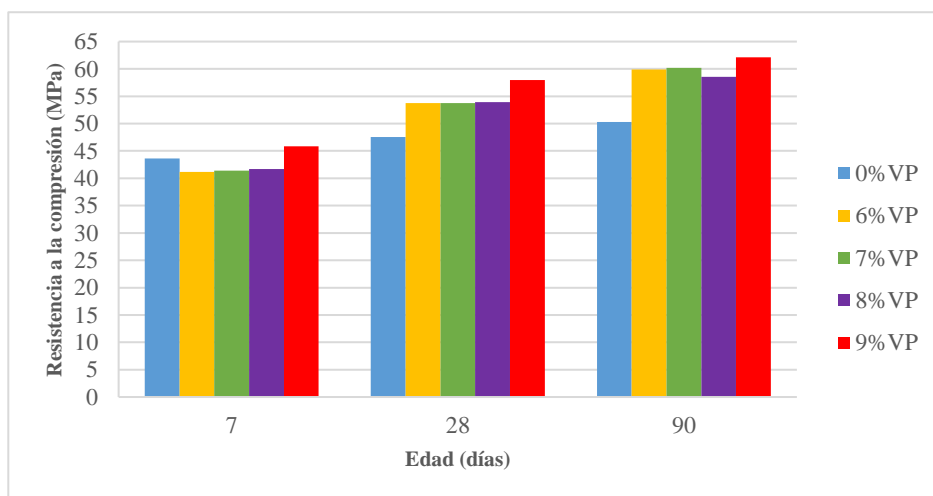


Figura 5. Resistencia a la compresión respecto al porcentaje de VP y edad



Tabla 6

Valores promedio de resistencia a la compresión por mezcla y edad

Edad	HSV0	HSV6	HSV7	HSV8	HSV9
7 días	43.5	41.2	41.4	41.7	45.9
28 días	47.6	53.8	53.8	53.8	53.9
90 días	50.3	59.9	60.2	58.5	62.2

### 3.3 Resistencia a la compresión en condiciones de ataque por sulfatos

En la Figura 6 se muestra la incidencia del porcentaje de VP sobre la resistencia a la compresión en condiciones de ataque por sulfatos. Los resultados muestran que a medida que el porcentaje de VP aumenta, la resistencia a la compresión obtiene un incremento, siendo el valor máximo de 53.2 MPa a 90 días y una variación respecto al concreto patrón de 16% alcanzado en la mezcla con 7%. Los demás resultados se muestran en la Tabla 7. A partir de este porcentaje se observa una tendencia, por parte de la resistencia a la compresión, a disminuir

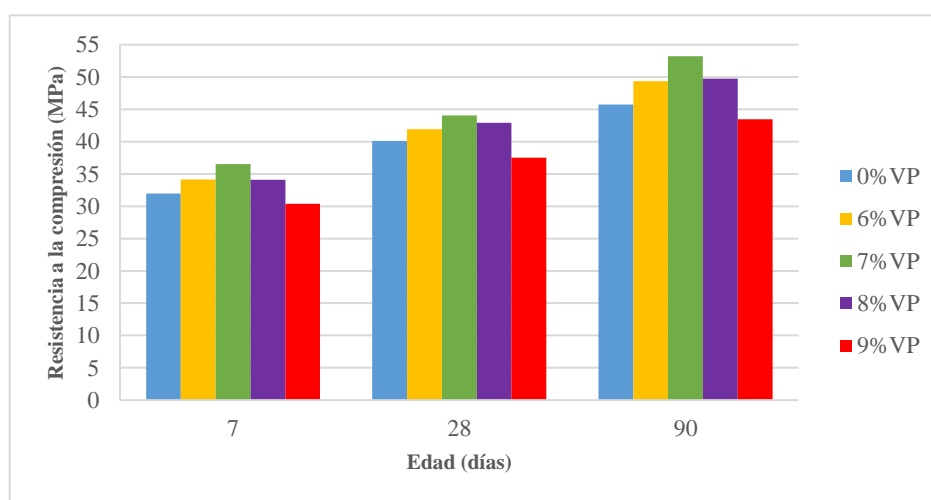


Figura 6. Resistencia a la compresión en condiciones de ataque por sulfatos respecto al porcentaje de VP y edad.

