

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**INFLUENCIA DE LA INCORPORACIÓN DE POLVO DE
CONCRETO RECICLADO EMPLEADO COMO ADICIÓN EN
LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR:

WALTER IVAN ESCALANTE CIEZA

0009-0000-4649-9677

ASESOR

Ing. RAFAEL CACHAY HUAMÁN

0000-0002-1695-8112

Lima-Perú

2024

© 2024, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

“El autor autoriza a la UNI la reproducción de la Tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”

Escalante Cieza, Walter Ivan
walter.escalante.cieza@gmail.com
996178201

*A mis padres, **Guadalupe Cieza Calderón** y **Cesar O. Escalante Díaz**, por su apoyo, consejos, comprensión y amor en los momentos más difíciles, y por brindarme todo lo necesario a lo largo de mi vida y formación profesional. Gracias a ustedes soy la persona que soy.
Los amo mucho.*

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por estar atentos a todos mis logros personales, académicos y profesionales. A mis padres, **Guadalupe Cieza Calderón** y **César Escalante Díaz**, por su apoyo incondicional a lo largo de esta travesía; a mis hermanos, **Erick Escalante Cieza** y **Rocío Escalante Cieza**, por sus palabras de aliento en los momentos que más lo necesitaba durante toda mi vida, en especial desde que decidí estudiar la carrera de Ingeniería Civil en la Universidad Nacional de Ingeniería, la mejor universidad del Perú.

A mi asesor, el **Ing. Rafael Cachay Huamán**, por su apoyo durante el desarrollo de la presente investigación y de mi formación profesional.

Al **Ing. Marco Tejada Silva**, la **Ing. Ana Torre Carillo** y la **Ing. Jaclyn Corrales**, por los consejos y orientaciones brindados para el análisis mecánico en los ensayos de la presente tesis.

A la **Ing. Carmen Reyes** y la **Ing. Rosaura Vásquez Arrieta**, por las aclaraciones, consejos y orientaciones brindados en el análisis y comportamiento químico de los materiales cementantes, respectivamente.

Al **Centro para el Desarrollo de Materiales Avanzados y Nanotecnología (CEMAT)**, al **Mg. Clemente Luyo** y al **Dr. Henry Huanca**, por el apoyo y orientación brindados en cuanto al ensayo de Difracción de Rayos X utilizado en la presente investigación.

A los técnicos del Laboratorio No.1 Ensayo de Materiales “Manuel Gonzales de la Cotera”, en especial a los **Sres. Teófilo Montes, Germán Ponte, Anthony Santiago, José Luís Julca** y **Luís Ortiz**, por su apoyo durante el diseño de mezcla y desarrollo de ensayos de la presente investigación.

A la **Srta. Kimberlyn Ñopo Sierra**, por su apoyo, palabras de aliento y paciencia, cuando la redacción de la presente investigación parecía no concluir.

A mis amigos, **María Ortega Ochoa** y **Elvis Polo Blas**, por su paciencia, amistad y consejos tanto personales como profesionales.

Muchas gracias por todo.

ÍNDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT.....	3
PRÓLOGO.....	4
LISTA DE TABLAS.....	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS.....	7
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. GENERALIDADES.....	9
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	11
1.3. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	11
1.4. OBJETIVOS	11
1.5. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	12
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	16
2.1. MARCO TEÓRICO	16
2.2. MARCO CONCEPTUAL	18
2.3. MARCO METODOLÓGICO.....	20
CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	39
3.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS	39
3.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	53
CAPÍTULO IV. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	55
CONCLUSIONES	56
RECOMENDACIONES.....	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
ANEXOS.....	68

RESUMEN

El presente proyecto de investigación tuvo como finalidad evaluar el desempeño del Polvo de Concreto Reciclado (*RCP*) en la resistencia a la compresión del concreto, mediante la sustitución parcial del Cemento Portland, lo cual permitió la reutilización de materiales reciclables provenientes de los desechos de construcción y demolición. El *RCP* consiste en una mezcla pulverizada de agregados, pasta de cemento endurecida y cemento que no reaccionó durante la hidratación del concreto, el cual posee una finura por debajo de 150 μm y produce modificaciones en las propiedades de un concreto nuevo.

Con base en investigaciones precedentes de diversos países europeos y asiáticos, se optó por desarrollar ensayos que no suelen ser convencionales en investigaciones de pregrado, como es el análisis de difracción de rayos X y análisis de pH, con la finalidad de observar de forma cualitativa (en el caso del XRD) y cuantitativa (en el caso del pH) la composición de este material. Los resultados no solo mostraron similitudes con las investigaciones precedentes en cuanto a la posible composición química del material, sino que también permitieron dar una visión de su clasificación como posible material cementicio suplementario (*SCM*) y su probable comportamiento como parte de un concreto nuevo.

Se elaboró mezclas y muestras de Concreto Reciclado con *RCP* con materiales del mercado local. Los agregados y cemento portland tipo I utilizados fueron fácilmente ubicados en las cercanías a la Universidad Nacional de Ingeniería, el aditivo SP fue proporcionado por el Laboratorio de Ensayo de Materiales y los procedimientos de mezclado y curado húmedo estuvieron acorde a las normativas vigentes. Los resultados de asentamiento (slump) para el diseño con *RCP* se encontraron entre 3.5" y 6", mientras que el concreto patrón se encontró en 5". En el caso de resistencia a la compresión, el diseño con *RCP* presentó valores entre 554 kgf/cm^2 y 613 kgf/cm^2 , mientras patrón presentó valores de 595 kgf/cm^2 , ambos a una edad de 90 días de curado.

ABSTRACT

The purpose of this research project was to evaluate the performance of Recycled Concrete Powder (RCP) in the compressive strength of concrete, by partially replacing Portland Cement, which allowed the reuse of recyclable materials from construction waste and demolition. RCP consists of a pulverized mixture of aggregates, hardened cement paste and cement that did not react during the hydration of the concrete, which has a fineness below 150 μm and produces modifications in the properties of a new concrete.

Based on previous research from various European and Asian countries, it was decided to develop tests that are not usually conventional in undergraduate research, such as X-ray diffraction analysis and pH analysis, with the purpose of observing qualitatively (in the case of XRD) and quantitative (in the case of pH) the composition of this material. The results not only showed similarities with previous investigations in terms of the possible chemical composition of the material, but also allowed us to provide a vision of its classification as a possible supplementary cementitious material (SCM) and its probable behavior as part of a new concrete.

Mixtures and samples of Recycled Concrete were prepared with RCP with materials from the local market. The aggregates and type I Portland cement used were easily located near the National University of Engineering, the SP additive was provided by the Materials Testing Laboratory and the mixing and wet curing procedures were in accordance with current regulations. The slump results for the RCP design were found to be between 3.5" and 6", while the pattern concrete was found to be 5". In the case of compressive strength, the design with RCP presented values between 554 kgf/cm^2 and 613 kgf/cm^2 , while the pattern presented values of 595 kgf/cm^2 , both at an age of 90 days of moist curing.

PRÓLOGO

En nuestro día a día, a nivel nacional e internacional, se puede evidenciar como el sector de la construcción se desarrolla, a pesar de las circunstancias económicas propias de cada país. Este avance de la industria de la construcción no solo trae consigo el desarrollo de nuevas tecnologías, sino también una mayor demanda y producción de materiales de construcción, lo cual, *a posteriori*, incrementa la generación de desechos que, al acumularse en botaderos o similares, producen un mayor impacto ambiental.

La presente investigación no solo es un esfuerzo más por proponer como reducir el impacto que genera la industria de la construcción debido al gran consumo de materiales como cemento y agregados. Su verdadero propósito es proponer nuevas alternativas de utilización de residuos, con la finalidad de aprovecharlos a futuro como nuevos insumos en la construcción y, sobre todo, en la producción de concreto.

Con base en los resultados obtenidos, los cuales en su mayoría son alentadores, se busca que la comunidad académica pueda ampliar su horizonte en cuanto a las múltiples opciones en reutilización de desechos de construcción, puesto que los resultados no solo muestran rasgos de mejoría leves, sino también porque deja abierta la posibilidad de nuevas investigaciones que permitan, a futuro, ahondar más en esta propuesta de solución.

