UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

**USO DE VIDRIO RECICLADO COMO ADICIÓN EN LA
ELABORACIÓN DE CONCRETO $f'_c=315 \text{ kg/cm}^2$ PARA OBRAS
PORTUARIAS**

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero 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, [02 de diciembre 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 Andrés 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 Itamar Valdivia Farromeque

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación no habría sido posible sin contar con el apoyo de nuestro patrocinador Cemento Inka. Agradecer de forma especial a los ingenieros Marco Correa, Alexander Rojas, Omar López 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

En la actualidad las cantidades de residuos han incrementado con el pasar de los años, convirtiéndose en una amenaza grave para el medio ambiente. Esto ha generado que reciba mayor atención por las autoridades e investigadores a nivel global, proponiendo usos respetuosos con el medio ambiente de estos residuos, los cuales han ido desarrollando y mejorando en los últimos años. Este estudio profundiza en el posible uso del residuo de vidrio plano como una solución sostenible, al ser adicionados en el concreto. Para esto, se hicieron diseños de mezcla con diferentes cantidades de vidrio pulverizado y se realizaron comparaciones para identificar el efecto en las propiedades del concreto mediante ensayos de asentamiento, resistencia a la compresión y resistencia a la compresión en condiciones de ataque por sulfatos. Los resultados muestran que, para dichas pruebas, la adición de vidrio pulverizado favorece a las características de sus propiedades, presentando además un ahorro económico.

Palabras claves— polvo de vidrio, resistencia al ataque por sulfatos, adición, resistencia a la compresión, concreto ecológico.

Use of recycled glass as an addition in the elaboration of
concrete $f'_c = 315 \text{ kg / cm}^2$ for port works

ABSTRACT

At present the amounts of waste have increased over the years, turning into a serious threat to the environment. This has generated greater attention by authorities and researchers around the world, proposing environmentally friendly uses of these residues, which have been developing and improving in recent years. This study delves into the possible use of pulverized flat glass waste as a sustainable solution, when added to concrete. For this, mixing designs were made with different amounts of glass powder and comparisons were made to identify the effect on the properties of the concrete by slump tests, compressive strength and compressive strength in sulfate attack conditions. The results show that for these tests, the addition of glass powder favors the characteristics of its properties, while presenting an economic saving.

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

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN.....	1
EL PROBLEMA	1
ESTADO DEL ARTE.....	3
HIPÓTESIS.....	5
OBJETIVO GENERAL	5
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO	6
1 MARCO TEÓRICO.....	7
1.1 OBRAS PORTUARIAS	7
1.1.1 Aspectos generales	7
1.1.2 Tipos	7
1.1.3 Consideraciones.....	8
1.2 EL CONCRETO	10
1.2.1 Aspectos generales	10
1.2.2 Composición química.....	11
1.2.3 Componentes	11
1.2.3.1 Cemento.....	11
1.2.3.2 Agregado fino	13
1.2.3.3 Agregado grueso.....	13
1.2.4 Propiedades.....	14
1.2.4.1 Asentamiento.....	14
1.2.4.2 Resistencia a la compresión.....	15
1.2.4.3 Durabilidad	17
1.3 EL VIDRIO	19
1.3.1 Composición química.....	19
1.3.2 Propiedades físicas	20
1.3.3 Reutilización como adición	21
1.4 REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE.....	21
1.5 DISEÑO DE MEZCLAS	22
2 METODOLOGÍA.....	25

2.1	MATERIAL	25
2.1.1	Población	25
2.1.2	Muestra	26
2.2	MÉTODO	27
2.2.1	Nivel de investigación	27
2.2.2	Diseño de investigación	27
2.2.3	Variables de estudio y operacionalización	29
2.2.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	29
2.2.5	Técnicas de procesamiento y análisis de datos	30
2.3	PROCEDIMIENTO	31
2.3.1	Procesamiento de vidrio	31
2.3.2	Caracterización de materiales	33
2.3.2.1	Análisis físico y químico del cemento	33
2.3.2.2	Análisis granulométrico del agregado grueso y fino	34
2.3.2.3	Peso unitario suelto y compactado	36
2.3.2.4	Peso específico del agregado grueso y fino	37
2.3.2.5	Material que pasa la malla N°200	40
2.3.2.6	Contenido de humedad del agregado grueso y fino	41
2.3.2.7	Método de Abrasión	41
2.3.2.8	Finura expresada por la superficie específica - Blaine	43
2.3.2.9	Material que pasa la malla N°325 (vidrio)	45
2.3.3	Diseño de mezcla	46
2.3.4	Elaboración y curado de probetas	47
2.3.5	Ensayos de concreto	49
2.3.5.1	Asentamiento	49
2.3.5.2	Resistencia a la compresión	51
2.3.5.3	Prueba de ataque por sulfatos	52
3	RESULTADOS	53
3.1	OBJETIVO 01 - DISEÑO DE MEZCLAS	53
3.2	OBJETIVO 02 – ASENTAMIENTO	54
3.3	OBJETIVO 03 - RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	54
3.4	OBJETIVO 04 - PRUEBAS DE ATAQUE POR SULFATOS	57

3.5	OBJETIVO 05 - IMPACTO AMBIENTAL	61
3.5.1	Emisión de CO ₂	61
3.5.2	Generación de energía	63
3.6	OBJETIVO 06 - PORCENTAJE IDEAL DE VIDRIO	64
3.6.1	Aspecto técnico.....	64
3.6.2	Aspecto económico.....	64
3.6.3	Aspecto ambiental	65
4	CONCLUSIONES	67
5	RECOMENDACIONES	69
6	REFERENCIAS	71
7	ANEXOS	77
	ANEXO 1 ANALISIS FISICO Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO	77
	ANEXO 2 ANALISIS GRANULOMETRICO	78
	ANEXO 3 PESO UNITARIO SUELTO Y COMPACTADO	80
	ANEXO 4 PESO ESPECIFICO Y ABSORCION	82
	ANEXO 5 MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 200.....	84
	ANEXO 6 CONTENIDO DE HUMEDAD	85
	ANEXO 7 METODO DE ABRASION	86
	ANEXO 8 FINURA EXPRESADA POR LA SUPERFICIE ESPECIFICA (BLAINE) .	87
	ANEXO 9 MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 325.....	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cantidades de generación residuos sólidos en la provincia de Lima	1
Tabla 2 Generación de GEI tras la producción de vidrio	2
Tabla 3 Requisitos para concreto expuesto a soluciones de sulfato	9
Tabla 4 Contenido máximo de iones cloruro para la protección contra la corrosión del refuerzo	9
Tabla 5 Componentes principales del cemento y sus funciones	12
Tabla 6 Tipos de cemento según norma de Performance	12
Tabla 7 Granulometría ideal del agregado fino	13
Tabla 8 Granulometría ideal del agregado grueso	14
Tabla 9 Clasificación de los asentamientos (Slump)	15
Tabla 10 Propiedades físicas del vidrio sodo-cálcico	21
Tabla 11 Materiales de la investigación	25
Tabla 12 Detalle de cantidad de probetas utilizadas	26
Tabla 13 Elementos del diseño de investigación	28
Tabla 14 Matriz de operacionalización de las variables de la investigación	29
Tabla 15 Resumen de diseño de mezclas elaborados	53
Tabla 16 Resumen de cantidad de materiales utilizados	53
Tabla 17 Resultados de ensayo de asentamiento y temperatura	54
Tabla 18 Resultados de valores de f'_c (MPa) de los ensayos de resistencia a la compresión	54
Tabla 19 Variación de los valores de f'_c respecto al patrón	56
Tabla 20 Porcentajes de desarrollo de resistencia a 7 y 90 días	57
Tabla 21 Resultados de valores de f'_c (MPa) de las pruebas de ataque por sulfatos	57
Tabla 22 Variación de los valores de f'_c respecto al patrón (ataque por sulfatos)	59
Tabla 23 Porcentajes de desarrollo de resistencia a 7 y 90 días (ataque por sulfatos)	60
Tabla 24. Cantidades de CO ₂ generados en la producción de cemento para distintos tipos de concreto	62
Tabla 25. Cantidades de energía consumida en la producción de cemento para distintos tipos de concreto	63
Tabla 26. Precios equivalentes en el mercado limeño para los materiales utilizados	65
Tabla 27. Detalle de precios para los distintos tipos de concreto	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Elementos de un dique.	8
Figura 2. Desarrollo de la resistencia a compresión, en porcentaje de f'_c	16
Figura 3. Comparación entre resistencia y relación agua/cemento del concreto.....	17
Figura 4. Causas de falta de durabilidad.....	18
Figura 5. Relación del f'_c y la permeabilidad del concreto respecto a su porcentaje de poros.	18
Figura 6. Estructura molecular bidimensional del vidrio sodo-cálcico.	20
Figura 7. Flujograma de diseño de mezcla mediante el método de módulo de fineza.....	24
Figura 8. Vidrio sodo-cálcico sin procesar.....	32
Figura 9. Molino de minerales.....	32
Figura 10. Vidrio pulverizado (diámetro 45 μm)	33
Figura 11. Serie de mallas y muestra para análisis granulométrico de agregado grueso	35
Figura 12. Moldes rellenos para ensayos de peso unitario	36
Figura 13. Máquina de Los Ángeles.....	42
Figura 14. Permeabilímetro de Blaine	43
Figura 15. Máquina de presión negativa	45
Figura 16. Flujograma de la secuencia de elaboración de la mezcla.....	48
Figura 17. Probetas de concreto curadas en agua.....	49
Figura 18. Probetas de concreto curadas en solución de sulfato de magnesio	49
Figura 19. Medición del asentamiento del concreto ensayado	50
Figura 20. Prensa hidráulica	51
Figura 21. Valores promedio de f'_c de probetas según porcentaje de vidrio.....	55
Figura 22. Comparación de desarrollo de f'_c según porcentaje de vidrio respecto al tiempo	56
Figura 23. Valores promedio de f'_c de probetas según porcentaje de vidrio (ataque por sulfatos)	58
Figura 24. Comparación de desarrollo de f'_c según porcentaje de vidrio respecto al tiempo (ataque por sulfatos)	59
Figura 25. Probetas curadas en solución de sulfato de magnesio durante 90 días	60
Figura 26. Producción nacional de cemento anual (2010-2018) en miles de toneladas.....	61
Figura 27. Despacho nacional de cemento anual (2010-2018) en miles de toneladas.	61

Figura 28. Distribución en porcentaje de los diferentes tipos de construcción en el Perú del
año 2018. 62

INTRODUCCIÓN

El Problema

Durante los últimos años en Lima, desde el ámbito ambiental, se han estado realizando estudios que identifican los niveles de contaminación, tales como los realizados por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Estos estudios muestran la cantidad de generación de residuos sólidos en la provincia de Lima, ver Tabla 1, donde se observa una tendencia a aumentar anualmente. En su mayoría, esta cantidad es generada por productos que después de cumplida su vida útil son desechados y aunque son reciclados continúan presentando niveles altos de contaminación sólida al medio ambiente (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2017).

Tabla 1

Cantidades de generación residuos sólidos en la provincia de Lima

Año	Per cápita anual (kg/hab/día)	Diaria (ton/día)	Anual (ton)
2014	1.01	7'748.2	2'828'128.0
2015	1.03	8'013.1	2'924'779.0
2016	1.12	8'670.1	3'164'854.0

Nota. Adaptado de “Residuos sólidos per cápita en la provincia de Lima, según distrito, 2014-2016”, por INEI, 2018

Ahora, llevando el enfoque a los residuos de vidrios, el ministerio del ambiente menciona que los desechos generados por los materiales hechos de vidrio, pertenecientes a la categoría de residuos sólidos representan el 3.25% de la totalidad (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2013).

De este porcentaje de vidrio, como desecho, la mayoría de los productos derivados de este no cumplen con su vida cíclica como debería corresponderles. Por el contrario, son desechados y desperdiciados en vertederos que solo contaminan al medio ambiente que los rodea, siendo reciclados (refundidos y reutilizados) únicamente el 5% de las 852'000 toneladas anuales de estos residuos (Gomero, 2017) y diariamente apenas 169 toneladas

(4%) y apenas diariamente 169 toneladas (4%) al día cumplen dicho fin (Soto & Hernández, 2016).

Entonces, si tomamos en cuenta que 1 kg de vidrio en un solo horno a gas genera aproximadamente 0.6 kg de dióxido de carbono (CO₂), de los cuales 0.45 kg proceden de la combustión de combustibles fósiles y 0.15 kg de la disociación de materias primas carbonatadas empleadas en la mezcla, se estarían produciendo más elementos contaminantes al medio ambiente. Estos valores, como se presenta en la Tabla 2, muestran las cantidades de gases de efecto invernadero (GEI) producidos por los efectos de producir vidrio, resaltando la emisión de compuestos de nitrógeno y oxígeno (NO_x) como uno de los principales agentes contaminantes (Grupo del Banco Mundial [GBM], 2007).

Tabla 2
Generación de GEI tras la producción de vidrio

Residuos por unidad de producto	Unidad	Hornos de vidrio plano	Hornos de vidrio para envases
Material particulado	Kg/ton vidrio fundido	0.02 – 0.1	0.002 – 0.22
	mg/Nm ³	5.0 – 4.0	1 – 35
NO _x	Kg/ton vidrio fundido	1.1 – 2.9	<0.75
	mg/Nm ³	495 – 1250	<400
SO _x	Kg/ton vidrio fundido	0.54 – 4.0	0.2 – 3.5
	mg/Nm ³	200 – 1700	100 – 1650
HCl	Kg/ton vidrio fundido	<0.01 – 0.08	0.01 – 0.07
	mg/Nm ³	4.0 – 30	7 – 30
HF	Kg/ton vidrio fundido	<0.002 – 0.01	≤0.02
	mg/Nm ³	<1.0 – 4.0	≤1 – 6
Metales	Kg/ton vidrio fundido	<0.001	<0.001
	mg/Nm ³	<1.0	<1.0

Nota. Adaptado de “Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la fabricación de vidrio”, por GMB, 2017

Caso contrario, si se reciclará el vidrio, se podría evitar que la emisión de 300 g de CO₂ al ambiente por cada kg de vidrio, considerando que solo se recicla un porcentaje de una unidad de material hecho de vidrio. Pero si el producto fuera reciclado en su totalidad se ahorraría

un 20% de los gases contaminantes lanzados a la atmósfera generados por la producción de nuevos materiales hechos con vidrio.

Estado del Arte

En los estudios realizados por Cortez Peñaloza, Elisa Liliana, revela que la adición de vidrios molidos como agregado grueso incrementa la resistencia a la compresión a los 28 días del concreto simple en un 12%, siendo la adición de vidrio al cemento equivalente al 20% para un diseño de mezcla del concreto de $f'_c = 175 \text{ kg/cm}^2$. Para la evaluación se realizaron 4 probetas con diseño convencional sin adición de vidrio triturado y 28 probetas experimentales con diferentes porcentajes de vidrio triturado, en donde se reemplazaron la piedra chancada por vidrio triturado tipo sodo-cálcico en los porcentajes en peso de 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 75% y 100% sobre la mezcla del concreto convencional (Cortez, 2017).

En las investigaciones realizadas por la Universidad Privada del Norte se detallan los ensayos de análisis granulométrico, contenido de humedad, peso específico, peso unitario y absorción de los agregados gruesos y finos extraídos para la elaboración de un adoquín especial. Además, se realiza el diseño de mezclas para cada porcentaje de vidrio y de acuerdo con el tamaño nominal máximo del agregado, se especifica la elaboración de los adoquines en el laboratorio de la Universidad Privada del Norte. Esto ayudo a que se determine y se verifique el cumplimiento de los requisitos mínimos de resistencia a la compresión y absorción. Al reemplazar el agregado grueso por distintos porcentajes de vidrio molido en los pesos utilizados en las mezclas se confirma que al adicionar el 50% de vidrio reciclado a la mezcla se incrementa el 4.09% la resistencia del adoquín (Cabrera, 2014).