Tabla 7

Valores promedio de resistencia a la compresión en condiciones de ataque por sulfatos por mezcla y edad

Edad	HSV0	HSV6	HSV7	HSV8	HSV9
7 días	43.5	41.2	41.4	41.7	45.9
28 días	47.6	53.8	53.8	53.8	53.9
90 días	50.3	59.9	60.2	58.5	62.2

En la Figura 7 se muestra una de las probetas expuestas a la solución de sulfato de magnesio durante 90 días. Es apreciable que el sulfato al no poder penetrar dentro del probeta cilíndrica se aglomera en su superficie y al combinarse con la etringita superficial se forma el material gelatinoso, como se observa en la figura. Es de mencionar que el material gelatinoso fue retirado de la superficie de las probetas para poder llevar a cabo los ensayos de resistencia a la compresión, y cuya presencia no provocó ninguna afección de las propiedades mecánicas del concreto.



*Figura 7. Probeta de concreto expuesta durante 90 días a la solución de sulfato de magnesio*

#### 3.4 Evaluación económica

En la Figura 8 se muestra el índice de costo (concreto patrón/concreto con VP) y la resistencia a la compresión en condiciones de ataque por sulfatos a 90 días con respecto al porcentaje de vidrio pulverizado. El uso del VP como adición del concreto ayuda a aumentar la resistencia a la compresión a medida que el porcentaje aumenta. Sin embargo, el índice de costo presenta un ligero decremento bajo esa misma tendencia, siendo la mezcla con 7% quien tiene el mejor desempeño considerando ambos aspectos.

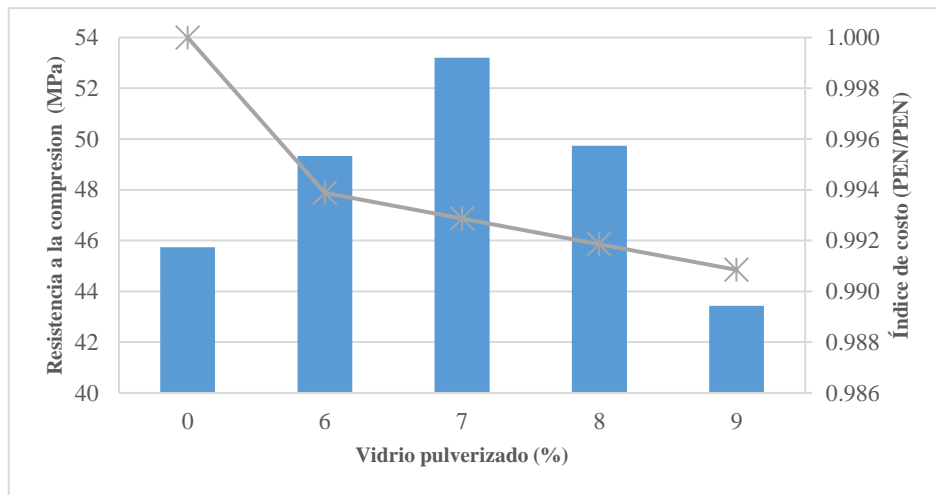


Figura 8. Índice de costo y resistencia a la compresión en condiciones de ataque por sulfatos a 90 días respecto al porcentaje de VP

## 4 ANÁLISIS

### 4.1 Asentamiento

Elaqra [1], realizó un estudio para una relación a/c de 0.72 y cemento CEMII AM SVL, con valores 10%, 20% y 30% de VP como RMC y obtiene un comportamiento similar al acápite 3.1, siendo el incremento del asentamiento de 50 mm al pasar de 10% a 30%.