Ing. Rafael Cachay Huamán

Asesor

LISTA DE TABLAS

Tabla II.1: Propiedades físicas y químicas del Cemento Sol Tipo I	21
Tabla II.2: Frecuencia horaria de producción del RCP.....	22
Tabla II.3: Parámetro pH del agua utilizada.	24
Tabla II.4: Límites granulométricos para el agregado fino - ASTM C33.	25
Tabla II.5: Límites granulométricos para el agregado grueso - ASTM C33.	26
Tabla II.6: Análisis granulométrico del agregado fino utilizado.....	27
Tabla II.7: Análisis granulométrico del agregado grueso utilizado.....	27
Tabla II.8: Peso Específico y Porcentaje de Absorción del Agregado Fino utilizado.	29
Tabla II.9: Peso Específico y Porcentaje de Absorción del Agregado Grueso utilizado.	29
Tabla II.10: Peso Unitario del agregado fino y grueso utilizado.....	30
Tabla II.11: Contenido de Humedad de los agregados fino y grueso utilizados.	30
Tabla II.12: Abrasión para el agregado grueso utilizado.	31
Tabla II.13: Malla No.200 para el agregado fino y grueso utilizados.	32
Tabla II.14: Partículas Desmenuzables y Terrones de Arcilla para el agregado fino y grueso utilizados	32
Tabla II.15: Impurezas orgánicas del agregado fino utilizado.....	33
Tabla II.16: Condiciones de exposición del concreto.	36
Tabla II.17: Requisitos para el concreto expuesto a Sulfatos del suelo y del agua.	36
Tabla II.18: Mezcla de Prueba y Mezcla Patrón ($a/c=0.45$).....	37
Tabla II.19: Dosificaciones finales de mezclas de concreto.	38
Tabla III.1: Resultados de Carbonatación y pH del RCP.....	39
Tabla III.2: Resultados de Densidad del RCP.	43
Tabla III.3: Resultados del ensayo de fluidez en morteros.	44
Tabla III.4: Resultados del Ensayo de Compresión de Morteros.....	45
Tabla III.5: Resultados de Slump para los diseños de mezcla realizados.	47
Tabla III.6: Resultados de los ensayos de peso unitario realizados.	48
Tabla III.7: Resultados de los ensayos de contenido de aire atrapado realizados.	48

LISTA DE FIGURAS

Figura II.1: Potencial reactivo de los materiales puzolánicos en base a su composición química.	17
Figura II.2: Máquina de "Los Ángeles", empleada para la pulverización del RCP.	22
Figura II.3: Proceso en bucle de trituración del RCP.....	23
Figura II.4: Flujograma de elaboración del RCP.	24
Figura II.5: Curva granulométrica del agregado fino utilizado.....	27
Figura II.6: Curva granulométrica del agregado grueso utilizado.	28
Figura II.7: Estados de humedad en los agregados.	30
Figura II.8: Impurezas orgánicas en el agregado fino utilizado.....	33
Figura II.9: Coeficiente A para diferentes texturas de agregado y consistencias de concreto.....	35
Figura III.1: Ensayo de Carbonatación y pH del RCP.	39
Figura III.2: Resultados del ensayo de Difracción de Rayos X (XRD) para el RCP.	40
Figura III.3: Identificación Posibles Fases Cristalinas para el Difractograma XRD de una muestra de RCP (véase Figura III.2).....	41
Figura III.4: Ensayo de Densidad del RCP.....	42
Figura III.5: Ensayo de fluidez en morteros.....	43
Figura III.6: Materiales empleados para la elaboración de cubos de morteros... 45	
Figura III.7: Cubos de mortero patrón (100% PC) y mortero de análisis (80% PC + 20% RCP).	45
Figura III.8: Muestreo de mezclas de concreto.	46
Figura III.9: Determinación del Slump en mezclas de concreto.....	47
Figura III.10: Determinación del peso unitario en mezclas de concreto.....	47
Figura III.11: Determinación del contenido de aire en mezclas de concreto.....	48
Figura III.12: Comparativo de P.U., %Aire Atrapado y Slump para cada diseño analizado.	49
Figura III.13: Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión del concreto.....	50
Figura III.14: Relación entre resistencia a la compresión y dosificación de RCP por edades de desarrollo del concreto.	51
Figura III.15: Resultados del Ensayo de Densidad, %Absorción y %Vacíos en el concreto.....	52

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

Símbolo o Sigla	Significado
%	Porcentaje
%Abs.	Porcentaje de absorción
%Hum.	Porcentaje o contenido de humedad
%PF y TA	Porcentaje de partículas friables y terrones de arcilla
", in., pulg.	Pulgadas
°C	Grados Celsius
π	Número "pi"
ρ	Densidad
a/c	Relación agua/cemento
ASTM	American Society for Testing and Materials
CDW	Restos de Construcción y Demolición (<i>Construction & Demolition Wastes</i>)
cm	Centímetro
cm ³	Centímetro cúbico
f'c	Resistencia a la compresión
ft ³	Pie cúbico
g	Gramos
g/cm ³	Gramo por centímetro cúbico
kg	Kilogramo
kg/m ³	Kilogramo por metro cúbico
kgf/cm ²	Kilogramo-fuerza por centímetro cuadrado
L	Litro
mm	Milímetros
M.F.	Módulo de Finura
MPa	Mega Pascales
NTP	Norma Técnica Peruana
pH	Medida de Acidez o Alcalinidad de una Solución Acuosa
PC	Cemento Portland (<i>Portland Cement</i>)
P.E.	Peso Específico
P.U.	Peso Unitario
P.U.C.	Peso Unitario Compactado
P.U.S.	Peso Unitario Suelto
RA, RAs	Agregados reciclados (<i>Recycled Aggregates</i>)

RHC	Cemento hidratado reciclado (<i>Recycled Hydrated Cement</i>)
RP	Polvo reciclado (<i>Recycled Powder</i>)
RCP	Polvo de concreto reciclado (<i>Recycled Concrete Powder</i>)
rev.	Revoluciones
s	Segundo
SCM	Materiales Cementicios Suplementarios (<i>Supplementary Cementitious Materials</i>)
SRP	Submicron Recycled Powder
SSS	Saturado Superficialmente Seco
SSS sat.	Saturado Superficialmente Seco luego de saturación
SSS eb.	Saturado Superficialmente Seco luego de ebullición
SSS in.	Saturado Superficialmente Seco luego de inmersión
TMN	Tamaño Máximo Nominal

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

En los últimos años, el gran desarrollo tecnológico ha generado diversas formas de contaminación que causan una alteración al equilibrio físico y mental del ser humano (Campdesuñer, Alena, & Antúnez, 2020). Dentro de este gran desarrollo tecnológico se encuentra el crecimiento de la industria de la construcción donde, para la fabricación de estructuras de concreto en un año completo se emplean 1.6 billones de toneladas de cemento, 10 billones de toneladas de roca y arena, y 1 billón de toneladas de agua. Además, se requieren 1.5 toneladas de roca caliza para la fabricación de cada tonelada de cemento, así como el consumo energético que acarrea (Cagiao, et al., 2010). El uso extendido del concreto en el diseño de estructuras se debe a su resistencia, durabilidad, flexibilidad en diseño y bajo costo (De Schepper, Snellings, De Buysser, Van, & De Belie, 2014), material que se forma a partir del Cemento Portland como aglutinante. En años precedentes, la producción en la industria del cemento creció de aproximadamente 1.0 billones hasta 1.7 billones de toneladas, lo cual era equivalente a un consumo de 1 m³ de concreto por persona en el mundo (Yang, Jung, Cho, & Tae, 2014).