Como siguiente antecedente en la investigación realizada por la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, se hace referencia a que el uso de vidrio como material reciclado en la adición al cemento por el déficit en el reciclaje del vidrio existente en Chiclayo. En esa investigación se comprueba la reducción del contaminante sólido del medio ambiente, llevándose a cabo mediante la utilización en concretos de altas resistencias. El estudio se

basó en estudios de los agregados de las canteras más representativas de la zona, así también la evaluación de concreto en estado fresco, en estado endurecido y la durabilidad del concreto con las adiciones porcentuales de vidrio (Córdova, 2018).

A pesar de lo mencionado anteriormente, también existe algunas desventajas al usar adición de vidrio para la elaboración de concreto, como el hecho de que estos concretos no desarrollan su resistencia a la compresión como el concreto tradicional en edades tempranas y por ende dificulta su utilización en obras convencionales donde se requiere una resistencia inicial (7 y 14 días) del 65% del f'_c , resistencia a la compresión a los 28 días (ASTM Committee C09.61, 2016). Esto se observa, por ejemplo, en las investigaciones realizadas por el Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional Gangneung-Wonju, donde se comprueba que existe una diferencia de aproximadamente 10% a 20% de su resistencia a la compresión y hasta un 15% de su resistencia a la flexión a edades tempranas para un concreto con 50% y 100% de reemplazo de agregado fino frente al concreto patrón. Finalmente, en la misma investigación hacen énfasis en las ventajas que se obtienen a largo plazo en cuanto al incremento de su resistencia a la compresión (Sun Kim, Yeong Choi, & Yang, 2018).

Ahora, un caso similar ocurre en la investigación realizada por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de TI y Ciencias Emergentes y la Universidad Quaid-e-Awam, en la cual nos plantean que la resistencia a la compresión mínima observada, en un concreto que contiene polvo de vidrio y escoria de acero como 40% de reemplazo de cemento y 40% de reemplazo de agregado fino, respectivamente, es 5.7% más bajo que la mezcla de referencia a edades prematuras. Por ende, los investigadores concluyen que este tipo de concretos solo se podría desarrollar en el caso de construcciones convencionales. En donde solo se aplicará el polvo de vidrio y escoria de acero de forma conjunta, para obtener un concreto con una resistencia a la compresión a edades tempranas no afectada por estas adiciones (Rehman, Iqbal, & Ali, 2018).

Hipótesis

Al utilizar un rango entre 6 a 9% de vidrio como adición en la elaboración de concreto HS con escoria de alto horno $f'_c=315 \text{ kg/cm}^2$ para obras portuarias, se puede reducir el impacto ambiental generado por los residuos sólidos de vidrio.

Objetivo General

Desarrollar un concreto HS con escoria de alto horno $f'_c=315 \text{ kg/cm}^2$ con vidrio reciclado como adición en el concreto para obras portuarias para reducir el impacto ambiental generado por los residuos sólidos de vidrio.

Objetivos Específicos

- ✓ Elaborar el diseño de mezclas del concreto con 6%, 7%, 8% y 9% de vidrio pulverizado utilizando el método de módulo de fineza.
- ✓ Estimar el asentamiento del concreto con 6%, 7%, 8%, y 9% de vidrio pulverizado
- ✓ Estimar la resistencia a la compresión de las probetas de concreto con 6%, 7%, 8% y 9% de vidrio pulverizado a 7, 28 y 90 días.
- ✓ Estimar la resistencia a la compresión de las probetas de concreto con 6%, 7%, 8% y 9% de vidrio pulverizado curadas en solución de sulfato de magnesio; a 7, 28 y 90 días.
- ✓ Calcular la cantidad de energía y la emisión de CO₂ producido en la elaboración del concreto patrón y el concreto con % de vidrio pulverizado.
- ✓ Analizar las mezclas de 6, 7, 8 y 9% de adición de vidrio reciclado desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

Descripción del Contenido

- 1) Marco teórico: en este capítulo se presenta la recopilación de la información acerca del tipo de obras, tipo de elementos y los componentes involucrados en el proyecto. Además, se realizó una breve descripción de las propiedades tanto en estado fresco como en estado endurecido del concreto las cuales nos ayudaron a realizar un mejor enfoque de lo que se busca sustentar con la investigación.
- 2) Metodología: en este capítulo, se explican aspectos relacionados a los ensayos empleados en los términos físicos y químicos de los materiales que conforman el concreto, ensayos y evaluaciones de probetas por dispersión de valores, técnicas mecánicas para la pulverización del vidrio y de tamizado para su clasificación post-pulverización. El procedimiento de la recolección de datos se llevó a cabo mediante el análisis de 105 probetas con diferentes porcentajes de adiciones de vidrio pulverizado. Además, se hizo énfasis en ensayos cualitativos y cuantitativos para validar la utilidad de la adición del material.
- 3) Resultados y análisis: en este capítulo, se desarrolló una evaluación de los resultados comparando los valores de resistencia a la compresión en los diferentes días de exposición a la solución de sulfato y al curado en agua de las mezclas de concreto realizada.
- 4) Conclusiones: en este capítulo, se realizó una compilación de observaciones a partir de los resultados obtenidos, su interpretación e información útil para futuras investigaciones sobre la temática.
- 5) Recomendaciones: en este último capítulo se realizó una compilación de las recomendaciones necesarias para llevar a cabo investigaciones con similar perfil a las presentadas en la literatura.

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Obras portuarias

1.1.1 Aspectos generales

En la literatura Obras portuarias (2014), se explica que “los puertos son interfases entre distintos modos de transporte y centros de transporte combinados. Además, son áreas multifuncionales de comercio e industria, donde las mercancías no solamente transitan, sino que se manipulan, manufacturan y distribuyen” (p. 4), teniendo una influencia fundamental en el comercio global.

Al ser un involucrado fundamental de la cadena logística de transporte internacional, los puertos han buscado aumentar su eficiencia para reducir sus costos, al hacer uso de obras portuarias (marinas y terrestres) que reduzcan los tiempos de carga y descarga, aumenten la seguridad, entre otros.

El objetivo de las obras portuarias es brindar una mejora de las condiciones naturales iniciales, con el fin de tener una mejor respuesta ante las diversas exigencias de las operaciones logísticas, las cuales dependen del tipo de mercancía, del volumen, de las características de los vehículos y buques, y las condiciones ambientales (Almazán & Palomino, 2001).

1.1.2 Tipos

Para poder clasificar los tipos de obras portuarias debe tomarse en cuenta la función de estos. Por ello se mencionarán los principales grupos para su consideración:

- ✓ Obras de abrigo: sirven para proteger una determinada área del oleaje con el fin de establecer una instalación portuaria. Los principales tipos son diques de abrigo y contradiques (ver Figura 1).

*Figura 1. Elementos de un dique.
Recuperado de "Obras en talud" [diapositivas de PowerPoint], por Gracia,
2017*

- Obras de atraque: sirven para facilitar que el buque llegue a tierra, logrando una mejor interacción entre el transporte terrestre y marino. Los principales tipos son: muelles, plataformas, pantalanés, duques de Alba y estructuras flotantes.

1.1.3 Consideraciones

Al estar bajo permanente contacto con el mar y con la brisa marina, estos elementos deben ser diseñados y contruidos considerando el ataque de los sulfatos y cloruros. En la norma de concreto armado se especifica, en el capítulo 4, que dependiendo del nivel de exposición a sulfatos se debe utilizar un tipo de cemento, una relación agua-cemento (a/c) y una resistencia a la compresión a los 28 días (f'_c) específicos (Comité Técnico Especializado, 2009). Esto se puede observar en la Tabla 3.

Tabla 3
Requisitos para concreto expuesto a soluciones de sulfato

Exposición a sulfatos	SO ₄ presente en el suelo, (% en peso)	SO ₄ en el agua, ppm	Tipo de Cemento	Relación máxima a/c (en peso)	f _c mínimo (MPa)
Insignificante	$0.0 \leq \text{SO}_4 < 0.1$	$0 \leq \text{SO}_4 < 150$	—	—	—
Moderada	$0.1 \leq \text{SO}_4 < 0.2$	$150 \leq \text{SO}_4 < 1500$	II, IP(MS), IS(MS), P(MS), I(PM)(MS), I(SM)(MS)	0.50	28
Severa	$0.2 \leq \text{SO}_4 < 2.0$	$1500 \leq \text{SO}_4 < 10000$	V	0.45	31
Muy severa	$2.0 < \text{SO}_4$	$10000 < \text{SO}_4$	Tipo V más puzolana	0.45	31

Nota. Adaptado de “Norma E.060. Concreto armado”, 2016

En el caso de los cloruros, la norma también nos brinda una tabla para considerar la protección contra la corrosión del refuerzo. Esto se puede indicar en la Tabla 4.

Tabla 4
Contenido máximo de iones cloruro para la protección contra la corrosión del refuerzo

Tipo de elemento	Contenido máximo de iones de cloruro (%)
Concreto preesforzado	0.06
Concreto armado que en servicio estará expuesto a cloruros	0.15
Concreto armado que en servicio estará seco o protegido contra la humedad	1.00
Otras construcciones de concreto armado	0.30

Nota. Adaptado de “Norma E.060. Concreto armado”, 2016

1.2 El concreto

1.2.1 Aspectos generales

El concreto es el resultado de la combinación de material cementante, un material de relleno, agua y ocasionalmente aditivos que al pasar del estado fresco al endurecido forman una piedra artificial capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión (Sánchez de Guzmán, 2001). Este elemento es elaborado netamente por el hombre, diseñado y producido de acuerdo con normas impuestas para aplicaciones en las que se requiera determinadas características según el proyecto. Además de presentar propiedades tales como la facilidad de colocación, la adaptabilidad de su forma, la rapidez de su fraguado, la capacidad de acomodarse de acuerdo con las necesidades de la construcción y otras; las que convierten al concreto en el compuesto más utilizado por el hombre, después del agua.

Según, la gran variedad y la aparición de nuevas necesidades a través del tiempo en el mercado de la construcción, se han generado compuestos químicos, conocidos como aditivos, que alteran la composición química del concreto mejorando sus propiedades y brindando características especiales al concreto en estado fresco o en estado endurecido.

Ahora, cada uno de los elementos que conforman al concreto deberán cumplir ciertas regulaciones de calidad con el propósito minimizar los errores de diseño que puedan dificultar su aplicación. Para la investigación se dio uso al cemento especializado con alta resistencia a los sulfatos (HS), la cual deberá seguir ciertos estándares que la norma técnica peruana presenta y por ende podamos considerarlo como un material apto para la elaboración de un concreto con alta resistencia a los sulfatos. Los estándares y alcances van desde las características de los materiales, manipulación de los materiales, procedimientos de elaboración hasta los métodos de ensayo y la aplicación del concreto. Por ello, para realizar un análisis más amplio y refrescar los conocimientos en cuanto al concreto especializado, en esta capítulo, se dará una breve revisión a los componentes del concreto con propiedades a altas resistencias a los sulfatos y a las características que deberán seguir según normas, tanto peruanas como internacionales.

1.2.2 Composición química

Al hablar de la composición química del concreto se tiene que hacer referencia a la composición básica de cada uno de los materiales que lo conforman, tales como el cemento, el agua y los agregados, siendo su participación equivalente al 25%, 10% y el 65% respectivamente (Araya R. & Muñoz Umaña, 2011).

De esta manera, la composición química del concreto dependerá netamente de las propiedades que presenten sus materiales y de su nivel de hidratación, las cuales serán descritas en el capítulo 2.3.2.1 para la composición química del cemento y el capítulo 1.3.1 para la composición química del vidrio.

1.2.3 Componentes

1.2.3.1 Cemento

“Producto que se obtiene por la pulverización del clinker Portland con la adición de una o más formas de sulfato de calcio” (Rivera, 2013, pág. 18)

El cemento es el material conglomerante de la mezcla que cumple la función de unir los demás componentes que eventualmente fraguan y desarrollan solidez.

Respecto a su composición química sabemos que durante su proceso de fabricación se usa principalmente como materia prima la cal, sílice, alúmina y hierro. Por otro lado, sus principales compuestos se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5
Componentes principales del cemento y sus funciones

Nombre (Abreviatura)	Funciones
Silicato bicálcico (C ₂ S)	Contribuye en gran parte al aumento de resistencia a edades mayores de una semana
Silicato tricálcico (C ₃ S)	El factor principal del fraguado inicial y del rápido endurecimiento, además de la resistencia durante el primer mes
Aluminato tricálcico (C ₃ A)	Facilita la reacción de la sílice con la cal. Con un bajo contenido de C ₃ A, el cemento es más resistente a los sulfatos
Aluminoferrito tetacálcico (C ₄ AF)	Reduce la temperatura de calcinación en el horno rotatorio, ayudando a la fabricación del cemento

Nota. Adaptado de “Concreto Simple”, por Rivera, 2013

Existe una amplia variedad de tipos de cementos y clasificaciones. Para esta investigación se usó la NTP 334.082 donde se utiliza la siguiente clasificación:

Tabla 6
Tipos de cemento según norma de Performance

Tipo	Descripción
GU	Cemento Portland para construcciones generales.
HE	De alta resistencia inicial.
MS	De moderada resistencia a los sulfatos.
HS	De alta resistencia a los sulfatos.
MH	De moderado calor de hidratación.
LH	De bajo calor de hidratación.

Como se observa en la Tabla 6, cada uno de estos tipos de cementos se caracteriza por poseer beneficios independientes de cada uno, siendo el cemento HS el utilizado en la investigación debido a su mejor capacidad de resistencia al ataque por sulfatos al cual están expuestas las obras portuarias.

1.2.3.2 Agregado fino

Se puede decir que un agregado es fino cuando el material es de tamaño inferior a la malla N° 4 y no menor que la malla N° 200, siendo la arena gruesa la que se usa comúnmente en el sector. También se usa como referencia el rango de módulo de finura entre 2.3 y 3.1.

Su función principal dentro de la mezcla es actuar como llenante entre los vacíos dejados por los demás componentes, llegando a ser hasta un 75% de la cantidad total de la mezcla. Además, la forma y textura del agregado afectara en el desempeño y calidad de la mezcla.

En el caso de su granulometría se sugiere en la NTP 400.012 la composición mostrada en la Tabla 7. Además, se menciona que el material retenido en alguna de las mallas utilizadas no deberá tener más del 45 % del total de la cantidad ensayada.

Tabla 7
Granulometría ideal del agregado fino

Malla (Diámetro)	Porcentaje que pasa (%)
3/8" (9.52 mm)	100
N° 4 (4.76 mm)	95 – 100
N° 8 (2.36 mm)	80 – 100
N° 16 (1.18 mm)	50 – 85
N° 30 (595 µm)	25 – 60
N° 50 (297 µm)	10 – 30
N° 100 (149 µm)	2 – 10

Nota. Recuperado de “NTP 400.012. AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global”, INACAL, 2001

1.2.3.3 Agregado grueso

Para el caso del agregado grueso, sus partículas serán mayores a las de la malla N° 4, siendo la grava y la piedra chancada los más usados en el sector. Su función principal dentro de la

mezcla es para generar volumen y aportar con el aumento de la resistencia del concreto sin añadir mayor peso.

En el caso de su granulometría se sugiere en la NTP 400.012 un rango de porcentajes que pasen mallas normadas, lo cual se observa en la Tabla 8.

Tabla 8
Granulometría ideal del agregado grueso

Malla (Diámetro)	Porcentaje que pasa (%)
1 ½" (37.5mm)	100
1" (25mm)	95 – 100
½" (12.5mm)	25 – 60
Nº 4 (4.75 mm)	0 – 10
Nº 8 (2.36 mm)	0 – 5

Nota. Recuperado de "NTP 400.012. AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global", INACAL 2001

Una de las propiedades importantes del agregado grueso es la resistencia al desgaste, ya que en la etapa de mezclado las partículas de los componentes pueden llegar a fraccionarse por la acción del equipo o durante la vida útil de elementos bajo constantes cargas.

1.2.4 Propiedades

1.2.4.1 Asentamiento

El asentamiento es referido como la consistencia o fluidez de la mezcla (Rivera, 2013). Esta se mide utilizando el cono de Abrams y según los resultados se puede clasificar en ciertas categorías, las cuales se detallan en la Tabla 9.