Hendi [18], estudia el asentamiento del vidrio pulverizado para mezclas de concreto, realizado con cemento Tipo II y 210 diseños de mezcla, siendo la relación a/c, el porcentaje de aditivo plastificante y de VP como aditivo los valores iterados. En el caso de la serie con relación a/c de 0.5 con 5%, 10% y 20% de VP y sin aditivo plastificante, se logró una tendencia similar al presente estudio, con un valor máximo de 380 mm para la mezcla con 20% de VP; siendo el incremento del 15% al pasar de 5% a 20%.

Este incremento puede ser atribuido al hecho de que para mantener la relación a/c de la mezcla conforme crece el porcentaje de VP, se debe añadir mayor agua.

Por otro lado, Elaqra [7], utilizando cemento CEMII AM SVL y una relación a/c de 0.67, obtiene resultados diferentes al evaluar mezclas de concreto con 2.5%, 5%, 10% y 20% de VP, siendo el asentamiento reducido al aumentar el porcentaje de VP. Esto se atribuye al empleo de un VP con tamaño de partículas menores a 75 micras, con una mayor capacidad de absorción del agua.

### 4.2 Resistencia a la compresión

Aliabdo [9], diseñó con dos tipos de cemento: de 33 MPa (a/c de 0.50) y de 45 MPa (a/c de 0.35), haciendo uso de un aditivo reductor de agua constante (1.8%). Los ensayos fueron realizados en cubos para valores de 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de VP como adición a 7, 28 y 56 días. En el caso de la serie de 33 MPa, se obtuvo un comportamiento similar al del acápite III.B. hasta el 15% de VP, con un valor máximo de 41 MPa a 56 días. Sin embargo, los porcentajes posteriores presentan una tendencia a decrecer. Se alcanzó un incremento de 10% al pasar de 5% a 10%.

Este incremento podría estar relacionado con el contenido de sílice que aporta el vidrio pulverizado a la mezcla, formándose una mayor cantidad de silicato dicálcico (C2S) y silicato tricálcico (C3S), los cuales al hidratarse favorecen al incremento de la resistencia a la compresión y, al ser el VP un material fino, rellena los vacíos generados en el concreto, produciendo también un aumento de su resistencia a la compresión.

Por otro lado, Hendi [18] usa el VP obtenido de canicas de vidrio de color para el estudio del concreto autocompactante, realizando ensayos en cubos de 150 x 150 x 150 mm en edades de 7 y 28 días. Para el caso de los diseños de mezcla con relación a/c de 0.50 y sin aditivo plastificante, encuentra que a medida que el porcentaje de adición de VP aumenta, la resistencia a la compresión decrece en 26% y 31% al pasar de 5% a 20% para 7 y 28 días respectivamente. El mismo autor, Hendi [24] en otra investigación similar concluye que los altos porcentajes de sustitución del vidrio molido originan una disminución de la resistencia a la compresión debido a la poca cantidad de componentes de la hidratación del cemento que produce el vidrio a edades tempranas, pero que esto será compensado con el transcurrir del tiempo. Así mismo, cabe señalar que el autor en ambos estudios utiliza el VP como reemplazo del material cementante, variando la relación agua cemento efectiva lo que produce que la cantidad de compuestos hidratados sean menores a los que se tienen previstos [22]. Idir [23], utiliza el VP procedente de vidrios de colores diversos y afirma que la variación de la resistencia a la compresión en los ensayos de las diferentes mezclas de concreto está relacionada con el tamaño de partículas que componen al VP y no con el color del vidrio residual procedente.