Hablando de residuos en general, aquellos que genera la industria de la construcción fueron aproximadamente el 50% del total de residuos industriales producidos y, dentro de estos, el 65% pertenecía a los residuos del concreto, valor que va en aumento día a día y motivo por el cual los investigadores buscan reciclar aquellos pertenecientes a esta categoría (Kwon, Ahn, Cho, & Park, 2015). Países europeos produjeron anualmente un aproximado de 180 millones de toneladas de residuos como resultado de demoliciones, el cual es equivalente a unos 500 kg de restos de demolición por persona. A su vez, esta cantidad representaba el 31% de la totalidad de residuos producidos por la Unión Europea en años precedentes, equivalente a un aproximado de 581 millones de toneladas de residuos (Gastaldi, et al., 2015).

Por otro lado, pese a los beneficios que ofrece el uso de cemento Portland en la fabricación del concreto, se debe tener en cuenta que es también el componente que mayor impacto ecológico generó debido a los daños medioambientales que su fabricación acarreó (Cagiao, et al., 2010). Durante la manufactura de cada tonelada de cemento Portland son generados entre 0.73 a 0.99 toneladas de CO₂,

valor que depende principalmente de la relación clinker/cemento (Mokhtar & Nasooti, 2020). Debido a esto es que el Cemento Portland ha sido confrontado desde la década de los 90's por las excesivas emisiones de CO₂ que su fabricación genera (Yang, Jung, Cho, & Tae, 2014), contribuyendo en un rango de 80-90% de toda la contaminación que la industria del cemento ocasiona (Letelier, Tarela, Muñoz, & Moriconi, 2016). Sin embargo, la producción del cemento Portland no solo arrojó CO₂ a la atmósfera, sino también otras emisiones como partículas materiales, óxidos de nitrógeno (NO_x), SO₂ y otros productos nocivos como el CO (Cagiao, et al., 2010).

Como solución frente a este problema medioambiental, con el paso de los años, innumerables autores han experimentado con el agregado de concreto reciclado (RA) y los resultados han demostrado que su incorporación en el concreto reduce su durabilidad y propiedades mecánicas. Sin embargo, durante el empleo de RA en el concreto, algunos autores se percataron de la producción de materiales finos, con tamaños menores a 0.16 mm, el cual empezó a nombrarse como "polvo de concreto reciclado" (RCP), estaba presente en cantidades del 20 – 30% del total de residuos de construcción (CDW). A su vez, lograron determinar que el RCP se componía principalmente de cemento no hidratado, arena y concreto endurecido; con lo cual, estudios posteriores demostraron que el RCP poseía cierto efecto puzolánico, novedad con la cual comenzó a estudiarse como material cementicio suplementario (SCM) a fin de reducir el consumo de Cemento Portland. Adicionalmente, factores como energía, emisión de CO₂ y costo de elaboración del RCP son menores a los requeridos en la elaboración del Cemento Portland; sin embargo, al igual que con el RA, el RCP también reduce las propiedades mecánicas y trabajabilidad del concreto resultante, debido a que su actividad es menor comparada con la del cemento puro; por ello, se recomendó que su empleo se haga en proporciones controladas por debajo del 15% ya que una sustitución cercana al 30% puede alcanzar un índice de actividad de resistencia (*strength activity index*) de hasta 70%, valor que, en algunos países, cumple con los mínimos estándares de calidad (Xiaoyan, et al., 2022).

Fundamentados en estas investigaciones, es posible concluir que se ha estudiado muy poco el uso de polvo de concreto reciclado (RCP); siendo las veces que se ha hecho, o utilizándolo en combinación con algún material adicional para contrarrestar los efectos negativos del primero o para observar posibles mejoras

frente al trabajo conjunto con los agregados reciclados (*RA*). Por ello, ya que se han demostrado anteriormente los beneficios del uso de RCP en los efectos de contaminación ambiental, la presente investigación buscará evaluar sus efectos en la resistencia a la compresión del concreto con el trabajo independiente del RCP como material puzolánico adicionado.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

PROBLEMA GENERAL

- La sobreproducción de cemento portland, insumo principal del concreto, genera un elevado impacto ambiental debido a la quema de combustibles fósiles y consumo de energía eléctrica. A su vez, los desperdicios provenientes de la construcción y demolición (*CDW*) de estructuras de concreto producen también un impacto ecológico negativo. Sumado a estos, la escasez en propuestas de reutilización de desechos desencadena una creciente huella de carbono perteneciente al sector construcción.

PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- La reutilización de desechos de construcción y demolición como parte de un nuevo concreto genera, en la mayoría de los casos, efectos negativos en las propiedades físicas y mecánicas de este.
- Los desechos de construcción y demolición, al tratarse de concreto antiguo, tendrán una ratio de reacción casi nulo como parte de un nuevo concreto, además de una mala adherencia a este.

1.3. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

El uso de polvo de concreto reciclado (*RCP*), como propuesta de reutilización de desechos provenientes de construcción y demolición, modificará la resistencia a la compresión del concreto, además de influenciar en los parámetros físicos como asentamiento y porosidad.

1.4. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Relacionar y encontrar el efecto entre la adición de RCP y la resistencia a la compresión del concreto, y analizarlo con el apoyo de representaciones gráficas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la influencia de diferentes valores de dosificación de polvo de concreto reciclado en la resistencia a la compresión del concreto y encontrar el valor óptimo.
- Determinar la influencia de diferentes valores de dosificación de RCP en el slump y porosidad del concreto.
- Determinar el índice de actividad de resistencia producido por la incorporación de polvo de concreto reciclado a partir de la resistencia a la compresión en morteros y replicarlo también para concreto, el cual brindará una idea de la ratio de reacción del RCP dentro del concreto.

1.5. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

De acuerdo con Letelier, Tarela, Muñoz & Moriconi (2016), en su investigación titulada “*Combined effect of Recycled Hydrated Cement and Recycled Aggregates on the Mechanical Properties of Concrete*”, empleando porcentajes variables de agregado reciclado (RA), proveniente de un concreto pobre, en reemplazo del 20, 30 y 40% del agregado grueso, porcentajes variables de cemento hidratado reciclado (RHC) de 5, 10 y 15%, finuras de RHC entre 75, 150 y 300 μm , y temperaturas de tratamiento del RHC de 400, 650 y 900 $^{\circ}\text{C}$, logró registrar una pérdida en la resistencia a la flexión del concreto resultante, luego de 28 días de curado, entre 10% y 34% frente a la resistencia de una mezcla de control. Letelier et al. (2016) aseguró que los resultados no mostraron un claro efecto del incremento de RHC cuando las dosificaciones empleadas son bajas, observándose una pérdida del 1% en la resistencia a compresión y 4% en resistencia a la flexión cuando la dosificación varía desde 5% hasta 15%. Finalmente, logró apreciar efectos significativos respecto del máximo tamaño de las partículas de RHC empleadas, reduciendo la resistencia a la compresión en 7% y resistencia a la flexión en 2% conforme disminuye la finura del RHC empleado. Además, la óptima combinación que consideró los 4 parámetros analizados llegó a ser 20% de RA, 5% de RHC de reemplazo, finura de 75 μm y temperatura de tratamiento del RHC de 900 $^{\circ}\text{C}$.

Según Horsakulthai, V. (2021), en su investigación titulada “*Effect of recycled concrete powder on strength, electrical resistivity, and water absorption of self-compacting mortars*”, el material conocido como RCP, producido por el tamizaje de agregados reciclados (RCA), puede ser empleado como SCM en un reemplazo

parcial del Cemento Portland en la producción de concretos y morteros. Para esto, Horsakulthai evaluó parámetros como el índice de actividad de resistencia, resistencia a la compresión, resistividad eléctrica, porosidad y absorción de agua en mezclas de mortero autocompactantes con diferentes dosificaciones de RCP. Para sus diseños empleó agregado fino, cemento portland tipo 1, RCP y un aditivo químico superplastificante a base de policarboxilato. Las dosificaciones de RCP empleadas por el autor fueron 0%, 20%, 40% y 60% de reemplazo del cemento portland en peso. Además, los especímenes elaborados consistieron en cubos de mortero de 50 mm de lado, los cuales serían evaluados principalmente a compresión a la edad de 7, 28 y 90 días, mientras que los ensayos de resistividad eléctrica, porosidad y absorción fueron evaluados a 28 y 90 días. Finalmente, se encontró que el índice de actividad de resistencia a la edad de 7 y 28 días fue de 89.4% y 87.2% respectivamente para la dosificación de 20% de RCP, mientras que conforme aumentaba la dosificación, este índice iba disminuyendo, hasta un promedio de 42.7% de actividad de resistencia correspondiente a una dosificación del 60% de RCP.