Tabla 9
Clasificación de los asentamientos (Slump)

Consistencia	Slump (mm)
Muy seca	0 – 20
Seca	20 – 35
Semi-seca	35 – 50
Media	50 – 100
Húmeda	100 – 150
Muy húmeda	150 – 200
Super fluida	>200

Nota. Adaptado de “Concreto simple”, por Rivera, 2013.

Este ensayo no es aplicable cuando el concreto contiene una cantidad apreciable de agregado grueso de tamaño mayor de 37.5 mm o cuando el concreto no es plástico o cohesivo. Por ello, dependiendo de la consistencia de la mezcla pueden ser utilizados en distintos tipos de elementos estructurales y tener distintas consideraciones al momento de realizar el colocado y la compactación del concreto.

1.2.4.2 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es la medida máxima de la resistencia a carga axial que presenta el concreto, la cual es comúnmente especificada en los planos estructurales como la resistencia que debe alcanzar a los 28 días de su elaboración en obra (Aceros Arequipa, 2011).

Una vez colocado, el concreto adquiere un gran porcentaje de la resistencia diseñada a los 28 días en los primeros 7 días (aproximadamente un 75%), aumentando en una menor cantidad en los días posteriores e incluso llegando a aumentar entre un 10% y 15% a los 56 y 90 días respectivamente (Kosmatka & Wilson, 2011) cómo se observa en la Figura 2.

Figura 2. Desarrollo de la resistencia a compresión, en porcentaje de f'_c .
 Recuperado de "Design and Control of Concrete Mixtures", Kosmatka & Wilson, 2011

Entre las diversas consideraciones que conlleva el f'_c , se debe saber que el concreto no es un material heterogéneo, debido a que sus componentes no son constantes como tampoco lo son sus procedimientos de mezclado, su transporte ni su colocación. Por lo que esta propiedad debe ser medida mediante un análisis estadístico donde, a pesar de la variabilidad que presenta los resultados, se pueda determinar que el f'_c cumple con el valor de diseño.

Los principales factores del desarrollo del f'_c son la relación a/c y el grado de compactación, como se puede observar en la Figura 3; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Se observa una relación inversamente proporcional entre el f'_c y la relación a/c, siendo mayor el primero si el segundo el menor (Neville, 2013). Esto se puede explicar debido a que cuando se tiene una baja relación a/c las partículas de cemento están más cerca, reduciendo la porosidad, la cual afecta directamente la resistencia a la compresión y la durabilidad (Putzmeister, 2018).

Figura 3. Comparación entre resistencia y relación agua/cemento del concreto.
Recuperado de "Tecnología del Concreto", por Neville, 2003

1.2.4.3 Durabilidad

El concreto es un material con un tiempo de vida bastante extendido, por lo cual debe poder resistir el paso del tiempo sin afectar las funciones correspondientes a la estructura ni su resistencia.

Se puede afirmar que el concreto es durable si es capaz de resistir a las condiciones de servicio para el cual ha sido diseñado, como ataque a sulfatos, desgaste, entre otros (Rivera, 2013).

Las causas principales de la falta de durabilidad pueden ser físicas, químicas o mecánicas, las cuales están resumidas en la Figura 4. Aunque cabe resaltar que ningún concreto, sea cual sea su resistencia, podrá resistir alguno de los factores mencionados sin un adecuado diseño de mezclas, en caso este sujeto a más de un factor o no se le brinde el mantenimiento correspondiente.

Figura 4. Causas de falta de durabilidad

Debido a que la mayoría de las causas involucran el transporte de fluidos a través del concreto se debe tener en claro los conceptos de permeabilidad y difusividad. La permeabilidad se refiere a la capacidad del concreto de resistir la penetración de distintos líquidos. La difusividad hace referencia a la capacidad de los iones disueltos para moverse a través del concreto (Kosmatka & Wilson, 2011).

Los conceptos de resistencia a la compresión y permeabilidad dependen de la porosidad del concreto, la cual, a su vez, depende de la relación a/c de la mezcla (ver Figura 5).

Figura 5. Relación del f'_c y la permeabilidad del concreto respecto a su porcentaje de poros.
Recuperado de "Design and Control of Concrete Mixtures", Kosmatka & Wilson, 2011

1.3 El vidrio

1.3.1 Composición química

Dentro de los componentes que se tomaron en cuenta para los diseños del concreto, y para la investigación, está el vidrio. Este material, de apariencia frágil y transparente, tiene como componente principal a la sílice que se encarga de formar los diferentes compuestos. Ahora para poder mencionar a estos debemos tener en cuenta el tipo de vidrio, según el mayor porcentaje de sus compuestos, que existen y cuál será el que se utilizó en esta investigación. Para ello mencionaremos algunos tipos de vidrios y sus características:

- Vidrios de borosilicato: sufren la sustitución de la sílice por el boro para tener una menor expansión. Este tipo de vidrios son utilizados, por lo general, en equipos de laboratorio, hornos y faros debido a que en la fabricación de este se reduce su reblandecimiento la cual es una característica concedida a los equipos mencionados.
- Vidrios de plomo: presenta altos contenidos de plomo debido a que son utilizados en ventanas, lámparas fluorescencias y lámparas de televisión que sufren ataques por la radiación energética. Es usado también en vidrios ópticos y vidrios decorativos.
- Vidrios sodo-cálcicos: constituyen el 90% de todo el vidrio producido debido a la simplicidad de la obtención de las materias primas y de su composición. Son aplicables a vidrios planos, objetos prensados, soplados y productos a los que no es necesaria aplicarle elevadas resistencias químicas o de calor.

Para el presente trabajo de investigación se utilizó el vidrio sodo-cálcico, el cual presenta, por lo general, un 71.6% de óxido de silicio (SiO_2) como compuesto básico, del 12% al 16% de óxido de sodio (Na_2O) y del 6% al 12% de óxido de calcio (CaO). Tanto el Na_2O como el CaO reducen el reblandecimiento hasta los 730°C , lo que facilita su fabricación. En algunos casos dentro de su composición se considera del 0.1 al 5% de óxido de magnesio (MgO) esto evita la desvitrificación y del 0.7% al 7% de óxido de aluminio (Al_2O_3) para aumentar su duración. (McLellan & Shand, 1984).

1.3.2 Propiedades físicas

Para poder mencionar las propiedades físicas presentes en el vidrio sodo-cálcico tenemos que tomar en cuenta el tipo de estructura molecular presente, en la cual los tetraedros de los silicatos (SiO_4) son descritos en el sistema bidimensional. En la Figura 6 se muestra como están estructuradas las partículas de sílice y de oxígeno que forman las cadenas amorfas con partículas de sodio y calcio en el vidrio sodo-cálcico. Estas cadenas a diferencia de las formadas en los cristales no presentan formas regulares, favoreciendo su resistencia y dando al material una mejor respuesta a los impactos.

*Figura 6. Estructura molecular bidimensional del vidrio sodo-cálcico.
Recuperado de " The Physical Chemistry of Silicates",
por Din, 1979*

El vidrio sodo-cálcico, considerado un sólido amorfo debido a la forma que presentan sus enlaces moleculares, presenta características descritas en la Tabla 10. En el caso de la conductividad térmica, se considera un mal conductor y por ende un buen aislante térmico y eléctrico (International Organization for Standardization, 2016).

Tabla 10
Propiedades físicas del vidrio sodo-cálcico

Propiedad	Unidad	Valores
Módulo de Young	kg/cm ²	720,000
Punto de ablandamiento	°C	730
Conductividad térmica	W/mk	1.05
Densidad	kg/cm ³	2,500
Resistencia a tracción	kg/cm ²	300-700

1.3.3 Reutilización como adición

El vidrio, en cuanto a su reciclaje, es un material que en la mayoría de los casos no regresa a su vida cíclica en la reutilización para su producción. Por ende, proponerlo como adición en el concreto le da un fin distinto, el cual sería aprovechable y ayudaría en la reducción de emisión de gases contaminantes. Así también, la reducción de residuos de vidrio en vertederos ayudaría a disminuir el uso de las materias primas para su producción. El vidrio como parte de los componentes del concreto brindaría propiedades que serían ensayadas, investigadas y analizadas, con el fin de comprobar su utilidad.

Para llevar a cabo la reutilización del vidrio sodo-cálcico se pulverizó para adicionarlo al concreto. Este vidrio no reemplazará ningún elemento primario del concreto, sino que se adicionará con respecto a la cantidad de cemento. Esto debido al tamaño, de aproximadamente de 45 μ m diámetro, de las partículas después de su pulverización.

1.4 Reacción álcali-sílice

La reacción álcali-agregado es un fenómeno por el cual los álcalis de óxido de sodio (Na₂O) y de óxido de potasio (K₂O) del cemento, o provenientes del medio exterior que ingresan al concreto a través del agua, reaccionan con algunos componentes que pueden estar presentes en agregados reactivos. Esto ocasiona expansiones internas anormales que pueden producir fisuración, agrietamientos o pérdida de resistencia (Luján, 2011).

La reacción álcali agregado puede ser de 2 tipos:

- Reacción Álcali- Sílice (RAS) reacción entre álcalis y sílice amorfa de agregados reactivos
- Reacción Álcali- Carbonato (RAC) reacción entre álcalis y compuestos carbónicos presentes en agregados calizos o dolomíticos

Ahora para la literatura se tomó muy en cuenta la reacción álcalis sílice (RAS) por el hecho de que el contexto donde se llevó a cabo la investigación existe una abundante cantidad de agregados silicios. Para esto, se consideraron los requisitos de cementos portland adicionados mencionados en la NTP 334.082, en la cual, para estos cementos, se debe presentar expansiones en las barras de mortero a 56 días menor al 0.06% cuando se vayan a utilizar con agregados álcali-reactivos.

1.5 Diseño de mezclas

El estudio de las propiedades de los agregados tiene como fin determinar una selección acorde de componentes y sus cantidades para cumplir con el diseño del concreto respecto a resistencia y durabilidad. Además, debe considerar el costo de dichos materiales, los equipos a utilizar y el personal requerido, ya que, al utilizarse grandes volúmenes de concreto en obra, esta se convertiría en una de las mayores incidencias del presupuesto.

Para la elaboración del diseño de mezcla se optó por la utilización del método por módulos de fineza, debido a que en sus procedimientos se hace menor uso de tablas, se hace uso de un factor de cemento por m^3 de concreto y se toma una mayor consideración de los volúmenes absolutos de los agregados con respecto a las incidencias de estos. Estos hechos son de importancia debido a que en la investigación se utilizó vidrio pulverizado, un vidrio de alta finura, para lo cual se vio conveniente la reducción de la incidencia del agregado fino en un 1% en el diseño. Esto con la finalidad de evitar problemas de absorción excesivo de agua en la mezcla.

Los pasos a seguir del flujograma para el diseño de mezclas (ver Figura 7) se describirán a continuación:

- 1) Elección de la resistencia a la compresión a los 28 días siguiendo restricciones según el uso del concreto.
- 2) Selección de las características de los agregados.
- 3) Selección del asentamiento.
- 4) Selección de la relación agua cemento según restricciones de la norma E.060.
- 5) Selección del contenido del aire atrapado.
- 6) Determinación del factor de cemento HS y cantidad de vidrio según criterios de uso.
- 7) Determinación de las incidencias más adecuadas de los agregados para la consideración del uso de vidrio en la mezcla de concreto.
- 8) Cuantificación del volumen absoluto de la pasta.
- 9) Cuantificación del volumen del agregado.
- 10) Cuantificación del volumen absoluto del agregado fino y agregado grueso.
- 11) Cuantificación del peso seco del agregado fino y agregado grueso.
- 12) Determinación de los valores de diseño del cemento, agua aire agregados finos, agregado gruesos, vidrio y aditivo.
- 13) Corrección de los valores de diseño por humedad del agregado.
- 14) Determinación de la proporción en peso de diseño y de los pesos por tanda de muestreo.

Figura 7. Flujograma de diseño de mezcla mediante el método de módulo de fineza

2 METODOLOGÍA

2.1 Material

Para el presente trabajo de investigación, se utilizó vidrio pulverizado como adición, en porcentajes del 6%, 7%, 8% y 9% con respecto a la cantidad del cemento, con el fin de buscar llegar y/o incrementar la resistencia a la compresión en los diseños de concretos con altas resistencias al ataque por los sulfatos, $f'_c=315 \text{ kg/cm}^2$. Esto con el fin obtener mejores parámetros de durabilidad, determinar las proporciones ideales de adición de vidrio pulverizado para los diseños de mezclas que se realizaron y plantear como nueva alternativa de uso en el concreto al vidrio. En la Tabla 11, se resume los materiales a utilizar y sus características principales.

Tabla 11
Materiales de la investigación

Material	Característica
Cemento HS Inka	Con escoria de alto horno
Agregado fino	Módulo de fineza 2.42
Agregado grueso	Tamaño máximo nominal ½"
Aditivo superplastificante	Policarboxilato
Vidrio pulverizado	Sodo-cálcico
Agua	

2.1.1 Población

En la investigación, los análisis e interpretación de resultados tienen como objeto de estudio a las probetas cilíndricas de 4 por 8 pulgadas de concreto con cemento HS (alta resistencia al ataque por sulfatos), sin adición de vidrio y con adiciones de vidrio en porcentajes de 6%, 7%, 8% y 9% con respecto a la cantidad de cemento utilizado.

Para la delimitación de la investigación para la población se tuvo en cuenta las siguientes:

- Adición respecto al cemento: vidrio pulverizado
- Delimitación espacial: diseños de mezcla realizados en Lima

- Delimitación temporal: diseños de mezcla realizados entre los meses de enero y febrero

2.1.2 Muestra

En cuanto al muestreo de la investigación se elaboró un total de 105 probetas, tal y como se muestra en la Tabla 12. Fueron realizadas en grupo de 12 y 9 probetas por mezcla para el ensayo de resistencia a compresión y las pruebas de ataque por sulfatos respectivamente; a 7, 28 y 90 días.

Tabla 12
Detalle de cantidad de probetas utilizadas

Ensayo/Prueba	Edad	HSV0	HSV6	HSV7	HSV8	HSV9
Resistencia a la compresión	7 días	4	4	4	4	4
	28 días	4	4	4	4	4
	90 días	4	4	4	4	4
Ataque por sulfatos	7 días	3	3	3	3	3
	28 días	3	3	3	3	3
	90 días	3	3	3	3	3

Cabe resaltar que, según las dimensiones de los moldes de las probetas, la norma de Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-05) menciona que la cantidad mínima de probetas para moldes de 4 por 8 pulgadas debe ser al menos de 3 probetas, por lo que la selección de 4 probetas por ensayo y tiempo estaría dentro del margen permitido.

2.2 Método

2.2.1 Nivel de investigación

El nivel de investigación del presente trabajo es EXPLICATIVO, es decir, se buscó la razón de los hechos con el fin de hallar relaciones causa-efecto. Esto debido a que se maneja la variable “variación en la dosificación” (diseños de mezcla con 0%, 6%, 7%, 8% y 9% de vidrio), con la que se buscó una relación entre la cantidad de vidrio incoloro pulverizado como adición al concreto, la resistencia a la compresión del concreto, la resistencia al ataque por sulfatos y si su aplicación genera una reducción impacto ambiental.

2.2.2 Diseño de investigación

Para la investigación se adoptó una estrategia EXPERIMENTAL, debido a que se requirió una manipulación directa de las variables independientes y medir la variable dependiente. Además, se llevó a cabo una descripción al problema y su respectiva respuesta, siendo descritos y resueltos mediante pruebas y grupos de control. Para ello se consideró la recolección de datos con probetas de concreto y su puesta a prueba en laboratorio, con la finalidad de observar las características que pueden ser modificadas del concreto al añadir el material reciclado, que para la investigación fue el vidrio.

En forma resumida el diseño de la investigación se llevó a cabo como se presenta en la Tabla 13, considerando los siguientes puntos:

- Grupo de control (GC): muestras sin tratamientos algunos, el cual estuvo compuesto por las 21 probetas de concreto HS patrón.
- Grupo experimental (GE): muestras con tratamientos, el cual estuvo compuesta por las 84 probetas de concreto HS con adiciones de vidrio pulverizado en diferentes porcentajes.

- Grupo de posprueba (O): medición y análisis de la variable dependiente, el cual serán los resultados de las pruebas de resistencias a la compresión, la resistencia al ataque por sulfatos y la estimación del impacto ambiental de los concretos.