#### 4.3 Resistencia a la compresión en condiciones de ataque por sulfatos

Tang [10], realizó un estudio utilizando cemento Portland y dos valores de a/c: 0.54 y 0.41, para evaluar el efecto de 10%, 20% y 30% de VP como RMC para edades de 2, 6, 10, 14, 18 y 22 meses al curar cubos de concreto de 100 x 100 x 100 mm en una solución de sulfato de magnesio. Al analizar los resultados se observa para ambas series, un comportamiento similar al mostrado en el acápite 3.3, siendo 20% el porcentaje pico y a medida que se incrementa la adición de VP su resistencia a la compresión se ve reducida.

El incremento de resistencia a la compresión puede ser explicado de igual manera que las probetas curadas mediante inmersión de agua. En el caso del decrecimiento, cabe la posibilidad de ser explicado por el aumento de la sílice frente al ambiente agresivo generado por la solución de sulfato de magnesio más el agua, generándose iones que atraen los compuestos de calcio y sílice influyendo en las cadenas de silicato dicálcico y el silicato tricálcico rompiendo sus enlaces, para la formación de etringita desmesuradamente en la superficie de las probetas, afectando la resistencia de las probetas ensayadas.

#### 4.4 Evaluación económica

Soliman [20], evaluó el uso de VP para elaboración de concreto de ultra-alta resistencia y se observó igualmente una tendencia de aumento de hasta 6% con respecto al patrón para la resistencia a la compresión y a su vez un decremento en el índice de costo de 0.02, al utilizar el valor pico de 20% VP.

Islam [19], realiza un análisis similar, pero respecto al costo total del cemento, observándose nuevamente, un aumento de la resistencia de 10% y un decremento del costo total del cemento de 7% al utilizar 10% VP, siendo este el valor pico.

En el presente estudio se obtuvo una relación directamente proporcional para la resistencia a la compresión y una relación inversamente proporcional para el índice de costo; respecto al aumento del porcentaje de VP, llegando a valores de variación de 16% y 0.01, respectivamente, para el valor pico de 7%.

## 5 CONCLUSIONES

Basados en los resultados obtenidos en el estudio, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- El uso de VP ayuda a mejorar la consistencia de la mezcla de concreto, siendo reflejado en mayores valores de asentamiento.
- La resistencia a la compresión de probetas de concreto con adición de VP presenta valores mayores que el concreto patrón.
- A medida que aumenta la adición del VP en el concreto, se produce un incremento de la resistencia a la compresión en condiciones de ataque por sulfatos hasta un valor máximo equivalente al 7%, luego del cual la resistencia decrece.
- El incremento de adición del VP produce una reducción en el costo total de la mezcla, produciendo un concreto ecológico y económico.
- La utilización del VP como adición y no como RMC evita la variación de la reacción puzolánica dentro del concreto, impidiendo la reducción de compuestos hidratados.

## 6 REFERENCIAS

- [1] H. A. Elaqla, M. A. A. Haloub, y R. N. Rustom, “Effect of new mixing method of glass powder as cement replacement on mechanical behavior of concrete”, *Construction and Building Materials*, vol. 203, pp. 75–82, 2019. J. Clerk Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.
- [2] B. Taha y G. Nounu, “Utilizing Waste Recycled Glass as Sand/Cement Replacement in Concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 21, núm. 12, pp. 709–721, 2009. K. Elissa, “Title of paper if known,” unpublished.
- [3] N. Schwarz, M. DuBois, y N. Neithalath, “Electrical conductivity based characterization of plain and coarse glass powder modified cement pastes”, *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, núm. 9, pp. 656–666, 2007. Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka, and Y. Tagawa, “Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface,” *IEEE Transl. J. Magn. Japan*, vol. 2, pp. 740–741, 1987 [Digests 9th Annual Conf. Magnetism Japan, p. 301, 1982].
- [4] H. Elaqla y R. Rustom, “Effect of using glass powder as cement replacement on rheological and mechanical properties of cement paste”, *Construction and Building Materials*, vol. 179, pp. 326–335, 2018.
- [5] N. Schwarz y N. Neithalath, “Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration”, *Cement and Concrete Research*, vol. 38, núm. 4, pp. 429–436, 2008.
- [6] C. Shi, Y. Wu, C. Riefler, y H. Wang, “Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders”, *Cement and Concrete Research*, vol. 35, núm. 5, pp. 987–993, 2005.
- [7] H. A. Elaqla, M. J. Al-Afghany, A. B. Abo-Hasseira, I. H. Elmasry, A. M. Tabasi, y M. D. Alwan, “Effect of immersion time of glass powder on mechanical properties of concrete contained glass powder as cement replacement”, *Construction and Building Materials*, vol. 206, pp. 674–682, 2019.
- [8] R. Vandhiyan, K. Ramkumar, y R. Ramya, “Experimental Study On Replacement Of Cement By Glass Powder”, *International Journal of Engineering Research*, vol. 2, núm. 5, p. 6, 2013.