Según Gastaldi et al. (2015), en su investigación titulada “*An investigation on the recycling of hydrated cement from concrete demolition waste*”, la producción de un clinker que contenga la incorporación de hasta 30% de HCW (*Hydrated Concrete Waste*) frente a un clinker Portland Ordinario (OPc) ayuda en la reducción de las emisiones de CO₂ al medio ambiente, reduciéndolas hasta en su tercera parte durante la etapa de clinkerización y cuando el reemplazo fue elevado hasta el 40%, las emisiones de CO₂ fueron ser reducidas a menos de su cuarta parte frente a un OPc. Adicionalmente, en la investigación titulada “*A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder*” cuando se adiciona polvo de desechos de construcción sin agregados finos, las emisiones de CO₂ se reducen hasta en un 53% comparado con una mezcla únicamente con caliza (Kwon, Ahn, Cho, & Park, 2015).

Según Xiufeng et al. (2021), en su investigación titulada “*An accelerator prepared from waste concrete recycled powder and its effect on hydration of cement-based materials*”, el polvo proveniente de desechos de concreto reciclado (RP) que se genera durante el triturado de los desechos del concreto para la preparación de agregado reciclado es conocido por ser un material muy difícil de emplear, no solo por su baja actividad, sino también por su alta demanda de agua.

Adicionalmente, se encontró que la sustitución parcial de RP en el cemento genera impactos negativos en la resistencia a la compresión y en la trabajabilidad. Sin embargo, a pesar de dichos impactos negativos, el RP es utilizado como material cementicio suplementario en la elaboración de concreto. En su investigación, se empleó un método de tamizaje húmedo con el RP con el objetivo de refinar dicho material, el cual fue denominado SRP (*Submicron Recycled Powder*) debido a su alta superficie específica y a que todas sus partículas tenían un tamaño inferior a las 60 μm , estando su mayor distribución en partículas con tamaño menor a 1 μm (de allí el nombre submicron). Además, mediante análisis adicionales, se encontró que, al igual que en RP, en el SRP destacaba la presencia de compuestos químicos como el SiO_2 y el CaO , con presencia secundaria de MgO , Al_2O_3 y Fe_2O_3 . En esta investigación fueron analizados diferentes dosificaciones de SRP en reemplazo parcial del CP, llegando hasta un reemplazo máximo de 8% en masa, dando en la mayoría de los casos, la dosificación de 6% los mejores resultados.

Según Xiaoyan et al. (2022), en su investigación titulada “Enhanced early hydration and mechanical properties of cement-based materials with recycled concrete powder modified by nano-silica”, desde hace unos años se ha buscado incorporar RCP en el concreto, sin embargo, debido a la reducción y variación en las propiedades mecánicas y de hidratación del concreto que esta genera, investigadores han intentado mitigar estos efectos secundarios con la incorporación de otras adiciones puzolánicas como micro sílice, puzolanas, entre otros. Según investigaciones precedentes a la de Xiaoyan, el uso de RAs (*Recycled Aggregates*) en el concreto reduce la performance del concreto y, al emplearlos, notaron que la cantidad de finos con tamaños menores a los 0.16 mm (típicamente conocido como RCP) generados por dichos RAs estaban entre aproximadamente 20-30% de la cantidad total de CDW. Adicionalmente, los componentes principales del RCP son cemento no hidratado, arena y pasta de cemento endurecida, y, estudios previos, han demostrado que el RCP posee un efecto puzolánico y llenante de vacíos cuando se emplea en un nuevo concreto; además, la energía requerida, el costo generado y las emisiones de CO_2 producidas para su fabricación son menores a los generados para la fabricación del cemento Portland, lo cual convierte al RCP en un material eco amigable y un buen SCM (*Supplementary Cementitious Material*). Sin embargo, el problema principal de dicho material recae en su efecto negativo en la hidratación y las propiedades mecánicas del concreto resultante, debido a que su reacción es baja

comparado a la de un cemento Portland puro, razón por la cual recomiendan su uso por debajo del 15% de reemplazo como material cementante.

Por otro lado, según estudios, el uso de NS (*nanosilica*) puede mejorar significativamente las propiedades mecánicas y la durabilidad de la muestra resultante. En su investigación, Xiaoyan empleó RCP en una dosificación de 30% y dosificaciones de 0%, 1%, 2% y 3% de NS en reemplazo del cemento Portland, a fin de revelar el efecto de esta última sobre la combinación. Dentro de sus resultados, encontró que la combinación de 30% de RCP y 0% de NS generó menor calor de hidratación respecto de las otras combinaciones y de la muestra patrón, la combinación de 30% de RCP y 20% de NS generó un ligero incremento de 1.2 MPa respecto de la muestra patrón en la resistencia a la compresión, y la combinación de 30% de RCP y 2% de NS generó una resistencia a la flexión menor en 0.2 MPa respecto de la muestra patrón, todos a los 28 días de edad.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1. MARCO TEÓRICO

EFFECTO DISPERSIVO DE LOS ADITIVOS PLASTIFICANTES

Los aditivos plastificantes y superplastificantes (SP) basan su funcionamiento en el efecto dispersivo de compuestos orgánicos e inorgánicos como el naftaleno sulfonado, melaminas y vinilos, los cuales generan (a) repulsión electrostática inducida entre partículas; (b) lubricación de películas existentes entre partículas de cemento y (c) liberación del agua atrapada entre los flóculos de cementos y dispersión de las partículas de cemento. (Sika, 2013)

Los polímeros mencionados anteriormente producen fuerzas de repulsión entre las partículas de la mezcla de concreto, magnitud que depende de (a) la cantidad de polímero absorbido; (b) el espesor de la capa del polímero y (c) el grado de cubrimiento de la partícula, lo cual permite reducir la cantidad de agua empleada en el diseño y mejorar la trabajabilidad de la mezcla de concreto, dependiendo también de la cantidad de C3A presentes en el cemento Portland. (Sika, 2013)

ACTIVIDAD PUZOLÁNICA

La actividad puzolánica de un material cementicio está referida a la habilidad que posee este para poder reaccionar con el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) (Singh, 2018). La cantidad total de hidróxido de calcio con la cual podría llevarse a cabo la actividad puzolánica está relacionada con diversos factores, entre ellos:

- Naturaleza y contenido de la fase reactiva en el material puzolánico.
- Contenido de SiO_2 en la fase reactiva.
- Duración del curado
- Ratio de reacción del material puzolánico con el hidróxido de calcio.
 - Superficie específica del material puzolánico.
 - Relación agua/material sólido.
 - Contenido alcalino del cemento Portland.
 - Temperatura.

Los materiales puzolánicos (materiales con un elevado índice de actividad puzolánica) siempre se han caracterizado por poseer un alto contenido de SiO_2 y Al_2O_3 y un contenido bajo de CaO ; mientras que su actividad reactiva puede ser evaluada química, física y/o mecánicamente. (Singh, 2018)

En una vista gráfica (Figura II.1), los materiales puzolánicos y cementicios se pueden ubicar de la siguiente forma en base a su composición química, específicamente hablando del contenido de CaO/MgO, SiO₂ y Al₂O₃/Fe₂O₃. (ASOCEM, 2022)