Tabla 13
Elementos del diseño de investigación

GRUPOS		VARIABLE DEPENDIENTE		POSPRUEBA	
GE ₁	Probetas de concreto HSV6 preparadas con adiciones de vidrio pulverizado.	X ₁	Residuo de vidrio pulverizado añadido en un 6% al diseño del concreto HS.	O ₁	Variación de la resistencia a la compresión del concreto de $f'_c=315$ kg/cm ² , la variación de las dimensiones y de la resistencia a la compresión de las probetas de 4x8” tras su exposición a la solución de sulfatos.
GE ₂	Probetas de concreto HSV7 preparadas con adiciones de vidrio pulverizado.	X ₂	Residuo de vidrio pulverizado añadido en un 7% al diseño del concreto HS.	O ₂	
GE ₃	Probetas de concreto HSV8 preparadas con adiciones de vidrio pulverizado.	X ₃	Residuo de vidrio pulverizado añadido en un 8% al diseño del concreto HS.	O ₃	
GE ₄	Probetas de concreto HSV9 preparadas con adiciones de vidrio pulverizado.	X ₄	Residuo de vidrio pulverizado añadido en un 9% al diseño del concreto HS.	O ₄	
GC	Probetas de concreto HS.	-	Residuo de vidrio pulverizado no adicionado al diseño del concreto HS.	O ₅	

2.2.3 Variables de estudio y operacionalización

Tabla 14

Matriz de operacionalización de las variables de la investigación

Variable	Dimensión	Indicador	Unidad	Instrumento
Independiente (VI) X: Uso del vidrio en el sector construcción	X1: Resistencia a la compresión	Los valores de f'_c deben ser igual o mayores que el patrón al adicionar vidrio	kg/cm ²	Experimento
	X2: Ataque por sulfatos	Los valores de f'_c frente a la exposición de ataque por sulfatos deben ser igual o mayores al adicionar vidrio	kg/cm ²	Experimento
	X3: Precio	El precio para elaborar 1 m ³ de concreto con adición de vidrio debe ser menor o igual para un mismo f'_c	S/./m ³	Comparación
Dependiente (VD) Y: Reducción del impacto ambiental por residuos sólidos de vidrio	Y1: CO ₂	La emisión de CO ₂ al pulverizar el vidrio debe ser menor que al reutilizarla dentro de la producción de vidrio	g	Comparación
	Y2: kcal	La cantidad de energía para pulverizar el vidrio debe ser menor que al reutilizarla dentro de la producción de vidrio	J	Comparación

2.2.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

En la investigación se consideró la siguiente técnica y los siguientes instrumentos para la toma y ejecución del muestreo experimental:

- Técnica: al ser una investigación de estrategia EXPERIMENTAL se tuvo como técnica la observación y el contacto con las muestras observadas.

- Instrumentos: estos fueron los aparatos de medición para establecer los cambios del concreto en estado endurecido tras haber sido expuestos a los ensayos de resistencia a la compresión y la resistencia por ataques de sulfatos.

2.2.5 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Para obtener puntos de comparación en la investigación con respecto a los cambios del concreto con las adiciones de vidrio pulverizado, en porcentajes del 6%, 7%, 8% y 9%, para una resistencia de 315 kg/cm² se plantearon los siguientes procesos:

- 1) Se identificó las restricciones y evaluación de criterios para los materiales siguiendo las normas peruanas y guías relacionadas.
- 2) Se adquirió las materias primas del concreto HS con y sin adiciones de vidrio: cemento HS, arena gruesa, piedra chancada, agua, aditivo y vidrio.
- 3) Se realizó la pulverización y el almacenamiento del vidrio.
- 4) Se ensayó los agregados según la NTP de agregados y así obtener los valores necesarios para el diseño del concreto.
- 5) Se realizó el diseño de mezclas del concreto patrón y el diseño de mezclas del concreto con 6%, 7%, 8% y 9% de vidrio siguiendo el método del módulo de fineza.
- 6) Se realizó la mezcla siguiendo el protocolo con las cantidades calculadas.
- 7) Tras obtener una mezcla uniforme se realizó el ensayo con el Cono de Abrams para medir el asentamiento.
- 8) Se elaboró las probetas de 4"x8" del concreto patrón y el concreto con adiciones de vidrio pulverizado en dos capas.
- 9) Una vez pasados 24 horas, se desencofró las probetas de concreto y se pusieron a curar en las cámaras de curado y a otro grupo se expuso a la solución de sulfato de magnesio con agua.
- 10) Respectivamente a los 7, 28 y 90 días se retiraron de la cámara de curado para secarlos y realizar los ensayos correspondientes.

11) Se tabularon los datos y se realizaron los cálculos de dispersión.

Para el análisis de cada proceso de la investigación se consideró lo siguiente:

- Para los ensayos realizados a los agregados se analizó según granulometría, contenido de humedad, desgaste a la abrasión, pasante de malla N°200, peso unitario, peso específico y absorción. Se llevó a cabo los cálculos respectivos para obtener cada uno de los valores mencionados.
- En el caso del vidrio se realizó su pulverizado con el molino de minerales hasta conseguir tamaños de partículas de aproximadamente 45 μm diámetro. A su vez se caracterizó el vidrio mediante su Blaine y la cantidad de material pasante la malla N° 325.
- Para los ensayos del concreto fresco, se analizó los datos según las interpretaciones de los valores obtenidos y las estimaciones según los límites establecidos por las normativas peruanas y extranjeras.
- Para los ensayos del concreto endurecido, los cuales fueron de resistencia a la compresión y resistencia al ataque por sulfatos, se analizó según hojas de cálculo de cada tipo de ensayo.
- En cuanto a la resistencia a la compresión se determinó la deformación y el esfuerzo producido por las cargas ultimas de los ensayos y a su vez la resistencia a la compresión de cada muestra y la resistencia promedio para cada tipo de mezcla

2.3 Procedimiento

2.3.1 Procesamiento de vidrio

En cuanto el procesamiento del vidrio, este fue considerado para su uso como adición en porcentajes respecto a la cantidad de cemento utilizado por lo que debía cumplir con los requerimientos de la NTP 334.045 referente a la finura del cemento para la elaboración de concretos. Para la investigación, se llevó a cabo la recolección del vidrio que fue proporcionado por la empresa Vidriería Alejo e Hijos S.R.L.

Una vez obtenida una cantidad de 30 kg (ver Figura 8) para los ensayos se procedió a trasladar el material a las instalaciones de la empresa patrocinadora Caliza Cementos Inca S.A. para su pulverización y almacenamiento.

Figura 8. Vidrio sodo-cálcico sin procesar

Para la pulverización del vidrio dado que los trozos de vidrio se encontraban libres de cualquier tipo de impurezas, fueron llevados a la maquina encargada de su pulverización. El molino de minerales, mostrada en la Figura 9, se encargó de minimizar las partículas del vidrio hasta tamaños de aproximadamente 45 μm diámetro.

Figura 9. Molino de minerales

El proceso llevado a cabo para poder obtener un material fino por parte del molino de minerales fue el siguiente:

- 1) Reducción del tamaño de vidrio a aproximadamente 1" para facilitar el pulverizado.
- 2) Introducción de 500 gramos al molino cargada con rodamientos de acero.
- 3) Pulverizado de vidrio durante 30 minutos aproximadamente para obtener el diámetro deseado.
- 4) Recolección del vidrio pulverizado (ver Figura 10).

Figura 10. Vidrio pulverizado (diámetro 45 μm)

2.3.2 Caracterización de materiales

2.3.2.1 Análisis físico y químico del cemento

El cemento HS utilizado para la investigación está elaborado a base de clínquer y escoria de alto horno. La escoria de alto horno es un subproducto de la industria de refinamiento del hierro, formada del producto del enfriamiento brusco de la masa no metálica contenida en un alto horno. Estas partículas de escoria, al ser complementadas con una molienda extrafina junto con el cemento, minimizan las posibilidades del ingreso de partículas agresoras, tales como sulfatos de sodio (NaSO_4), sulfato de amonio (NH_4SO_4), sulfato de magnesio (MgSO_4), sulfato de calcio (CaSO_4), etc., que afectan la durabilidad del concreto.

Para la investigación, como se utilizó un cemento adicionado con características particulares, estas deben cumplir con los requerimientos físicos que estipula la NTP 334.082. En cuanto a la composición química, este tipo de cemento no es regida, ni restringida bajo ninguna norma, pero se detallará su composición en el ANEXO 1 ANALISIS FISICO Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO, donde también se mostrarán los resultados de sus ensayos físicos

2.3.2.2 Análisis granulométrico del agregado grueso y fino

Los ensayos de granulometría sirven para conocer la distribución del tamaño partículas de cada tipo de agregado (fino y grueso), los módulos de fineza, los tamaños máximos de cada tipo de agregado y si estos se encuentran dentro de los límites permisibles de uso según el contenido de las muestras seleccionadas. La realización del ensayo se da mediante tamices que se encargan de retener el material del agregado según su tamaño y permitirán conocer la ubicación de las curvas granulométricas de cada material.

Los instrumentos necesarios para el ensayo granulométrico son:

- Tamices
- Recipientes
- Cepillo de acero
- Balanza

El procedimiento para el análisis granulométrico fue el siguiente:

- 1) Se extrajo una muestra representativa de agregado y se pesó.
- 2) Se ordenó los tamices de forma descendiente, como se muestra en la Figura 11, con los tamaños de abertura de 9.5 mm (3/8”), 4.76 mm (N°4), 2.38 mm (N°8), 1.19 mm (N°16), 0.595 mm (N°30), 0.297 mm (N°50), 0.149 mm (N°100) y fondo para el caso del agregado fino; y de abertura de 50 mm (2”), 37.5 mm (1 ½”), 25 mm (1”), 19 mm (3/4”), 12.5 mm (1/2”), 9.5 mm (3/8”), 4.76 mm (N°4) y fondo para el agregado grueso.

- 3) Se procedió a verter la muestra por la parte superior del compilado de tamices y se realizaron los movimientos necesarios para que el material se distribuya por cada de los tamices y llegue al fondo del compilado.
- 4) Terminado el movimiento de los tamices se verificó y pesó las muestras retenidas en cada malla.
- 5) Posteriormente, se realizó el cálculo de los porcentajes retenidos, acumulados y porcentajes del material que pasaba en cada tamiz.
- 6) Se verifico que la suma de los pesos del material retenido de cada tamiz fuese igual a la cantidad material inicial para que así se corrobore la nulidad de perdida de material y en caso contrario se realice la corrección necesaria.
- 7) Se realizó el grafico de la curva granulométrica, el cálculo del módulo de fineza y la identificación del tamaño máximo y tamaño máximo nominal para cada agregado.

Figura 11. Serie de mallas y muestra para análisis granulométrico de agregado grueso

Según los resultados mostrados en el ANEXO 2
ANALISIS GRANULOMETRICO:

- El agregado fino tiene un módulo de fineza de 2.42; y el agregado grueso, 6.62.
- El agregado fino tiene un tamaño máximo nominal de N°4; y el agregado grueso, 1/2".
- Ambas curvas granulométricas están dentro de los límites establecidos por la norma.

2.3.2.3 Peso unitario suelto y compactado

Se realizó los ensayos de pesos unitarios con el fin de determinar el peso de la masa del agregado estado suelto y compactado en un volumen determinado.

Los instrumentos necesarios para el ensayo de peso unitario fueron los siguientes:

- Balanza
- Varilla lisa de punta redondeada
- Molde de compactado

Figura 12. Moldes rellenos para ensayos de peso unitario

El procedimiento utilizado para el ensayo de peso unitario suelto fue el siguiente:

- 1) Se tomó las dimensiones del recipiente en cuanto a las medidas interiores de diámetro y alto.
- 2) Se pesó el molde totalmente vacío.
- 3) Se colocó el agregado a una altura aproximadamente de 50 mm
- 4) Se llenó el recipiente hasta sobrepasar ligeramente el tope del molde para luego enrasar con la varilla y retirar el exceso de agregado.
- 5) Se pesó el molde con el agregado y se registraron los datos como en la Figura 12.

El procedimiento utilizado para el ensayo de peso unitario compactado fue el siguiente:

- 1) Se pesó el molde totalmente vacío y se registró el valor obtenido.
- 2) Se colocó el agregado en 3 capas aproximadas a una altura aproximadamente de 50 mm.
- 3) Tras llenada cada capa se realizaron 25 golpes con la varilla lisa de punta redondeada.
- 4) Se llenó el recipiente hasta sobrepasar ligeramente el tope del molde para luego que se dieron los 25 golpes de la última capa se enrasó con la varilla y se retiró el exceso de agregado según lo mencionado en la NTP 400.017.
- 5) Se pesó el molde con el agregado y se registraron los datos.

Según los resultados mostrados en el ANEXO 3
PESO UNITARIO SUELTO Y COMPACTADO:

- Los pesos unitarios suelto y compactado del agregado fino son de 1426.15 kg/cm^3 y 1669.26 kg/cm^3 respectivamente.
- Los pesos unitarios suelto y compactado del agregado grueso son de 1987.38 kg/cm^3 y 2146.45 kg/cm^3 respectivamente.

2.3.2.4 Peso específico del agregado grueso y fino

Se realizó los ensayos de peso específico con el fin de determinar, en gran parte, si el agregado se encuentra con la calidad necesaria para ser utilizado en el diseño de mezcla del concreto. Este ensayo tiene como indicadores la condición húmeda y la condición seca, las cuales nos permiten saber si el agregado efectivamente presenta mayor cantidad de absorción para valores bajos de peso específico y para altos valores del peso específico nos presenta un mejor comportamiento del agregado.

Los instrumentos necesarios para el ensayo de peso unitario fueron los siguientes:

- Balanza
- Fiola de 500ml
- Estufa
- Cesta de malla de alambre
- Molde cónico metálico
- Barra compactadora
- Embudo
- Agua destilada

El procedimiento utilizado para el ensayo de peso específico del agregado fino, según la NTP 400.022, fue el siguiente:

- 1) Se dejó el material fino reposar en agua durante 24 horas.
- 2) Terminadas las 24 horas se extendió sobre un recipiente y se dejó secar a temperatura ambiente.
- 3) Una vez secado el material superficialmente, se llenó completamente el molde cónico y mediante 25 golpes suaves de la barra compactadora se comprimió el material para posteriormente enrasar.
- 4) Una vez enrasado se retiró el molde cónico verticalmente para observar el comportamiento del material fino.
- 5) Se observó que el material presentaba desmoronamiento en sus extremos y en la parte central mantenía su forma cónica indicando que el material presentaba una condición de superficialmente seco.
- 6) Se pesó la fiola de 500 ml vació y con agua para poder conocer las características del contenedor.
- 7) Se introdujo 500 g del material fino seco superficialmente dentro de la fiola y se relleno con agua hasta la marca de 50 cm³ de la fiola.
- 8) Mediante movimientos rotatorios y sacudidas a la fiola se eliminó las burbujas de aire para deshacerse del contenido de aire atrapado.
- 9) Se volvió a llenar con agua para completar los 500 cm³ de la fiola y se pesó para determinar el peso de la fiola más el material fino superficialmente seco y más el agua.

- 10) Se retiró todo el material fino superficialmente seco de la fiola con cuidado de no perder nada de material y se colocó en un recipiente para ser llevado al horno.
- 11) Se dejó durante 24 horas aproximadamente para luego dejarse enfriar y volver a pesar descontando el peso del recipiente, registrando cada dato para su evaluación.

El procedimiento utilizado para el ensayo de peso específico del agregado grueso, según la NTP 400.021, fue el siguiente:

- 1) Se dejó el material grueso reposar en agua durante 24 horas.
- 2) Terminadas las 24 horas se extendió sobre un recipiente y se secó manualmente todo el material grueso, removiendo las capas de agua superiores.
- 3) Se pesó el material grueso aparentemente seco, se pesó el cesto de mallas de alambre y por último se pesó el material aparentemente seco dentro de la cesta sumergidos en agua.
- 4) Se retiró todo el material grueso superficialmente seco de la cesta de malla de alambre y con cuidado de no perder nada de material se colocó en un recipiente para ser llevado al horno.
- 5) Se dejó durante 24 horas aproximadamente para luego dejarse enfriar y volver a pesar descontando el peso del recipiente, registrando cada dato para su evaluación.