- [9] A. A. Aliabdo, A. E. M. Abd Elmoaty, y A. Y. Aboshama, "Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 124, pp. 866–877, 2016.
- [10] Z. Tang, W. Li, G. Ke, J. L. Zhou, y V. W. Y. Tam, "Sulfate attack resistance of sustainable concrete incorporating various industrial solid wastes", *Journal of Cleaner Production*, vol. 218, pp. 810–822, 2019.
- [11] NTP 334.082:2016, "CEMENTOS. Cemento Pórtland. Requisitos de desempeño", INACAL, Lima, 2016.
- [12] NTP 334.002:2018, "CEMENTOS. Determinación de la finura del cemento Pórtland expresada por la superficie específica usando el aparato de permeabilidad al aire", INACAL, Lima, 2018.
- [13] NTP 334.045:2018, "CEMENTOS. Método de ensayo para determinar la finura del cemento Pórtland por el tamiz de 45  $\mu\text{m}$  (No. 325)", INACAL, Lima, 2018.
- [14] NTP 400.012:2013, "AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global", INACAL, Lima, 2013.
- [15] NTP 339.035:2015, "CONCRETO. Método de ensayo para la medición del asentamiento del concreto de Cemento Portland", INACAL, Lima, 2015.
- [16] NTP 339.034:2015, "CONCRETO. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas", INACAL, Lima, 2015.
- [17] NTP 334.094:2017, "CEMENTOS. Método para determinar el cambio de longitud en morteros de cemento Pórtland expuestos a soluciones sulfatadas.", INACAL, Lima, 2017.
- [18] A. Hendi, D. Mostofinejad, A. Sedaghatdoost, M. Zohrabi, N. Naeimi, y A. Tavakolinia, "Mix design of the green self-consolidating concrete: Incorporating the waste glass powder", *Construction and Building Materials*, vol. 199, pp. 369-384, 2019.
- [19] G. M. S. Islam, M. H. Rahman, y N. Kazi, "Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice", *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 6, n.o 1, pp. 37-44, 2017.

- [20] N. A. Soliman y A. Tagnit-Hamou, “Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – Towards ecofriendly concrete”, *Construction and Building Materials*, vol. 125, pp. 600-612, 2016.
- [21] K. Afshinnia y P. R. Rangaraju, “Impact of combined use of ground glass powder and crushed glass aggregate on selected properties of Portland cement concrete”, *Construction and Building Materials*, vol. 117, pp. 263-272, ago. 2016.
- [22] E. F. Irassar, V. L. Bonavetti, G. Menéndez, y M. F. Carrasco, “Hidratación y propiedades de cemento ternarios con filler calcáreo y escoria”, *Revista ALCONPAT*, p. 13, 2015.
- [23] R. Idir, M. Cyr, y A. Tagnit-Hamou, “Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet”, *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, núm. 1, pp. 19–29, ene. 2011.
- [24] A. Hendi, A. Behravan, D. Mostofinejad, S. M. Moshtaghi, y K. Rezayi, «Implementing ANN to minimize sewage systems concrete corrosion with glass beads substitution», *Construction and Building Materials*, vol. 138, pp. 441-454, may 2017.