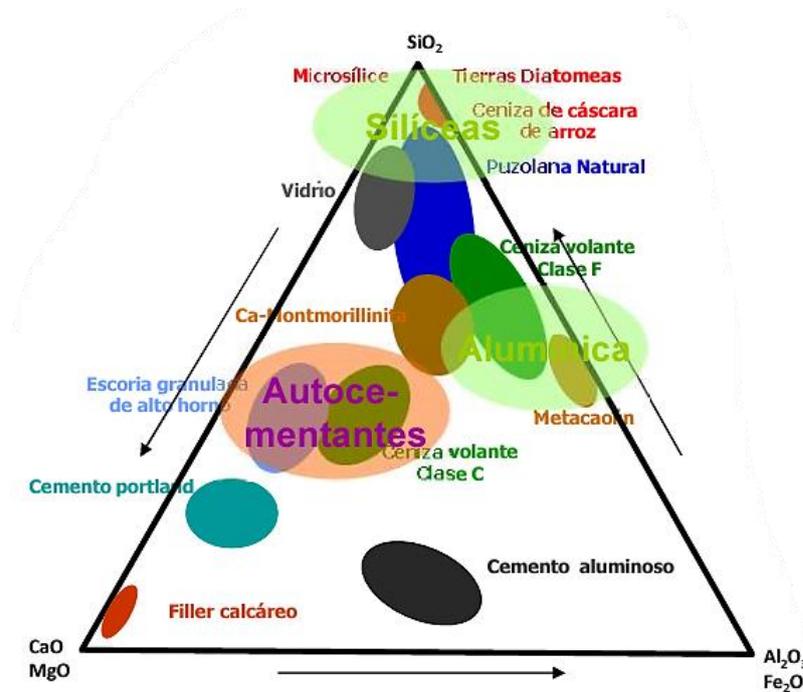


Figura II.1: Potencial reactivo de los materiales puzolánicos en base a su composición química.
Fuente: Introducción a las Adiciones Minerales (ASOCEM, 2022)

Mecánicamente se pueden evaluar mediante la elaboración de cubos de mortero (NTP 334.051, 2019), reemplazando 20% de la cantidad en peso del Cemento Portland por el material puzolánico que se desea emplear, a través de un factor conocido como Índice de Actividad de Resistencia. (ASTM C311, 2018)

2.1.1.1. ÍNDICE DE ACTIVIDAD DE RESISTENCIA

El índice de actividad de resistencia (*“Strength Activity Index”*) está definido como la relación porcentual entre la resistencia a la compresión de un mortero de prueba y el mortero patrón a tiempos específicos de curado. La ratio en el rendimiento de los morteros está ligada principalmente a la ratio de hidratación de estos; dicho de otra forma, esta relación depende de la hidratación del material cementicio y la reacción del material de prueba mediante la actividad puzolánica. (Nurdeen, Megat, & Syed, 2011)

DIFRACCIÓN DE RAYOS X (XRD)

La difracción de rayos X (XRD) ha sido, en el último siglo, una técnica utilizada en la ciencia de los materiales para poder determinar la estructura cristalográfica de un material. Esta técnica trabaja mediante la irradiación de rayos X incidente a un material y la medida de intensidades y ángulos de difracción de los rayos X difractados en el material de estudio. Las ondas difractadas pueden ser del tipo interferencia destructiva, las cuales se cancelan entre ellas en la mayoría de las direcciones, o interferencia constructiva, las cuales se dan en direcciones específicas y se encuentran establecidas por la Ley de Bragg. (TWI, 2023)

El uso principal de un análisis XRD es la identificación de los patrones de difracción de un material, así como la identificación de las fases cristalinas de los componentes químicos de este. Al resultado de una prueba de XRD se le conoce como “Diagrama de difracción de rayos X” o “Difractograma” (TWI, 2023)

2.1.1.2. DIAGRAMA DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Un difractograma trabaja con los datos de intensidad en función del ángulo de difracción (2θ) que genere un material. Los datos más importantes presentados en un difractograma son:

- Posición de los picos expresada en valores de θ , 2θ o d .
- Intensidad de pico.
- Perfil de pico.

CARBONATACIÓN Y PH EN EL CONCRETO

La prueba de carbonatación y pH se utiliza para medir el nivel de acidez o basicidad del concreto y también de materiales como lo son agregados y SCM. La carbonatación de un material se observa cualitativamente mediante el uso de la fenolftaleína, mientras que el pH se mide cuantitativamente con el uso de pHmetro. Se debe tener en cuenta que el pH de un buen concreto, no carbonatado y sin aditivos, es normalmente mayor a 12.5 (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

2.2. MARCO CONCEPTUAL

CONCRETO

El concreto es un material ampliamente utilizado en la industria de la construcción, el cual en estado fresco permite ser manipulación y moldeado, mientras que en estado endurecido proporciona características de resistencia y durabilidad,

comportándose como una roca artificial; la cual se obtiene mediante la mezcla de insumos base (cemento, agregados y agua) y aditamentos cuidadosamente proporcionados (Nilson, 1999).

Este endurecimiento ocurre como consecuencia del contacto y reacciones químicas entre el cemento y el agua (componentes que conforman la pasta). Por otro lado, los agregados que lo conforman se dividen en finos, los cuales contienen partículas menores a 3/8", y gruesos, cuyas partículas quedan retenidas entre el tamiz No.16 y pueden llegar hasta las 6" (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

2.2.1.1. CEMENTO PORTLAND

El cemento Portland es un material cementante grisáceo finamente pulverizado que, al entrar en contacto con el agua, se desempeña como conglomerante junto a los agregados, y que al fraguar y endurecerse genera un material sólido y compacto conocido como concreto. Los cementos Portland son aquellos cuyo principal compuesto químico en su composición son los silicatos hidráulicos de calcio (C-S-H), compuesto que, en su mayoría, brinda sus propiedades mecánicas al concreto (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Su elaboración proviene principalmente del Clinker, material cuya existencia procede de la molienda y fundición de piedra caliza, arcillas y esquistos, el cual es molido nuevamente hasta lograr la finura requerida y ser distribuido. (Nilson, 1999)

Los tipos de cementos Portland puros existentes son:

- Tipo I
- Tipo II
- Tipo III
- Tipo IV
- Tipo V

Teniendo cada una de estas diferentes aplicaciones especiales como moderada o alta resistencia a sulfatos, bajo calor de hidratación o alta resistencia inicial. (ASTM C150, 2021)

2.2.1.2. MATERIAL CEMENTICIO SUPLEMENTARIO (SCM)

Los materiales cementicios suplementarios (*SCM* por sus siglas en inglés) son aquellos utilizados en la producción de concretos de alta resistencia, pues la

incorporación de estos en dosificaciones del 5 al 20%, en contraste con el uso único de cemento portland en el concreto, permiten alcanzar resultados de resistencia, durabilidad y estabilidad superiores (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

2.2.1.3. ADITIVOS

Un aditivo es todo aquel material que, no siendo un insumo base del concreto, ni fibra de refuerzo, ni SCM, es empleado como un ingrediente para la elaboración de morteros y concretos y en los cuales son añadidos antes o durante el proceso de mezclado. Los aditivos suelen ser empleados en mezclas de concreto con la finalidad de modificar o añadir determinadas propiedades a este, pudiendo mejorar aspectos como la trabajabilidad, fluidez, tiempo de fraguado, entre otros. (Torre, 2004)

2.2.1.4. FILLER

Los *filler* son materiales inorgánicos minerales, naturales o artificiales que poseen una adecuada distribución de tamaño de partículas y en su mayoría, mejoran las propiedades del cemento. Estos *filler* pueden ser inertes como así también poseer propiedades ligeramente hidráulicas, hidráulicas latentes o puzolánicas. (NTP 400.037, 2018)

EFFECTO DEL ALTO CONTENIDO DE CEMENTO EN EL CONCRETO

El cemento es el insumo cuyo rol es el más importante dentro de una mezcla de concreto, y ofrece mejoras significativas en cuanto a durabilidad, trabajabilidad, resistencia, entre otros. Sin embargo, según investigaciones recientes, un aumento en el contenido de cemento en una mezcla de concreto puede no solo incrementar el costo de producción de la esta, sino también incrementar la presencia de grietas debido a la contracción por secado ("*Drying Shrinkage*") a edades tempranas. (LeBow, 2018)

2.3. MARCO METODOLÓGICO

MATERIALES EMPLEADOS

Los cuatro materiales principales empleados como materia prima en la elaboración del concreto son: cemento, agua, agregados y aditivos, los cuales son analizados de forma independientes para la producción de concreto.