Según los resultados mostrados en el ANEXO 4
PESO ESPECIFICO Y ABSORCION:

- El agregado fino tiene un peso específico es de 2659 kg/cm^3 ; y el agregado grueso, 2654 kg/cm^3 .
- El agregado fino tiene un porcentaje de absorción de 0.402%; y el agregado grueso, 0.685%.

2.3.2.5 Material que pasa la malla N°200

Este ensayo se realizó para el agregado fino y grueso con el fin de determinar las partículas más finas que la malla N°200. Se utilizó el procedimiento A establecido en la NTP 400.018.

Los instrumentos necesarios para el ensayo fueron los siguientes:

- Tamiz N°200
- Recipientes
- Balanza
- Horno

El procedimiento realizado para el ensayo fue el siguiente:

- 1) Se colocó la muestra en un recipiente y se pesa la muestra (P1).
- 2) Se llenó el recipiente con agua y se procede a lavar la muestra al revolver el material con movimientos circulares y laterales, teniendo cuidado de no triturar las partículas.
- 3) Se vació el agua del recipiente haciéndola pasar por el tamiz N°200, con el fin de no perder material. Se repite el proceso hasta que el agua de lavado esté clara.
- 4) Se limpió cuidadosamente el tamiz con agua, devolviendo el material al recipiente.
- 5) Se colocó el recipiente en el horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta peso constante.
- 6) Se pesó la muestra seca (P2) y se calcula los valores P1-P2 y A.

Según los resultados mostrados en el ANEXO 5
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 200:

- El agregado fino tiene un porcentaje pasante de malla N°200 de 3%; y el agregado grueso, 0.65%.

2.3.2.6 Contenido de humedad del agregado grueso y fino

Se realizó este ensayo con el fin de determinar el porcentaje total de humedad evaporable, que incluye la humedad superficial y la contenida en los poros.

Los instrumentos necesarios para el ensayo fueron los siguientes:

- Balanza
- Recipiente
- Horno

El procedimiento realizado para el ensayo fue el siguiente:

- 1) Se pesó muestras representativas tanto del agregado fino y agregado grueso, aproximadamente 500 g para la arena gruesa y 5 kg para la piedra chancada.
- 2) Se dejó la muestra procesar en los hornos durante aproximadamente 24 horas.
- 3) Se tomó el peso de la muestra seca y se comparó con la muestra a la intemperie para obtener el contenido de humedad.

Según los resultados mostrados en el ANEXO 6
CONTENIDO DE HUMEDAD:

- El agregado fino tiene un contenido de humedad de 0.604%; y el agregado grueso, 0.18%.

2.3.2.7 Método de Abrasión

Se realizó este ensayo con el fin de determinar la resistencia a la degradación de los agregados gruesos mediante el uso de la máquina de Los Ángeles (ver Figura 13). Los valores

de desgaste producido por el impacto y rozamiento de la muestra con la carga sirven como un indicador de calidad referencial.

Figura 13. Máquina de Los Ángeles

Los instrumentos necesarios para el ensayo fueron los siguientes:

- Máquina Los Ángeles
- Tamices
- Balanza
- Carga (esferas de acero)

El procedimiento realizado para el ensayo fue el siguiente:

- 1) Se lavó y secó la muestra a una temperatura constante de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 2) Dependiendo del tipo de gradación (A, B, C o D), se escogió la cantidad de la muestra y se recombino los pesos para cumplir con el análisis granulométrico establecido en la norma.
- 3) Se pesó la muestra inicial y se escogió el número de esferas dependiendo de la gradación.
- 4) Se colocó la muestra junto con las esferas en la máquina y se rotó a una velocidad de 30 rpm por 500 revoluciones.
- 5) Se pasó la muestra por el tamiz N° 12 (1.70mm) y el material retenido se puso al horno a una temperatura constante de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- Embudo
- Papel filtro
- Cedula de permeabilidad
- Permeabilímetro de Blaine
- Disco perforado
- Embolo

El procedimiento realizado para el ensayo fue el siguiente:

- 1) Se pesó una cantidad de 10 g para el vidrio pulverizado.
- 2) Se colocó el disco perforado en el reborde de la cédula de permeabilidad. Se pone un disco de papel de filtro sobre el disco perforado y se presiona con una varilla de longitud ligeramente menor que el diámetro de la cámara
- 3) Se colocó, con ayuda del embudo, el material ya pesado en la cédula de permeabilidad y se coloca un disco de papel de filtro sobre el material. Se baja el émbolo hasta que su reborde toque el extremo superior de la cédula.
- 4) Se conectó la cédula de permeabilidad con el manómetro cerciorándose que haya una conexión hermética y cuidando que la capa de cemento no se altere.
- 5) Se ejerció presión hasta que el líquido contenido en el brazo del manómetro alcance la marca más alta y luego se cierra herméticamente la válvula.
- 6) Se tomó el tiempo desde el momento en que el menisco del líquido llegue a la segunda marca y se detiene en el momento en que el menisco llegue a la tercera marca.
- 7) Se anotó el intervalo de tiempo transcurrido en el cronómetro y se corrobora el Blaine en la tabla de datos.

Según los resultados mostrados en el ANEXO 8
FINURA EXPRESADA POR LA SUPERFICIE ESPECIFICA (BLAINE)

- El Blaine obtenido a 22 segundos según la finura para el vidrio pulverizado fue de $1956 \text{ cm}^2/\text{g}$.

2.3.2.9 Material que pasa la malla N°325 (vidrio)

Al igual que el Blaine, este ensayo se realizó para la caracterización del vidrio pulverizado con el fin de determinar las partículas más finas que la malla N°325. Se utilizó el procedimiento establecido en la NTP 334.045 con la diferencia de que para el ensayo se utilizó la máquina analizadora de presión negativa (ver Figura 15)

Figura 15. Máquina de presión negativa

Los instrumentos necesarios para el ensayo de finura fueron los siguientes:

- Balanza
- Máquina de presión negativa
- Tamiz N°325
- Varilla metálica

El procedimiento realizado para el ensayo fue el siguiente:

- 1) Se pesó una cantidad exacta de 10 gramos para el vidrio pulverizado.
- 2) Se colocó el tamiz N°325 sobre la máquina de presión negativa y luego se vertió el material pesado sobre el tamiz.
- 3) Se encendió la máquina y se dejó procesar por 120 segundos, en los cuales se daban pequeños golpes al tamiz para evitar el cumulo de material.

- 4) Se volvió a pesar el material retenido y se calculó el porcentaje de material pasante de la malla N°325.

Según los resultados mostrados en el ANEXO 9
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 325:

- El vidrio pulverizado tiene un porcentaje pasante de malla N°325 de 61.3%.

2.3.3 Diseño de mezcla

Una vez realizado los ensayos para los agregados se procedió a realizar las dosificaciones del cemento, agua, agregado fino, agregado grueso y vidrio siguiendo el procedimiento desarrollado por el método del módulo de fineza explicado anteriormente en el acápite 1.5.

- 1) Se comienza por establecer el f'_{cr} de 399 kg/cm². Además, se escogerá un slump de 4 pulgadas a la propuesta de uso del concreto.
- 2) Se determinó la cantidad de aire atrapado para un concreto sin aire incorporado, siendo este 2.5%, y la cantidad de material cementante de 332 kg/m³.
- 3) Se establece una relación a/c, en este caso será de 0.50 como se mencionó en el acápite 1.1.3. Además, se calcula una cantidad de agua de 166 L/m³.
- 4) Se procedió a calcular el volumen absoluto de la pasta, multiplicando las cantidades de cemento, agua y aire por sus pesos específicos, obteniéndose los valores de 0.1068 m³, 0.1660 m³ y 0.0250 m³ respectivamente para cada material.
- 5) Se calcula el volumen absoluto de los agregados al restar la suma de los volúmenes del cemento, agua y aire a la unidad, siendo 0.702 m³.

- 6) Se calcula el volumen del agregado fino y del agregado grueso, utilizando porcentajes de 47% y 53% y obteniendo valores de 0.3301 m^3 y 0.3722 m^3 respectivamente. Estos valores se multiplican por su peso específico obteniendo 878 kg/m^3 para el agregado fino y 988 kg/m^3 para el agregado grueso.
- 7) El siguiente paso es corregir los pesos de los agregados por su contenido de humedad y el aporte de agua a la mezcla dependiendo de su porcentaje de absorción y contenido de humedad. Es así como los nuevos pesos son 883 kg/m^3 para el agregado fino, 990 kg/m^3 para el agregado grueso y 169 litros de agua/ m^3 .
- 8) Se calcula la cantidad de aditivo superplastificante con respecto al peso del cemento. Se consideró como 1.5%.
- 9) Se calcula la cantidad de vidrio pulverizado con respecto al peso del cemento dependiendo del tipo de concreto a realizar.

2.3.4 Elaboración y curado de probetas

En la elaboración de las probetas se tomaron en cuenta las consideraciones establecidas por la NTP 339.183 para el mezclado, muestreo y elaboración de especímenes en laboratorio bajo un control riguroso de los materiales y condiciones de ensayo, debido a que cualquier irregularidad podría generar alteraciones en los resultados finales.

Como antelación a la realización de las probetas se tuvo que seguir una secuencia de mezcla para garantizar la optimación de los materiales, dicha secuencia se muestra en la Figura 16.

Una vez fraguadas las probetas de concreto se procedía a hidratarlas mediante el curado, esto con la finalidad de mantener al concreto lo más saturado de agua posible para que así los espacios que al inicio estaban saturados de agua se llenen con los productos de hidratación del cemento (Jurado S. & Niño H., 2010).

Figura 16. Flujograma de la secuencia de elaboración de la mezcla

El curado de las probetas se llevó a cabo según lo estipulado en la NTP 339.183 con la finalidad de mantener los protocolos establecidos y evitar variaciones en los resultados finales, como se observa en la Figura 17.

Figura 17. Probetas de concreto curadas en agua

Para el caso de las probetas expuestas en la solución de sulfatos de magnesio, ver Figura 18, se tomó en cuenta los establecido en las normas ASTM C1012, para ello se detallará su uso en el acápite 2.3.5.3.

Figura 18. Probetas de concreto curadas en solución de sulfato de magnesio

2.3.5 Ensayos de concreto

2.3.5.1 Asentamiento

Como se mencionó en el acápite 1.2.4.1, el asentamiento del concreto en estado fresco permite comprobar su nivel de fluidez y que tan trabajable puede llegar a ser. En cuanto al

ensayo se tomó en consideración lo estipulado en la NTP 339.035, por lo que se realizaron los siguientes procedimientos

- 1) Se humedeció el cono de Abrams y la bandeja evitando el escurrimiento de agua.
- 2) Se aseguró el cono pisándolo por ambos lados, para proceder a llenar el cono en 3 capas, cada capa se apisonó con 25 golpes uniformes y en forma de espiral hacia el centro.
- 3) Una vez completadas las capas se enrasó el cono con la ayuda de la varilla compactadora y se eliminó el exceso. Seguidamente se procedió a levantar el cono de forma vertical para lo cual se contabilizó 5 segundos hasta tener el cono completamente levantado.
- 4) Por último, se procedió a medir inmediatamente la diferencia entre la altura del molde y la altura del concreto fresco (slump) como se muestra en la Figura 19.

Figura 19. Medición del asentamiento del concreto ensayado

2.3.5.2 Resistencia a la compresión

En los ensayos característicos del concreto endurecido se llevó a cabo el ensayo de resistencia a la compresión para el cual se tuvo en cuenta lo estipulado en la NTP 339.034, las cuales fueron la carga en forma continua y constante, la velocidad de carga que para se mantuvo aproximadamente en 5.4 KN/s y la aplicación de carga hasta la aparición de la falla de ruptura. Para ello se utilizó una prensa hidráulica modelo STYE -3000C (ver Figura 20), la cual podía proporcionar cargas entre 0 a 3000 KN con una precisión de $\pm 1\%$. Además, la prensa hidráulica estaba vinculada con el software SuperTest V7.2 encargada de procesar la información que brindaba la máquina y gracias a eso se podía apreciar las gráficas de cargas acumuladas y los resultados finales de cada rotura.

Figura 20. Prensa hidráulica

Una vez lista la prensa hidráulica se seguía una secuencia para el proceso de secado, transporte y rotura de las probetas de concreto curadas en agua las cuales describiremos a continuación:

- 1) Se eligió las probetas a ensayar según el calendario de rotura de probetas establecido y se retiró del cuarto de curado.
- 2) Se secó manualmente el exceso de agua y se dejó a la intemperie durante 3 horas para que se evaporase el agua en el interior de los microporos de las probetas.
- 3) Una vez transcurrido el tiempo las probetas se transportaron cuidadosamente al laboratorio de ensayos, evitando golpes entre ellas y su resquebrajamiento.
- 4) Se utilizó los cabezales en los extremos de las probetas para uniformizar las superficies laterales y colocarlas dentro de la prensa hidráulica.
- 5) Una vez colocado dentro de la prensa hidráulica se aseguró la rejilla protectora y se inició el proceso de compresión.
- 6) Se esperó hasta que la prensa hidráulica detecte el punto de vacío indicado al momento de la rotura de la probeta (carga máxima soportada)
- 7) Tras la rotura de la probeta se limpió el área donde se encontraba, se cambiaban de sentido los cabezales para las siguientes probetas y se repitió el proceso desde el punto 4.
- 8) Una vez se terminó de romper los grupos de probetas se anotaban los valores obtenidos de cada probeta y del promedio por grupo.

2.3.5.3 Prueba de ataque por sulfatos

Dentro de los ensayos característicos de durabilidad se consideró el ensayo de exposición a agentes agresivos de sulfato, para ello se tomó en consideración la ASTM C1012. Al igual que las probetas curadas en agua, estas se mantuvieron expuestas a periodos de 7, 28 y 90 días con la particularidad que el líquido donde se encontraban era una solución de sulfato de magnesio ($MgSO_4$), en proporciones de 50 g por cada 900 ml de agua. Esas cantidades se usaron para simular el agua de mar y por consiguiente el ataque por sulfatos en el concreto. Con este ensayo se pudo observar las consecuencias tanto físicas como químicas que generaban los sulfatos en el concreto.

3 RESULTADOS

3.1 Objetivo 01 - Diseño de mezclas

En la Tabla 15, se puede observar los resultados de los diseño de mezcla mediante módulo de fineza explicados en el acápite 1.5 y 2.3.3.

Tabla 15
Resumen de diseño de mezclas elaborados

Material	Unidad	HSV0	HSV6	HSV7	HSV8	HSV9
Cemento	kg	332	332	332	332	332
Agregado fino	kg	883	883	883	883	883
Vidrio	g	0	19.92	23.24	26.56	29.88
Agregado grueso	kg	990	990	990	990	990
Agua	L	169	169	169	169	169
Aditivo (1.5%)	kg	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98

Una vez obtenido los diseños se calcula la cantidad aproximada de materiales a utilizar para poder realizar las 105 probetas de 4"x8" establecidas en el acápite 2.1.2.

Tabla 16
Resumen de cantidad de materiales utilizados

Material	Unidad	HSV0	HSV6	HSV7	HSV8	HSV9	Total
Cemento	kg	13.94	13.94	13.94	13.94	13.94	69.70
Agregado fino	kg	37.08	37.08	37.08	37.08	37.08	185.40
Vidrio	g	0.00	836.64	976.08	1115.52	1254.96	4183.20
Agregado grueso	kg	41.56	41.56	41.56	41.56	41.56	207.80
Agua	L	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	35.55
Aditivo (1.5%)	g	209.16	209.16	209.16	209.16	209.16	1045.80

3.2 Objetivo 02 – Asentamiento

En la Tabla 17, se puede observar los resultados del ensayo de asentamiento con el cono de Abrams explicado en el acápite 2.3.5.1. Además, se realizó también toma de data de la temperatura, según la NTP 339.184, debido a su correlación con la consistencia.