Todos los ensayos, correspondientes a la determinación de las propiedades de los materiales, que son mencionados en la presente investigación fueron

realizados en el Laboratorio No.1 Ensayo de Materiales “Ing. Manuel Gonzales de la Coterá” de la Universidad Nacional de Ingeniería, mientras que los ensayos cualitativos y cuantitativos de los insumos fueron realizados en el Laboratorio de Química y en el Centro para el Desarrollo de Materiales Avanzados y Nanotecnología (CEMAT) de la Universidad Nacional de Ingeniería.

2.3.1.1. CEMENTO PORTLAND

El cemento, utilizado desde la antigüedad para la construcción de obras y monumentos, es considerado por los expertos como aquel material que cumple los requisitos de durabilidad y sostenibilidad en proyectos de ingeniería civil.

El cemento utilizado es el Cemento SOL Tipo I, el cual cumple los requerimientos expresos en las normativas ASTM C150 (2021) y NTP 334.009 (2016). Las propiedades de este insumo se presentan en la Tabla II.1

Tabla II.1: Propiedades físicas y químicas del Cemento Sol Tipo I

PARÁMETRO	UNIDAD	CEMENTO SOL	NTP 334.009
Expansión autoclave	%	0.09	Máximo 12
Superficie específica	m ² /kg	323	No específica
Densidad	g/cm ³	3.13	No específica
Tiempo de fraguado	min	129	45 a 375
Resistencia a la compresión			
3 días	kg/cm ²	303	Mínimo 122
7 días	kg/cm ²	382	Mínimo 194
28 días	kg/cm ²	449	No específica
Fases mineralógicas			
C ₂ S	%	12	No específica
C ₃ S	%	55	No específica
C ₃ A	%	10	No específica
C ₄ AF	%	10	No específica

Fuente: Ficha Técnica Cemento Sol – UNACEM (2021)

2.3.1.2. RCP

El RCP (*recycled concrete powder*) es un polvillo fino con tamaño de partículas menores a los 150 µm, obtenido a partir del triturado de concreto endurecido. Dentro de su composición se encuentran partículas de cemento que no reaccionaron en el proceso de hidratación del cemento, pasta de cemento pulverizada, arena fina pulverizada y piedra pulverizada. El proceso de obtención del RCP empleado en la presente investigación se presenta en las secciones a continuación.

2.3.1.2.1. Triturado

El proceso de obtención de RCP comenzó con el proceso de triturado. Esta etapa particionada en dos: triturado manual y mecánico.

Durante la etapa de triturado manual, los desechos de concreto utilizados (probetas cilíndricas) fueron sometidos a una fuerza externa ejercida manualmente con una comba, con el objetivo de obtener trozos de concreto, los cuales puedan trabajarse con mayor facilidad durante la molienda mecánica (pulverizado).

Durante la etapa de triturado mecánico, fue empleada la Máquina de Los Ángeles (Figura II.2), equipo utilizado también en el ensayo de abrasión, para un total de 4000 vueltas en cada ciclo de producción. Adicional a este proceso, se analizó el tiempo de producción, con la finalidad de agilizar los tiempos del posterior tamizado y molienda consecutivos, presentado en la Tabla II.2.



Figura II.2: Máquina de "Los Ángeles", empleada para la pulverización del RCP.
Fuente: Laboratorio No.1 Ensayo de Materiales (LEM-UNI)

Tabla II.2: Frecuencia horaria de producción del RCP.

FRECUENCIA DE ELABORACIÓN DEL RECP	
Hora de Inicio	3:14 p. m.
Hora de Término	3:46 p. m.
Tiempo	0h 32m
Total (rev.)	1000
Frecuencia horaria (rev./h)	1875
Número de vueltas deseadas (rev.)	4000
Tiempo estimado (h)	2h 8m

Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.2.2. Tamizado

Una vez terminada la trituración del material, se procedió con el tamizado de este por el tamiz No.100.

Este proceso de tamizado manual poseía por lo general una eficiencia del 41%, luego del cual se debe proceder con la molienda hasta que el proceso de tamizado cíclico sea más eficiente con el tamaño requerido del RCP.

2.3.1.2.3. Procesos en bucle

En el caso de pequeñas partículas de concreto, las cuales tenían una menor probabilidad de continuar reduciendo su tamaño en el pulverizado, estas fueron sometidas a un triturado por chancado, el cual consistía en un procedimiento en bucle (repetitivo), hasta obtener la mayor cantidad de RCP pasante del tamiz No.100. El proceso en bucle puede evidenciarse en la Figura II.4.



Figura II.3: Proceso en bucle de trituración del RCP.

A la izquierda: el RCP en tamaños mayores al tamiz No.100. Al centro: la trituradora utilizada para reducir el RCP por debajo del tamiz No.100. A la derecha: El RCP triturado y pendiente de tamizado.

Fuente: Elaboración propia.

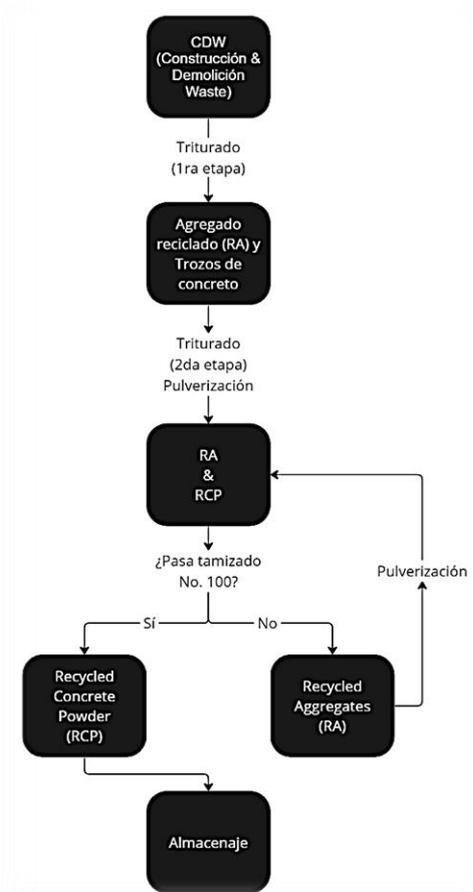


Figura II.4: Flujograma de elaboración del RCP.
Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.3. AGUA

El agua utilizada para la elaboración del concreto es prácticamente cualquier agua natural potable que no presente sabor ni olor fuerte. Sin embargo, aguas que no sean consideradas potables también pueden llegar a ser utilizadas en el concreto, las cuales deberán cumplir parámetros químicos opcionales establecidos por la ASTM C1602 (2022) y NTP 339.088 (2019) (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

El agua utilizada para los ensayos de laboratorio proviene de la red de agua potable del Laboratorio No.1 Ensayo de Materiales, cuyo parámetro pH es presentado en la Tabla II.3.

Tabla II.3: Parámetro pH del agua utilizada.

PARÁMETRO	MUESTRA
pH	7

Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.4. AGREGADOS

En concretos estructurales comunes, la importancia de los agregados, así como su tipo y calidad no puede subestimarse, dado que ocupan un aproximado del 70% al 75% del volumen total del concreto y definen en gran medida las propiedades de este en estado endurecido (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004). El resto está conformado por la pasta endurecida, agua no combinada y vacíos de aire. Por esta razón, es fundamental conocer la correcta gradación y calidad de estos áridos (Nilson, 1999).

El agregado fino y grueso empleados en la presente tesis fueron obtenidos en una ferretería. En el caso del agregado fino consiste en arena gruesa para construcción, mientras que el agregado grueso, consiste en confitillo. A continuación, son presentados los ensayos de control de calidad correspondientes para validar su uso.

2.3.1.4.1. Granulometría

Tiene por objetivo determinar la distribución del tamaño de las partículas de un agregado, la cual se determina mediante el uso de tamices estandarizados por la ASTM C136. Esta distribución granulométrica está directamente relacionada con las propiedades que tendrá el concreto, su demanda de agua y su costo por metro cúbico (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Los límites granulométricos establecidos por la ASTM C33 para los agregados finos se presentan a continuación en la Tabla II.4 y para los agregados gruesos en la Tabla II.5.

Tabla II.4: Límites granulométricos para el agregado fino - ASTM C33.

MALLA	PORCENTAJE QUE PASA (%) (ASTM C33)
9.5 mm. (3/8")	100
4.75 mm. (N°4)	95 - 100
2.36 mm. (N°8)	80 - 100
1.18 mm. (N°16)	50 - 85
600 µm. (N°30)	25 - 60
300 µm. (N°50)	5 - 30
150 µm. (N°100)	0 - 10

Fuente: Adaptación de la ASTM C33

Tabla II.5: Límites granulométricos para el agregado grueso - ASTM C33.

TAMIZ (in.)	HUSOS GRANULOMÉTRICOS (ASTM C33)														
	1	2	3	357	4	467	5	56	57	6	67	7	8	89	9
4"	100														
3 1/2"	90 a 100														
3"		100													
2 1/2"	25 a 60	90 a 100	100	100											
2"		35 a 70	90 a 100	95 a 100	100	100									
1 1/2"	0 a 15	0 a 15	35 a 70		90 a 100	95 a 100	100	100	100						
1"			0 a 15	35 a 70	20 a 55		90 a 100	90 a 100	95 a 100	100	100				
3/4"	0 a 5	0 a 5			0 a 15	35 a 70	20 a 55	40 a 85		90 a 100	90 a 100	100			
1/2"			0 a 5	10 a 30			0 a 10	10 a 40	25 a 60	20 a 55		90 a 100	100	100	
3/8"					0 a 5	10 a 30	0 a 5	0 a 15		0 a 15	20 a 55	40 a 70	85 a 100	90 a 100	100
N°4				0 a 5		0 a 5		0 a 5	0 a 10	0 a 5	0 a 10	0 a 15	10 a 30	20 a 55	85 a 100
N°8									0 a 5		0 a 5	0 a 5	0 a 10	5 a 30	10 a 40
N°16													0 a 5	0 a 10	0 a 10
N°50														0 a 5	0 a 5
N°100															
TMN	87.5	62.5	50	50	37.5	37.5	25	25	25	19	19	12.5	9.5	9.5	4.75

Fuente: Adaptación de la ASTM C33.

Los resultados del análisis granulométrico realizado a los agregados a emplear, según las normativas NTP 400.012 y ASTM C136, se presentan en la Tabla II.6 y Tabla II.7; mientras que sus respectivas curvas granulométricas se presentan en las Figura II.5 y Figura II.6.

Tabla II.6: Análisis granulométrico del agregado fino utilizado.

MALLA	PESO RETENIDO (g)	% RET.	% RET. ACUM.	% PASA
3/8"	0.00	0.00	0.00	100.00
N°4	17.80	2.97	2.97	97.03
N°8	92.40	15.40	18.37	81.63
N°16	143.60	23.93	42.30	57.70
N°30	140.40	23.40	65.70	34.30
N°50	107.10	17.85	83.55	16.45
N°100	57.30	9.55	93.10	6.90
FONDO	41.40	6.90	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla II.7: Análisis granulométrico del agregado grueso utilizado.

MALLA	PESO RETENIDO (g)	% RET.	% RET. ACUM.	% PASA
3/4"	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	4.80	0.12	0.12	99.88
3/8"	15.50	0.39	0.51	99.49
N°4	2783.70	69.59	70.10	29.90
N°8	951.00	23.78	93.88	6.13
N°16	89.30	2.23	96.11	3.89
N°30	52.70	1.32	97.43	2.58
N°50	36.60	0.92	98.34	1.66
N°100	28.20	0.71	99.05	0.95
FONDO	38.20	0.96	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia.

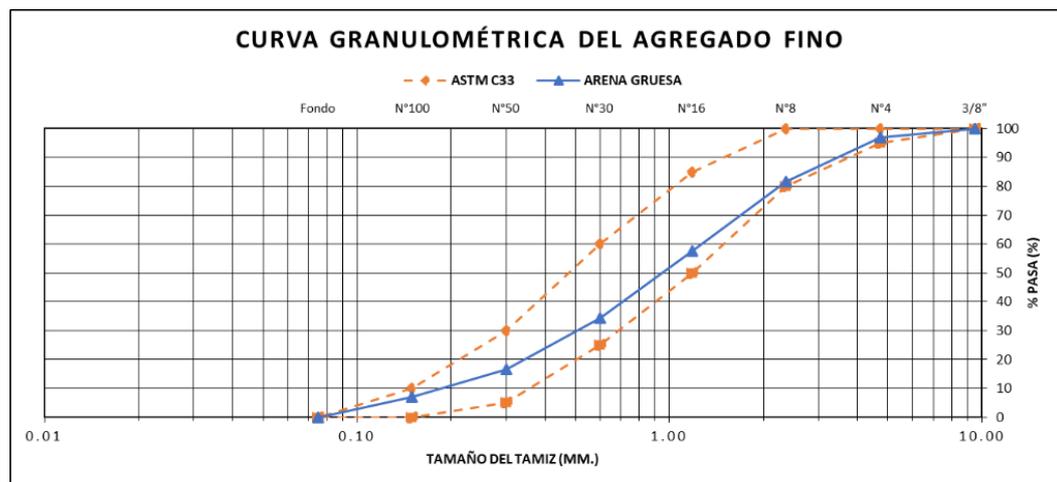


Figura II.5: Curva granulométrica del agregado fino utilizado.

Fuente: Elaboración propia.

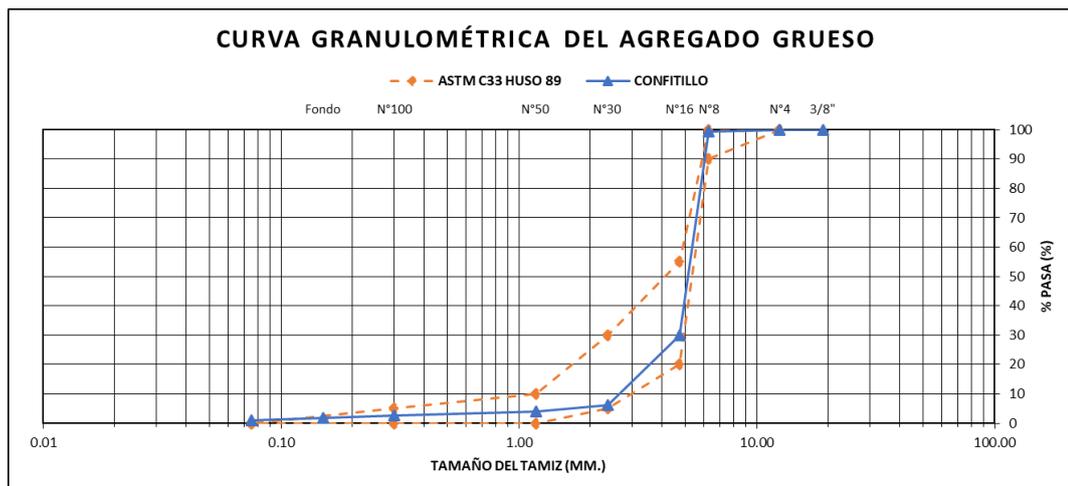


Figura II.6: Curva granulométrica del agregado grueso utilizado.
Fuente: Elaboración propia.

Módulo de Finura

Una vez realizado el análisis granulométrico de un agregado se puede calcular un índice numérico conocido como Módulo de Finura, el cual se computariza como la suma de los pesos retenidos acumulados en las mallas y/o tamices 3", 1 1/2", 3/4", 3/8", No.4, No.8, No.16, No.30, No.50, No.100 (NTP 400.012, 2013). Mediante este índice se brinda una idea aproximada de cuan fino es un agregado en particular. (ACI Education Bulletin E1-07, 2007)

2.3.1.4.2. Peso Específico y Porcentaje de Absorción

El peso específico hace referencia a la relación entre la masa de un agregado y la masa de agua con el mismo volumen absoluto. Este parámetro es bastante útil para el proporcionamiento y control en mezclas de concreto, y brinda una idea de cuan poroso puede ser un agregado en particular (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

El porcentaje de absorción es un concepto ligado al contenido de humedad de un agregado, ya que hace referencia a la capacidad que tiene dicho material para absorber agua hasta que sus vacíos estén completamente saturados (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Los resultados del ensayo de peso específico y porcentaje de absorción para los agregados a utilizar en la presente investigación, conforme con las normativas ASTM C127, ASTM C128, NTP 400.021 y NTP 400.022, se muestran en la Tabla II.8 y Tabla II.9.