Tabla 17
Resultados de ensayo de asentamiento y temperatura

Tipo de concreto	Temperatura del concreto (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Slump (mm)	Consistencia
HSV0	29.3	27.4	60	Media
HSV6	30.1	28.3	170	Muy húmeda
HSV7	26.9	25.6	160	Muy húmeda
HSV8	28.0	26.2	165	Muy húmeda
HSV9	30.5	28.7	190	Muy húmeda

Al comparar los resultados, de una consistencia media del concreto patrón, se llega a tener mezclas de consistencias muy húmeda gracias a la adición de vidrio pulverizado, siendo 120 mm (217%) el aumento máximo hallado para el concreto tipo HSV9. Este incremento puede ser atribuido al hecho de que para mantener la relación a/c de 0.5 de la mezcla conforme crece el porcentaje de adición de vidrio pulverizado, se debe añadir mayor agua.

3.3 Objetivo 03 - Resistencia a la compresión

En la Tabla 18, se puede observar los valores de f'_c en MPa de las 60 probetas ensayadas.

Tabla 18
Resultados de valores de f'_c (MPa) de los ensayos de resistencia a la compresión

Tipo	Días	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Promedio
HSV0	7	43.6	44.0	43.2	43.8	43.5
	28	46.0	49.3	47.3	47.7	47.6

	90	49.8	50.3	51.0	50.0	50.3
	7	40.2	43.2	39.9	41.4	41.2
HSV6	28	51.9	54.1	55.6	53.4	53.8
	90	58.9	61.2	60.6	58.8	59.9
	7	40.1	38.6	43.4	43.4	41.4
HSV7	28	51.9	54.1	55.6	53.4	53.8
	90	60.5	60.0	61.4	58.8	60.2
	7	42.5	41.4	41.1	41.8	41.7
HSV8	28	52.4	54.2	53.6	54.9	53.8
	90	59.6	57.6	59.3	57.6	58.5
	7	46.6	46.2	45.6	45.1	45.9
HSV9	28	55.5	51.0	52.2	57.0	53.9
	90	62.9	61.8	63.3	60.6	62.2

En la Figura 21 se muestra los valores promedio de f'_c para los distintos tipos de concreto, haciéndose visible una tendencia lineal.

Figura 21. Valores promedio de f'_c de probetas según porcentaje de vidrio

Se hace claro al ver la Figura 22 que a medida que se va aumentando el porcentaje de contenido de vidrio pulverizado se eleva a resistencia de las probetas de concreto. Este incremento se da gracias al aumento de sílice como parte del óxido de silicio que aporta el vidrio pulverizado a la mezcla de concreto. Esta adición ayuda en la formación de los

silicatos encargados de brindar la resistencia a lo largo de la vida útil de la estructura o elemento de concreto, que para el caso de estudio serían las probetas realizadas y ensayadas en los hitos de tiempo de 7, 28 y 90 días. Los silicatos formados, como el silicato dicálcico y el silicato tricálcico, una vez hidratados para la creación del concreto contribuyen grandemente para el aumento de resistencia en edades por encima de los 7 días.

Figura 22. Comparación de desarrollo de f'_c según porcentaje de vidrio respecto al tiempo

Otro aspecto interesante es que se observa en la Tabla 19 que en los primeros 7 días los concretos con adición de vidrio presentan una menor resistencia a la compresión que el concreto patrón. Esto es debido que al existir una mayor concentración de silicatos en el concreto el tiempo de fraguado inicial se incrementa retardando la obtención de resistencias a la compresión en edades menores a 7 días.

Tabla 19
Variación de los valores de f'_c respecto al patrón

Tipo	7 días	28 días	90 días
HSV6	-5,7%	13,0%	19,1%
HSV7	-5,2%	13,0%	19,7%
HSV8	-4,5%	13,3%	16,4%
HSV9	5,1%	21,8%	23,6%

Tabla 20
Porcentajes de desarrollo de resistencia a 7 y 90 días

Tipo	f'_c (MPa)	7 días (%)	90 días (%)
HSV0	47,6	91,7	105,7
HSV6	53,8	76,6	111,4
HSV7	53,8	76,9	111,9
HSV8	53,9	77,3	108,5
HSV9	58,0	79,2	107,2

Además, en la Tabla 20 se observa que a 90 días el incremento de f'_c sigue siendo notable. Esto es debido a las propiedades del cemento HS y generación de silicatos tras el aumento de vidrio pulverizado.

3.4 Objetivo 04 - Pruebas de ataque por sulfatos

En la Tabla 21, se puede observar los valores de f'_c en MPa de las 45 probetas ensayadas.

Tabla 21
Resultados de valores de f'_c (MPa) de las pruebas de ataque por sulfatos

Tipo	Días	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
HSV0	7	32.3	32.1	31.5	32.0
	28	39.9	40.3	40.1	40.1
	90	44.7	46.0	46.5	45.7
HSV6	7	34.4	34.1	33.9	34.1
	28	42.0	40.9	42.9	41.9
	90	49.6	49.2	49.2	49.3
HSV7	7	36.1	37.2	36.2	36.5
	28	44.1	45.0	43.1	44.1
	90	53.3	53.5	52.8	53.2
HSV8	7	34.3	34.2	34.1	34.3
	28	43.9	43.8	42.9	43.9
	90	49.3	50.9	49.7	49.3
HSV9	7	30.0	30.9	30.2	30.4
	28	36.6	38.2	37.7	37.5
	90	41.3	45.5	43.5	43.4

En la Figura 23 se muestra los valores promedio de f'_c para los distintos tipos de concreto, haciéndose visible el punto de quiebre y su vez la comparación de los resultados con respecto al concreto patrón.

Figura 23. Valores promedio de f'_c de probetas según porcentaje de vidrio (ataque por sulfatos)

Comparando los resultados promedio y llevando a cabo un análisis comparativo se observa en la Figura 24 que la máxima resistencia a la compresión de las probetas de concreto se encuentra en la adición de 7% de vidrio pulverizado y al incrementar este porcentaje se reduce la resistencia considerablemente. Este pico de incremento de resistencia a la compresión con la adición del 7% se debe por el aumento de sílice como parte del óxido de silicio que aporta el vidrio pulverizado con respecto a la cantidad de sílice y calcio del concreto patrón. Sin embargo, si este porcentaje de vidrio pulverizado es incrementado, superando el porcentaje ideal de 7%, la resistencia a la compresión se ve reducida drásticamente. Este cambio es debido a que el aumento de la sílice frente al ambiente agresivo generado por la solución de sulfato de magnesio más el agua genera 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 en los hitos de tiempo de 7, 28 y 90 días.

Figura 24. Comparación de desarrollo de f'_c según porcentaje de vidrio respecto al tiempo (ataque por sulfatos)

Otro punto que resalta en los resultados mostrado en la Tabla 22 es la disminución de la resistencia a 28 días y su posterior incremento tras el pasar de los días. Se tiene que considerar que si se hiciera un análisis del f'_c para su uso el valor reflejado no mostraría el verdadero beneficio que proporciona el vidrio pulverizado en la mezcla de concreto, por lo que para concretos con adiciones de vidrio pulverizado los verdaderos resultados de las resistencias a la compresión deben considerarse a partir de los 90 días en adelante.

Tabla 22

Variación de los valores de f'_c respecto al patrón (ataque por sulfatos)

Tipo	7 días	28 días	90 días
HSV6	6,8%	4,6%	7,9%
HSV7	14,2%	9,9%	16,3%
HSV8	6,7%	7,1%	8,7%
HSV9	-5,0%	-6,5%	-5,0%

Además, en la Tabla 23 se observa que a 90 días el incremento de f'_c sigue siendo mayor al concreto patrón. Cabe resaltar que las probetas expuestas a la solución de sulfatos de magnesio (incremento porcentual de la resistencia a la compresión de valores entre 14% a 20.7%) a diferencia de las probetas curadas en agua (incremento porcentual de la resistencia a la compresión de valores entre 5.6% a 11.9% con respecto al concreto patrón) presentan mejores resultados con respecto la variación comparativa de las resistencias a la compresión. Esto valida que la utilización de vidrio pulverizado evita el decrecimiento y muestra una mejor respuesta frente a ambientes agresivos para el concreto.

Tabla 23

Porcentajes de desarrollo de resistencia a 7 y 90 días (ataque por sulfatos)

Tipo	f'_c (MPa)	7 días (%)	90 días (%)
HSV0	40,1	79,7	114,0
HSV6	41,9	81,4	117,6
HSV7	44,1	82,8	120,7
HSV8	42,9	79,4	115,8
HSV9	37,5	81,0	115,8

Finalmente, se presenta en la Figura 25 algunas probetas que estuvieron curadas en la solución de sulfato de magnesio durante 90 días. Se puede notar que no existe descascaramiento superficial. Teniendo en consideración lo mencionado y los resultados de f'_c se puede concluir que no existió reacción álcali-sílice para el trabajo de investigación.

Figura 25. Probetas curadas en solución de sulfato de magnesio durante 90 días

3.5 Objetivo 05 - Impacto ambiental

3.5.1 Emisión de CO₂

Para llevar a cabo un análisis ambiental se debe realizar una comparación de las emisiones de CO₂, tomando en cuenta las cantidades de cemento producidas y despachadas que influyen en la generación de este gas nocivo para el ambiente. Observamos en la Figura 26 y Figura 27 que a finales del 2018 se produjeron alrededor de 10 mil toneladas de cemento (Asociación de Productores de Cemento [ASOCEM], 2018), de las cuales para uso local (proyectos civiles en el Perú) fueron usadas 9.7 mil toneladas. Si se toma en cuenta que durante la producción de cemento al pasar por los hornos encargados de homogenizar y reducir los residuos de agua de las materias primas se producen alrededor de 800 kg de CO₂ por tonelada de cemento se concluye que anualmente se generan 7.8 mil toneladas de CO₂.

Figura 26. Producción nacional de cemento anual (2010-2018) en miles de toneladas.
Recuperado de “Reporte estadístico”, por ASOCEM, 2018.

Figura 27. Despacho nacional de cemento anual (2010-2018) en miles de toneladas.
Recuperado de “Reporte estadístico”, por ASOCEM, 2018.

Ahora, la cantidad de cemento despachado a nivel nacional abarcan tanto proyectos nacionales inmobiliarios (25%), como obras de infraestructura (75%), mostrados en la Figura 28, en donde cada uno generaría un equivalente de 2.34 mil toneladas de CO₂ y 5.85 mil toneladas de CO₂ respectivamente. Tomando en cuenta que los proyectos de infraestructura, a su vez abarcan proyectos ferroviarios, de carreteras, puertos, aeropuertos, de electrificación, agua y saneamiento, por lo que debemos tomar únicamente el porcentaje representativo para la investigación el cual pertenece a proyectos de obras portuarias.

Figura 28. Distribución en porcentaje de los diferentes tipos de construcción en el Perú del año 2018.
Recuperado de "Informe económico de la construcción", por CAPECO, 2018.

Este porcentaje de obras portuarias involucra el 30% del total de obras de desarrollo de infraestructura privada, pública y pública-privada (Autoridad Portuaria Nacional [APN], 2016), por lo que tomando en cuenta el análisis específico del proyecto, se estaría generando 1.75 mil toneladas de CO₂ en el rubro de la infraestructura portuaria.

Tabla 24.
Cantidades de CO₂ generados en la producción de cemento para distintos tipos de concreto

Descripción	HSV0	HSV6	HSV7	HSV8	HSV9
kg de CO ₂ por tonelada de cemento	1755	1674	1581	1630	1869

3.5.2 Generación de energía

En cuanto a las consideraciones del consumo de energía se debe tomar en cuenta las cantidades de cemento producidas y despachadas y las cantidades de energía que estas consumen. Para el primer caso nos remitimos a los reportes estadísticos anuales vistos en el acápite 3.5.1 de la Asociación de Productores de Cemento (ASOCEM), en donde se observa claramente que a finales del 2018 se produjeron alrededor de 10 mil toneladas de cemento, de las cuales para uso local (proyectos civiles en el Perú) fueron usadas 9.7 mil toneladas.

Si se toma en cuenta que durante la producción de cemento al pasar por los molinos y los hornos encargados de homogenizar y reducir los residuos de agua de las materias primas se producen alrededor de 218 kCal y 800 kCal por tonelada de cemento respectivamente.

Tabla 25.
Cantidades de energía consumida en la producción de cemento para distintos tipos de concreto

Descripción	HSV0	HSV6	HSV7	HSV8	HSV9
kCal generadas en los hornos de producción	1776.5	1694.8	1600.7	1650.4	1892
kCal generadas en los molinos de producción	475.8	453.9	428.7	442	506.7

Como se mencionó anteriormente, el 75% de la cantidad total de cemento es utilizado exclusivamente en el desarrollo de infraestructura (Cámara Peruana de la Construcción [CAPECO], 2018), y 30% de este valor considera los proyectos de mejora, rehabilitación y construcción de obras portuarias a nivel nacional. Este sería equivalente a 2.18 mil toneladas de cemento al año como consecuencia la energía consumidas en el proceso de producción de cemento para el tipo de proyectos el cual toma en cuenta la investigación serían de 1776.5 kCal y 475.8 kCal utilizados en los hornos y molinos respectivamente.

3.6 Objetivo 06 - Porcentaje ideal de vidrio

3.6.1 Aspecto técnico

Como se concluyó en el acápite 3.3 el porcentaje ideal de adición de vidrio resultaría 9% debido a su alta variación respecto al concreto patrón. Sin embargo, este sería el caso si el concreto no estuviera destinado para obras portuarias, donde se tiene que tener en consideración no solo el valor de f'_c más alto, sino también su comportamiento bajo ataque por sulfatos por la brisa marina y el contacto directo con el agua de mar.

Es así que en el acápite 3.4 se observa que el mayor incremento de f'_c se da para la adición de vidrio de 7%. Además, en el acápite 3.2 se puede ver un aumento de slump para este tipo de concreto, siendo este mayor al valor de 4" requerido. Es así que en cuanto al aspecto económico se considerara como valor ideal el 7%.

3.6.2 Aspecto económico

Para afirmar que el vidrio puede ser utilizado en el sector construcción no solo basta con ver el aspecto técnico, también se debe verificar su viabilidad económica. El análisis de los objetivos anteriores nos lleva a la conclusión de que el uso de vidrio aumenta el valor de f'_c para la cual fue diseñada la mezcla, por tanto, se podría reducir costos al disminuir la cantidad de materiales necesarios para alcanzar un mismo f'_c a comparación de un concreto sin vidrio.

Se puede observar en la lista de precios (ver Tabla 26) que el cemento es el que más incurre en el precio total de la mezcla. Además, se ha podido concluir que la adición de vidrio aumenta la resistencia a la compresión siempre y cuando se use hasta 7%. Entonces, podemos concluir que una vez optimizados los diseños de mezcla para que todos alcance un mismo f'_c , se podrá realizar una comparación de precios donde será evidente el ahorro económico, ya que el precio del vidrio es mínimo y significaría un ahorro en cantidad de cemento.

Tabla 26.

Precios equivalentes en el mercado limeño para los materiales utilizados

Material	Cantidad (kg)	Precio (soles/kg)
Cemento	42.5	23.00
Agua	20	1.00
Agregado fino	40	9.00
Agregado grueso	40	9.00
Aditivo	4	30.00
Vidrio	30	2.00

Una vez recopilado esos datos se realiza el cálculo presentado en la Tabla 27. Se observa que no hay mucha diferencia en cuanto a precios, por lo que nuevamente se puede considerar el valor de 7% como ideal para el aspecto económico.

Tabla 27.

Detalle de precios para los distintos tipos de concreto

Descripción	HSV0	HSV6	HSV7	HSV8	HSV9
f'_c (MPa)	40.1	41.9	44.1	42.9	37.5
Cemento	179.67	179.67	179.67	179.67	179.67
Agua	8.45	8.45	8.45	8.45	8.45
Agregado fino	198.68	198.68	198.68	198.68	198.68
Agregado grueso	222.75	222.75	222.75	222.75	222.75
Aditivo	37.35	37.35	37.35	37.35	37.35
Vidrio	0.00	1.33	1.55	1.77	1.99
Total (S/)	646.90	648.22	648.44	648.67	648.89

3.6.3 Aspecto ambiental

La adición de vidrio pulverizado para el concreto surge a raíz de que es un material arrojado como desecho cuando no se dispone a cumplir con su vida cíclica útil dentro de su producción, teniendo como disposición final botaderos y/o vertederos.

Como se vio anteriormente en el acápite 3.5 la producción de cemento va de la mano con la emisión de gases de CO₂ y generación de energía. Como se puede observar en la Tabla 24, utilizando nuevamente un porcentaje de 7% se podría ahorrar 174 kg de CO₂ por tonelada de cemento. De igual manera, utilizando los datos de la Tabla 25 se calcula un ahorro de 175.8 kCal y 47.1 kCal que no generarían los hornos y molinos de producción respectivamente, dando un ahorro total de 222.9 kCal al tener como un concreto con adición de vidrio pulverizado de 7%.

4 CONCLUSIONES

- ✓ Hacer uso del método de diseño de módulos de fineza para concretos con adicciones de vidrio pulverizado ayuda a optimizar las cantidades de materiales utilizados.
- ✓ Al hacer uso del vidrio pulverizado con partículas de tamaños aproximados de 45 μm como adición en el concreto, se genera una mejor fluidez de la mezcla
- ✓ El concreto en estado fresco con las diferentes adicciones de vidrio pulverizado (6 a 9%) provocan variación de consistencia de hasta 13% por encima de la mezcla patrón.
- ✓ Debido al contenido, de más del 70%, de sílice (SiO_2) en el vidrio pulverizado se forman mayores cantidades de silicatos en el concreto, que posteriormente al ser hidratados ayudan al incremento de resistencias con el pasar de los días.
- ✓ Al adicionar el vidrio pulverizado en forma partículas con tamaños de 45 μm en el concreto, se reemplazan los microporos de vacío favoreciendo al incremento de resistencia.
- ✓ El vidrio pulverizado adicionado en las mezclas de concreto que contienen cemento HS con escoria de alto horno presenta un mejor comportamiento en la resistencia a la compresión con cada incremento del porcentaje de vidrio, obteniendo ventajas de hasta 23.6% con respecto al concreto patrón.
- ✓ El vidrio pulverizado adicionado en las mezclas de concreto que contienen cemento HS con escoria de alto horno expuestas a soluciones de sulfato de magnesio (simulando el agua de mar) tienen la máxima resistencia a la compresión cuando se

adiciona el 7% de vidrio pulverizado, obteniendo ventajas de hasta el 16.3% con respecto al concreto patrón.

- ✓ Cuando se utiliza vidrio pulverizado para las mezclas de concreto se favorece al incremento del f'_c , valor que está relacionado directamente con la cantidad de cemento utilizado. Por consecuencia se daría una reducción de las cantidades de cemento y de las emisiones de CO_2 que se producen., además de disminuir las cantidades de energía las cuales no se utilizarían.
- ✓ Al observar las ventajas del vidrio pulverizado en las resistencias a la compresión, en los niveles de consistencia, en los precios de concreto por m^3 y en la favorable reducción de los volúmenes de desperdicios de vidrio se corrobora su uso para los diseños de concretos y se elige 7% como porcentaje de adición ideal.

5 RECOMENDACIONES

- ❖ Al utilizar el método de módulos de fineza para el diseño de mezcla con adiciones de vidrio pulverizado se debe disminuir en 1% la incidencia del agregado fino debido a la finura del material de adición.
- ❖ Cuando se lleve a cabo la utilización de vidrio pulverizado como adición en las mezclas de concreto con restricciones de relación a/c se deberá considerar el uso de aditivos superplastificantes.
- ❖ Se deberá ensayar previamente las mezclas de concreto con los aditivos superplastificantes, para controlar los posibles efectos de segregación en el concreto fresco y obtener correctos valores de asentamiento, al analizar los distintos porcentajes de vidrio pulverizado.
- ❖ Una vez abiertas las bolsas de cemento para su utilización se deben tener cuidado de no dejarlas expuestas a ambientes húmedas, debido a que el material podría hidratarse y perjudicar las mezclas futuras de concreto.
- ❖ Para el uso de vidrio pulverizado como adición en otro tipo de cementos se debe priorizar contramedidas a la posible aparición de la reacción álcalis-sílice.
- ❖ Una vez cumplida las fechas de las probetas bajo ataques por sulfato de magnesio para realizar las roturas a compresión, se recomienda dejarlas secar por más de 3 hora, con la finalidad de evitar la contrapresión del agua retenida en los microporos.

- ❖ Se recomienda llevar a cabo más ensayos de concreto endurecido para las mezclas que contienen cemento HS con escoria de alto horno más las adiciones de vidrio pulverizado y poner a prueba otras características que brinda la adición.
- ❖ Se recomienda hacer uso del vidrio pulverizado con cementos que presentan adiciones con puzolana, con la finalidad de expandir las posibilidades del uso del vidrio.
- ❖ Se recomienda llevar a cabo estudios similares mediante la utilización de otros tipos de vidrios (contenedores, bulbos, tubos de rayos catódicos, etc.) como residuo pulverizado con tamaños de partículas de 45 μm aproximadamente para la elaboración de concreto que contenga cementos HS con adiciones de escoria de alto horno.
- ❖ Se recomienda llevar a cabo estudios de reología involucrados con el uso de vidrio pulverizado en la adición del concreto, con la finalidad de evaluar sus características como flujo (estado fresco).

6 REFERENCIAS

- Aceros Arequipa. (2011). Construyendo con Juan Seguro. Edición N° 17. Recuperado de <http://www.acerosarequipa.com/fileadmin/templates/AcerosCorporacion/PDF/boletin-construyendo/BOLETIN-CONSTRUYENDO-17.pdf> [Consulta: 24 de setiembre de 2018].
- Araya R., M., & Muñoz Umaña, F. (2011). Control de calidad del concreto estructural y del mortero de pega en viviendas. *Revista Ingeniería*, 41-53. Recuperado de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/download/7709/7373> [Consulta: 19 de noviembre de 2018].
- Asociación de Productores de Cemento [ASOCEM]. (2018). *Reporte estadístico*. Lima: Asociacion de productores de cemento. Recuperado de <http://www.asocem.org.pe/archivo/files/Indicadores%20ppt%20web%20reporte%20anual%202018.pdf> [Consulta: 11 de marzo de 2019].
- ASTM Committee C01.29. (2018). ASTM C1012 / C1012M - 18b Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. Obtenido de <https://www.astm.org/Standards/C1012.htm> [Consulta: 23 de noviembre de 2018].
- ASTM Committee C09.61. (2016). ASTM C192/C192M - 16a Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. Recuperado de <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C192C192M-16a> [Consulta: 10 de setiembre de 2018].
- Autoridad Portuaria Nacional [APN]. (2016). *Plan Nacional de Desarrollo Portuario*. Lima. Recuperado de https://www.apn.gob.pe/site/files/M3J4398CKFHE734WHS93904SDF88934/APN_VERONICA_ZAMBRANO_COPELLO.pdf [Consulta: 23 de marzo de 2019].
- Cabrera, L. (2014). *Comparación de la resistencia de adoquines de concreto y otros elaborados con vidrio reciclado (Tesis de Pregrado)*. Universidad Privada del Norte, Cajamarca. Recuperado de [http://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/10257/Cabrera%20Barboza%](http://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/10257/Cabrera%20Barboza%20Tesis.pdf)

- 20Luz%20Katherine.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Consulta: 04 de setiembre de 2018].
- Cámara Peruana de la Construcción [CAPECO]. (2018). *Informe económico de la construcción*. Lima: CAPECO. Recuperado de http://www.excon.pe/iec/IEC21_1118.pdf [Consulta: 09 de abril de 2019].
- Comité Técnico Especializado. (2009). *Norma E.060. Concreto Armado*. Recuperado de <https://www.sencico.gob.pe/descargar.php?idFile=190> [Consulta: 17 de setiembre de 2018].
- Córdova, C. (2018). *Análisis del concreto simple utilizando vidrio pulverizado como adición para concreto de alta resistencia con agregados de la ciudad de Chiclayo (Tesis de Pregrado)*. Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo. Recuperado de http://tesis.usat.edu.pe/bitstream/usat/1197/1/TL_CordovaSanchezCarlosErnesto.pdf [Consulta: 04 de setiembre de 2018].
- Cortez, E. (2017). *Estudio de la resistencia a la compresion de un concreto $f'c = 175 \text{ kg/cm}^2$ sustituyendo el agregado grueso con vidrio triturado tipo Sodo Calcico (Tesis de Pregrado)*. Universidad Peruana Los Andes, Huancayo. Recuperado de <http://repositorio.upla.edu.pe/bitstream/handle/UPLA/252/ELISA%20LILIANA%20CORTEZ%20PEN%CC%83ALOZA.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Consulta: 04 de setiembre de 2018].
- Gomero, R. (2017). País por reciclar. (J. Vadilla, Entrevistador) El Peruano. Recuperado de <https://elperuano.pe/noticia-pais-reciclar-61530.aspx> [Consulta: 02 de setiembre de 2018].
- Grupo del Banco Mundial [GBM]. (2007). *Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la fabricación de vidrio*. Recuperado de <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/42429d00488657c0b2e6f26a6515bb18/0000199659ESes%2BGlass%2BManufacturing.pdf?MOD=AJPERES> [Consulta: 01 de setiembre de 2018].
- Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (2011). *NTP 400.017:2011 AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar la masa por unidad de volumen o*

densidad (“Peso Unitario”) y los vacíos en los agregados. 3a. . Lima. Recuperado de <https://servicios.inacal.gob.pe/cidalerta/biblioteca-detalle.aspx?id=22884> [Consulta: 22 de diciembre de 2018].

Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (2013). *NTP 339.183:2013 CONCRETO. Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio. 2ª Edición. Lima. Recuperado de <https://servicios.inacal.gob.pe/cidalerta/biblioteca-detalle.aspx?id=26413> [Consulta: 23 de diciembre de 2018].*

Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (2013). *NTP 339.184:2013 CONCRETO. Método de ensayo normalizado para determinar la temperatura de mezclas de concreto. 2ª Edición. Lima. Recuperado de <https://servicios.inacal.gob.pe/cidalerta/biblioteca-detalle.aspx?id=26414> [Consulta: 22 de febrero de 2019].*

Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (2013). *NTP 400.012:2013 AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global. 3ª Edición. Lima. Recuperado de <https://servicios.inacal.gob.pe/cidalerta/biblioteca-detalle.aspx?id=26423> [Consulta: 12 de diciembre de 2018].*

Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (2013). *NTP 400.018:2013 AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar materiales más finos que pasan por el tamiz normalizado 75 μm (Nº 200) por lavado en agregados. 3ª Edición. Lima. Recuperado de <https://servicios.inacal.gob.pe/cidalerta/biblioteca-detalle.aspx?id=28186> [Consulta: 14 de noviembre de 2018].*

Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (2013). *NTP 400.021:2013 AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado grueso. 3a Edición. Lima. Recuperado de <https://servicios.inacal.gob.pe/cidalerta/biblioteca-detalle.aspx?id=26426> [Consulta: 19 de enero de 2019].*

Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (2013). *NTP 400.022:2013 AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino. 3a Edición. Lima. Recuperado de <https://servicios.inacal.gob.pe/cidalerta/biblioteca-detalle.aspx?id=26427> [Consulta: 15 de enero de 2019].*

- Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (2015). *NTP 339.034:2015 CONCRETO. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas. 4ª Edición*. Lima. Recuperado de <https://servicios.inacal.gob.pe/cidalerta/biblioteca-detalle.aspx?id=22254> [Consulta: 28 de marzo de 2019].
- Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (2015). *NTP 339.035:2015 CONCRETO. Método de ensayo para la medición del asentamiento del concreto de Cemento Portland. 4a. Edición*. Lima. Recuperado de <https://servicios.inacal.gob.pe/cidalerta/biblioteca-detalle.aspx?id=22255> [Consulta: 17 de marzo de 2019].
- Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (2016). *NTP 334.090:2016 CEMENTOS. Cemento Pórtland adicionados. Requisitos. 1a Edición*. Lima. Recuperado de <https://servicios.inacal.gob.pe/cidalerta/biblioteca-detalle.aspx?id=28458> [Consulta: 12 de diciembre de 2018].
- Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (2018). *NTP 334.002:2018 CEMENTOS. Determinación de la finura del cemento Pórtland expresada por la superficie específica usando el aparato de permeabilidad al aire. 5a Edición*. Lima. Recuperado de <https://servicios.inacal.gob.pe/cidalerta/biblioteca-detalle.aspx?id=28472> [Consulta: 20 de diciembre de 2018].
- Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (2018). *NTP 334.045:2018 CEMENTOS. Método de ensayo para determinar la finura del cemento Pórtland por el tamiz de 45 μ m (No. 325)*. Lima. Recuperado de <https://servicios.inacal.gob.pe/cidalerta/biblioteca-detalle.aspx?id=28282> [Consulta: 02 de marzo de 2019].
- Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (2018). *NTP 334.082:2016 CEMENTOS. Cemento Pórtland. Requisitos de desempeño. 1a Edición*. Lima. Recuperado de <https://servicios.inacal.gob.pe/cidalerta/biblioteca-detalle.aspx?id=28457> [Consulta: 11 de febrero de 2019].
- Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI]. (2017). *Residuos sólidos per cápita en la provincia de Lima, según distrito, 2014-2016*. Recuperado de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/indices_tematicos/cap02061.xls [Consulta: 01 de setiembre de 2018].

- Jurado S., J. G., & Niño H., J. R. (2010). *Tecnología del concreto: materiales, propiedades y diseño de mezclas*. Bogota: Asocreto. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/234779446/Tecnologia-Del-Concreto-Tomo-1> [Consulta: 08 de noviembre de 2018]
- Kosmatka, S., & Wilson, M. (2011). *Design and Control of Concrete Mixtures* (15 ed.). Illinois. Recuperado de <https://faculty.uml.edu/ehajduk/Teaching/14.310/documents/EB001.15.pdf> [Consulta: 27 de setiembre de 2018].
- McLellan, G. W., & Shand, E. (1984). *Glass engineering handbook*. McGraw-Hill. Recuperado de <https://www.amazon.com/Glass-Engineering-Handbook-George-McLellan/dp/007044823X> [Consulta: 29 de octubre de 2018].
- Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2013). *Sexto Informe Nacional de Residuos Sólidos de la Gestión del Ámbito Municipal y No Municipal 2013*. Recuperado de <http://redrrss.minam.gob.pe/material/20160328155703.pdf> [Consulta: 02 de setiembre de 2018].
- Neville, A. (2013). *Tecnología del Concreto*. Ciudad de México. Recuperado de http://imcyc.com/redcyc/imcyc/biblioteca_digital/TECNOLOGIA_DEL_CONCRETO.pdf [Consulta: 17 de setiembre de 2018].
- Putzmeister. (2018). *La relación agua-cemento: un frágil equilibrio*. Recuperado de <http://bestsupportunderground.com/relacion-agua-cemento/> [Consulta: 24 de setiembre de 2018].
- Rehman, S., Iqbal, S., & Ali, A. (2018). Combined influence of glass powder and granular steel slag on fresh and mechanical properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 178, 153-160. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.148 [Consulta: 24 de febrero de 2019].
- Rivera, G. (2013). *Concreto Simple*. Popayán. Recuperado de <https://www.udocz.com/read/tecnologia-concreto-y-mortero-rivera-pdf> [Consulta: 17 de setiembre de 2018].
- Sánchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Santafé de Bogotá: Bhandar Editores. Recuperado de

https://www.researchgate.net/publication/31773266_Tecnologia_del_concreto_y_d_el_mortero_D_Sanchez_de_Guzman [Consulta: 11 de noviembre de 2018].

Soto, G., & Hernández, J. (13 de febrero de 2016). Solo 4% de 8.468 toneladas diarias de basura se recicla en Lima. (P. Sandoval, Entrevistador) El Comercio. Recuperado de <https://elcomercio.pe/lima/4-8-468-toneladas-diarias-basura-recicla-lima-272561> [Consulta: 02 de setiembre de 2018].

Sun Kim, I., Yeong Choi, S., & Yang, E. (2018). Evaluation of durability of concrete substituted heavyweight waste glass as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 184, 269-277. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.221 [Consulta: 20 de enero de 2019]

7 ANEXOS

ANEXO 1

ANALISIS FISICO Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO

A.- ENSAYOS FISICOS

Tipo de cemento	: HS	Norma	: NTP 334.082
Procedencia	: Cementos INKA	Fecha	: Setiembre 2018
Peso de la muestra	:	Hecho por:	: Cementos INKA

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	LIMITES
Densidad Le Chatelier	g/cm ³	2.99	-
Contenido de aire en mortero	% Vol	7	≤12
Finura Blaine	cm ² /g	4400	-
Expansión Autoclave	%	0.05	≤0.80
Peso específico	kg/cm ³	2990	
Tiempo de fraguado			
Inicial	min	147	≥45
Final	min	319	≤420
Resistencias a la compresión			
1 día	kg/cm ²	104	-
3 días	kg/cm ²	212	≥112
7 días	kg/cm ²	315	≥184
28 días	kg/cm ²	438	≥255
Calor de hidratación			
7 días	kCal/kg	54	-
28 días	kCal/kg	67	-
Expansión de la barra del mortero			
14 días	%	0.01	-
Expansión de la barra del mortero por sulfato			
6 meses	%	0.04	≤0.05
1 año	%	0.06	≤0.10
Expansión álcali-sílice reactivo			
14 días	%	0.013	≤0.020
56 días	%	0.028	≤0.060

B.- COMPOSICIÓN QUIMICA

Tipo de cemento	: HS	Norma	: -
Procedencia	: Cementos INKA	Fecha	: Agosto 2018
Peso de la muestra	:	Hecho por:	: Cementos INKA

OXIDOS	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	PF	RI	Cal libre
%	24.95	2.37	6.09	56.06	2.14	3.47	0.63	0.14	3.88	0.95	0.86

ANEXO 2

ANALISIS GRANULOMETRICO

A.- AGREGADO FINO

Tipo de agregado	: Arena gruesa	Norma	: NTP 400.012
Procedencia	: Cementos INKA	Fecha	: 10/01/2019
Peso de la muestra	: 500 g	Hecho por:	: Diego Huapaya Joffrey Valdivia

MALLA	PESO RETENIDO (g)	RETENIDO PARCIAL	RETENIDO ACUMULADO	QUE PASA	LIMITES (%)
3/8"	0.00	0%	0%	100.00%	100-100
N° 4	11.00	2.20%	2.20%	97.80%	100-95
N° 8	19.00	3.80%	6.00%	94.00%	100-80
N° 16	73.00	14.60%	20.60%	79.40%	85-50
N° 30	135.00	27.00%	47.60%	52.40%	60-25
N° 50	145.00	29.00%	76.60%	23.40%	30-5
N° 100	60.00	12.00%	88.60%	11.40%	10-0
Fondo	57.00	11.40%	100.00%		

MODULO DE FINEZA	TAMAÑO MAXIMO	TAMAÑO MAXIMO NOMINAL
$MF = \frac{\sum \% \text{ Retenido acumulado}}{100} = 2.42$	3/8"	N°4

B.- AGREGADO GRUESO

Tipo de agregado : Piedra chancada
 Procedencia : Cementos INKA
 Peso de la muestra : 10 554.30 g

Norma : NTP 400.012
 Fecha : 10/01/2019
 Hecho por: : Diego Huapaya
 Joffrey Valdivia

MALLA	PESO RETENIDO (g)	RETENIDO PARCIAL	RETENIDO ACUMULADO	QUE PASA	LIMITES (%)
1"	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	100-100
3/4"	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	100-90
1/2"	1721.00	34.43%	34.43%	65.57%	
3/8"	1493.00	29.87%	64.29%	35.71%	55-20
N° 4	1718.00	34.37%	98.66%	1.34%	10-0
Fondo	67.00	1.34%	100.00%		

MODULO DE FINEZA

TAMAÑO
MAXIMO

TAMAÑO MAXIMO
NOMINAL

$$MF = \frac{\sum \% \text{ Retenido acumulado}}{100} = 6.63$$

3/4"

1/2"

ANEXO 3
PESO UNITARIO SUELTO Y COMPACTADO

A1.- AGREGADO FINO SUELTO

Tipo de agregado	: Arena gruesa	Norma	: NTP 400.017
Procedencia	: Cementos INKA	Fecha	: 10/01/2019
Peso de la muestra	:	Hecho por:	: Diego Huapaya Joffrey Valdivia

DESCRIPCION	SIMBOLO	CANTIDAD	UNIDAD
PESO DE LA MUESTRA SUELTA + RECIPIENTE		6.205	kg
PESO DEL RECIPIENTE		2.169	kg
PESO DE LA MUESTRA SUELTA	Ws	4.036	kg
VOLUMEN DEL RECIPIENTE	V	0.00283	m ³
PESO UNITARIO SUELTO	PUS	1426.15	kg/m ³

PESO UNITARIO SUELTO

$$PUS = \frac{Ws}{V}$$

A2.- AGREGADO FINO COMPACTADO

Tipo de agregado	: Arena gruesa	Norma	: NTP 400.017
Procedencia	: Cementos INKA	Fecha	: 10/01/2019
Peso de la muestra	:	Hecho por:	: Diego Huapaya Joffrey Valdivia

DESCRIPCION	SIMBOLO	CANTIDAD	UNIDAD
PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA + RECIPIENTE		6.893	kg
PESO DEL RECIPIENTE		2.169	kg
PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA	Wc	4.724	kg
VOLUMEN DEL RECIPIENTE	V	0.00283	m ³
PESO UNITARIO COMPACTADO	PUC	1669.26	kg/m ³

PESO UNITARIO COMPACTADO

$$PUC = \frac{Wc}{V}$$

B1.- AGREGADO GRUESO SUELTO

Tipo de agregado	: Piedra chancada	Norma	: NTP 400.017
Procedencia	: Cementos INKA	Fecha	: 10/01/2019
Peso de la muestra	:	Hecho por:	: Diego Huapaya Joffrey Valdivia

DESCRIPCION	SIMBOLO	CANTIDAD	UNIDAD
PESO DE LA MUESTRA SUELTA + RECIPIENTE		26.46	kg
PESO DEL RECIPIENTE		7.719	kg
PESO DE LA MUESTRA SUELTA	Ws	18.741	kg
VOLUMEN DEL RECIPIENTE	V	0.00943	m ³
PESO UNITARIO SUELTO	PUS	1987.38	kg/m ³

PESO UNITARIO SUELTO

$$PUS = \frac{Ws}{V}$$

B2.- AGREGADO GRUESO COMPACTADO

Tipo de agregado	: Piedra chancada	Norma	: NTP 400.017
Procedencia	: Cementos INKA	Fecha	: 10/01/2019
Peso de la muestra	:	Hecho por:	: Diego Huapaya Joffrey Valdivia

DESCRIPCION	SIMBOLO	CANTIDAD	UNIDAD
PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA + RECIPIENTE		27.96	kg
PESO DEL RECIPIENTE		7.719	kg
PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA	Wc	20.241	kg
VOLUMEN DEL RECIPIENTE	V	0.00943	m ³
PESO UNITARIO COMPACTADO	PUC	2146.45	kg/m ³

PESO UNITARIO COMPACTADO

$$PUC = \frac{Wc}{V}$$

ANEXO 4
PESO ESPECIFICO Y ABSORCION

A.- AGREGADO FINO

Tipo de agregado	: Arena gruesa	Norma	: NTP 400.022
Procedencia	: Cementos INKA	Fecha	: 10/01/2019
Peso de la muestra	:	Hecho por:	: Diego Huapaya Joffrey Valdivia

DESCRIPCION	SIMBOLO	CANTIDAD	UNIDAD
PESO DE LA FIOLA		170	g
PESO DE LA ARENA SUPERFICIALMENTE SECA		500	g
PESO DE LA ARENA SUPERFICIALMENTE SECA + PESO DE LA FIOLA		670	g
PESO DE LA ARENA SUPERFICIALMENTE SECA + PESO DE LA FIOLA + PESO DEL AGUA		982.7	g
PESO DEL AGUA	W	312.7	g
PESO DE LA ARENA SECA	A	498	g
VOLUMEN DE LA FIOLA	V	500	ml
PESO ESPECIFICO DE MASA	PEm	2659	kg/m ³
PESO ESPECIFICO DE MASA SSS	PEmsss	2670	kg/m ³
PESO ESPECIFICO APARENTE	Pea	2688	kg/m ³
PORCENTAJE DE ABSORCION	Ab	0.402	%

PESO ESPECÍFICO DE MASA

$$PEm = \frac{A}{V - W}$$

PESO ESPECÍFICO DE MASA SATURADO SUPERFICIALMENTE SECO

$$PEmsss = \frac{500}{V - W}$$

PESO ESPECÍFICO APARENTE

$$PEa = \frac{A}{(V - W) - (500 - A)}$$

PORCENTAJE DE ABSORCION

$$Ab = \left(\frac{500 - A}{A} \right) * 100$$

B.- AGREGADO GRUESO

Tipo de agregado	: Piedra chancada	Norma	: NTP 400.021
Procedencia	: Cementos INKA	Fecha	: 10/01/2019
Peso de la muestra	:	Hecho por:	: Diego Huapaya Joffrey Valdivia

DESCRIPCION	SIMBOLO	CANTIDAD	UNIDAD
PESO DE LA MUESTRA SSS	B	5000	g
PESO DE LA MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA	C	3129	g
PESO DE LA MUESTRA SECA	A	4966	g
PESO ESPECIFICO DE MASA	PEm	2654	kg/m ³
PESO ESPECIFICO DE MASA SSS	PEmsss	2672	kg/m ³
PESO ESPECIFICO APARENTE	Pea	2703	kg/m ³
PORCENTAJE DE ABSORCION	Ab	0.685	%

PESO ESPECÍFICO DE MASA

$$PEm = \frac{A}{B - C}$$

PESO ESPECÍFICO DE MASA SATURADO SUPERFICIALMENTE SECO

$$PEmsss = \frac{B}{B - C}$$

PESO ESPECÍFICO APARENTE

$$PEa = \frac{A}{A - C}$$

PORCENTAJE DE ABSORCION

$$Ab = \left(\frac{B - A}{A} \right) * 100$$

ANEXO 5
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 200

A.- AGREGADO FINO

Tipo de agregado	: Arena gruesa	Norma	: NTP 400.018
Procedencia	: Cementos INKA	Fecha	: 10/01/2019
Peso de la muestra	:	Hecho por:	: Diego Huapaya Joffrey Valdivia

DESCRIPCION	SIMBOLO	CANTIDAD	UNIDAD
PESO DE LA MUESTRA	P1	500	g
PESO DE LA MUESTRA LAVADA Y SECADA	P2	485	g
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 200	P1-P2	15	g
% QUE PASA LA MALLA N° 200	A	3.00	%

B.- AGREGADO GRUESO

Tipo de agregado	: Piedra chancada	Norma	: NTP 400.018
Procedencia	: Cementos INKA	Fecha	: 10/01/2019
Peso de la muestra	:	Hecho por:	: Diego Huapaya Joffrey Valdivia

DESCRIPCION	SIMBOLO	CANTIDAD	UNIDAD
PESO DE LA MUESTRA	P1	2007	g
PESO DE LA MUESTRA LAVADA Y SECADA	P2	1994	g
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 200	P1-P2	13	g
% QUE PASA LA MALLA N° 200	A	0.65	%

PORCENTAJE QUE PASA LA MALLA N° 200

$$A = \left(\frac{P1 - P2}{P1} \right) * 100$$

ANEXO 6
CONTENIDO DE HUMEDAD

A.- AGREGADO FINO

Tipo de agregado	: Arena gruesa	Norma	: NTP 339.185
Procedencia	: Cementos INKA	Fecha	: 10/01/2019
Peso de la muestra	:	Hecho por:	: Diego Huapaya Joffrey Valdivia

DESCRIPCION	SIMBOLO	CANTIDAD	UNIDAD
PESO DE LA MUESTRA HUMEDA	Ph	500	g
PESO DE LA MUESTRA SECA	Ps	497	g
CONTENIDO DE AGUA	Ph-Ps	3	g
CONTENIDO DE HUMEDAD	h	0.604	%

B.- AGREGADO GRUESO

Tipo de agregado	: Piedra chancada	Norma	: NTP 339.185
Procedencia	: Cementos INKA	Fecha	: 10/01/2019
Peso de la muestra	:	Hecho por:	: Diego Huapaya Joffrey Valdivia

DESCRIPCION	SIMBOLO	CANTIDAD	UNIDAD
PESO DE LA MUESTRA HUMEDA	Ph	5000	g
PESO DE LA MUESTRA SECA	Ps	4991	g
CONTENIDO DE AGUA	Ph-Ps	9	g
CONTENIDO DE HUMEDAD	h	0.18	%

CONTENIDO DE HUMEDAD

$$h = \left(\frac{Ph - Ps}{Ps} \right) * 100$$

ANEXO 7
METODO DE ABRASION

AGREGADO GRUESO

Tipo de agregado	: Piedra chancada	Norma	: NTP 400.019
Procedencia	: Cementos INKA	Fecha	: 10/01/2019
Peso de la muestra	:	Hecho por:	: Diego Huapaya Joffrey Valdivia

MEDIDA DEL TAMIZ		MASA SEGÚN GRADACION (g)			
PASANTE	RETENIDO	A	B	C	D
1 ½" (37.5 mm)	1" (25.0 mm)	1250 ± 10			
1" (25.0 mm)	¾" (19.0 mm)	1250 ± 10			
¾" (19.0 mm)	½" (12.5 mm)		2500 ± 10		
½" (12.5 mm)	⅜" (12.5 mm)		2500 ± 10		
⅜" (12.5 mm)	¼" (6.30 mm)			2500 ± 10	
¼" (6.30 mm)	Nº4 (4.75 mm)			2500 ± 10	
Nº4 (4.75 mm)	Nº8 (2.36 mm)				5000 ± 10

DESCRIPCION	SIMBOLO	UNIDAD	CANTIDAD			
			A	B	C	D
ESFERAS			12	11	8	6
REVOLUCIONES			500	500	500	500
VELOCIDAD		rpm	30	30	30	30
MASA INICIAL	P1	g		5000		
MASA FINAL	P2	g		4270		
PERDIDA MAXIMA	P1-P2	g		730		
DESGASTE	D	%		14.60		

PERDIDA MAXIMA

$$D = \left(\frac{P1 - P2}{P1} \right) * 100$$

ANEXO 8

FINURA EXPRESADA POR LA SUPERFICIE ESPECIFICA (BLAINE)

A.- VIDRIO PULVERIZADO

Tipo de material	: Vidrio pulverizado	Norma	: NTP 334.002
Procedencia	: Vidriería Alejo S.R.L.	Fecha	: 17/01/2019
Peso de la muestra	: 10 g	Hecho por:	: Diego Huapaya Joffrey Valdivia

DESCRIPCION	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
TEMPERATURA DEL LABORATORIO	T1	25°	°C
TEMPERATURA DEL LABORATORIO EN PRUEBA DEL VIDRIO PULVERIZADO	T2	27°	°C
VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA	T2 – T1	2	°C
PESO DEL VIDRIO	W	10.00	g
TIEMPO DE DESCENSO EN LA MUESTRA DE PRUEBA	D	22	segundos
FACTOR BLAINE	FB	417.02	
SUPERFICIE ESPECÍFICA DE LA MUESTRA ESTÁNDAR	S	1956	cm ² /g

SUPERFICIE ESPECÍFICA DE LA MUESTRA ESTÁNDAR

$$S = (FB) * \sqrt{T}$$

ANEXO 9
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 325

A.- VIDRIO PULVERIZADO

Tipo de material	: Vidrio pulverizado	Norma	: NTP 334.045
Procedencia	: Vidriería Alejo S.R.L.	Fecha	: 17/01/2019
Peso de la muestra	: 10 g	Hecho por:	: Diego Huapaya Joffrey Valdivia

DESCRIPCION	SIMBOLO	CANTIDAD	UNIDAD
PESO DE LA MUESTRA	P1	10	g
MATERIAL RETENIDO POR LA MALLA N° 325	P2	3.47	g
% QUE PASA LA MALLA N° 325	A	61.30	%

PORCENTAJE QUE PASA LA MALLA N° 325

$$A = \left(\frac{P1 - P2}{P1} \right) * 100$$