Tabla II.8: Peso Específico y Porcentaje de Absorción del Agregado Fino utilizado.

PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO		
Peso de la arena superficialmente seca	g	500.0
Peso de la arena superficialmente seca + Peso del balón + Peso del agua	g	1007.4
Peso del balón	g	193.1
Peso del agua	g	314.3
Peso de la arena seca al horno	g	493.4
Volumen del balón	mL	500.0
Peso específico de masa	g/cm³	2.66
Peso específico de masa superficialmente seca	g/cm³	2.69
Peso específico aparente	g/cm³	2.75
Porcentaje de absorción	%	1.34

Fuente: Elaboración propia.

Tabla II.9: Peso Específico y Porcentaje de Absorción del Agregado Grueso utilizado.

PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO GRUESO		
Peso de la muestra secada al horno	g	3450.6
Peso de la muestra saturada superficialmente seca	g	3500.0
Peso de la muestra saturada en agua	g	2272.5
Peso específico de masa	g/cm³	2.81
Peso específico de masa superficialmente seca	g/cm³	2.85
Peso específico aparente	g/cm³	2.93
Porcentaje de absorción	%	1.43

Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.4.3. Peso Unitario

El peso unitario hace referencia a la masa que ocupa el agregado (partículas y vacíos) en un determinado volumen unitario específico. Este parámetro varía de acuerdo con muchos factores, entre ellos, la angularidad y tamaño del agregado. En función al tipo de consolidación que se aplique al material se obtendrá dos resultados: suelto y compactado (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Los resultados del peso unitario suelto y compactado realizados para los agregados a utilizar en la presente investigación, conforme con las normativas ASTM C29 y NTP 400.017, se muestran a continuación en la Tabla II.10.

Tabla II.10: Peso Unitario del agregado fino y grueso utilizado.

	PESO UNITARIO SUELTO		PESO UNITARIO COMPACTADO	
	AGREGADO FINO	AGREGADO GRUESO	AGREGADO FINO	AGREGADO GRUESO
Peso de la muestra y Recipiente (g)	6272.6	5493.9	6670.0	5873.6
Peso del recipiente (g)	1572.5	1572.5	1572.5	1572.5
Peso de la muestra (g)	4700.1	3921.4	5097.5	4301.1
Volumen del recipiente (ft³)	0.1	0.1	0.1	0.1
Peso Unitario (kg/m³)	1660	1385	1800	1519

Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.4.4. Contenido de Humedad

El contenido de humedad hace referencia al agua atrapada dentro de los vacíos del agregado. En base a esto, el contenido de humedad puede abarcar cuatro estados diferentes: secado al horno, secado al aire, saturado superficialmente seco y húmedo, como se puede observar a continuación en la Figura II.7 (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).



Figura II.7: Estados de humedad en los agregados.

Fuente: Diseño y Control de Mezclas de Concreto (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Los resultados del ensayo de contenido de humedad realizado, conforme con las normativas ASTM C566 y NTP 339.185, se muestran a continuación en la Tabla II.11.

Tabla II.11: Contenido de Humedad de los agregados fino y grueso utilizados.

	CONTENIDO DE HUMEDAD	
	AG. FINO	AG. GRUESO
Peso de la muestra (g)	500	4000
Peso de la muestra secada (g)	488.4	3958.6
Peso del agua (g)	11.6	41.4
Contenido de humedad (%)	2.38	1.05

Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.4.5. Abrasión

La resistencia a la abrasión de un agregado brinda principalmente una percepción de la calidad y resistencia de este. Este parámetro es importante cuando el concreto a diseñar estará sujeto a efectos abrasivos (desgastes), sea por ejemplo el caso de los pavimentos. (ASTM C131, 2020)

Los resultados del ensayo de abrasión para el agregado grueso utilizado, conforme con la ASTM C131, se presentan en la Tabla II.12.

Tabla II.12: Abrasión para el agregado grueso utilizado.

ABRASIÓN	
Método de Ensayo	D
Cantidad de Esferas	6
Peso al comienzo del ensayo (g)	5000.0
Peso posterior a 100 rev. (g)	4804.4
Peso posterior a 500 rev. (g)	4199.6
Pérdida por abrasión e impacto (%)	16.01
Coefficiente de uniformidad	0.24

Fuente: Elaboración Propia.

2.3.1.4.6. Durabilidad

La durabilidad en agregados hace referencia a la habilidad que tienen estos para resistir eventos externos agresivos vinculados especialmente al clima, climas extremadamente fríos, por ejemplo, los cuales generan un deterioro interno del concreto debido a efectos de hielo y deshielo del agua dentro de los agregados que conforman el concreto. (ACI Education Bulletin E1-07, 2007)

2.3.1.4.7. Material pasante de la Malla No.200 (75 µm)

El material pasante por la Malla No.200 (75 µm) hace referencia al material cuyo tamaño de partículas es menor a 75 µm, lo cual genera en el concreto un mayor requerimiento de agua y por ende una baja en su resistencia y calidad. (ACI Education Bulletin E1-07, 2007)

Los resultados del ensayo de Malla No.200 (75 µm) para los agregados grueso y fino utilizados, conforme con la ASTM C117, se presentan en la Tabla II.13.

Tabla II.13: Malla No.200 para el agregado fino y grueso utilizados.

	% PASANTE MALLA No.200	
	AGREGADO FINO	AGREGADO GRUESO
Peso inicial seco (g):	700.0	1000.0
Peso seco lavado (g):	655.1	975.9
% Pasa Malla No.200 (%):	6.41	2.4

Fuente: Elaboración Propia.

2.3.1.4.8. Partículas desmenuzables y Terrones de arcilla

Las partículas desmenuzables en los agregados hacen referencia a aquellas aglomeraciones arcillosas del tamaño de los agregados que no oponen resistencia frente al frotamiento o niveles de esfuerzo bajos que pueden ejercerse con las manos, lo cual en el concreto no aportará resistencia alguna (NTP 400.015, 2013).

Los resultados del ensayo de partículas desmenuzables y terrones de arcilla para los agregados utilizados, conforme con la NTP 400.015, se presentan en la

Tabla II.14: Partículas Desmenuzables y Terrones de Arcilla para el agregado fino y grueso utilizados

	UNIDAD	% PARTÍCULAS DESMENUZABLES Y TERRONES DE ARCILLA	
		GRUESO	FINO
Tamiz	in.	3/8" - N°4	N°4 - N°16
Peso inicial	g.	1000	200
Peso final	g.	992.6	198.1
TA y PF	%	0.74	0.95

Fuente: Elaboración Propia.

2.3.1.4.9. Impurezas orgánicas

Las impurezas orgánicas, incluidas dentro de un grupo mayor conocido como "Sustancias Dañinas en Agregados", hacen referencia a aquellos contaminantes que se adhieren a los agregados, por lo general durante su transporte, y que pueden resultar en la producción de manchas o hinchamientos en la superficie del concreto. (ACI Education Bulletin E1-07, 2007)

Los resultados del ensayo de impurezas orgánicas para el agregado utilizado, conforme con la ASTM C40, se presentan en la Figura II.8.



Figura II.8: Impurezas orgánicas en el agregado fino utilizado.
 Fuente: Elaboración propia.

Tabla II.15: Impurezas orgánicas del agregado fino utilizado.

MUESTRA	PATRÓN	OBSERVACIONES
ARENA FINA	INCOLORO	No presenta impurezas orgánicas.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.5. ADITIVOS

Existen diversidad de aditivos químicos, los cuales se emplean durante el proceso de mezclado con la finalidad de mejorar las propiedades y el comportamiento del concreto resultante. Estos aditivos deben cumplir con los requerimientos expresos en la ASTM C494 “*Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*” (Nilson, 1999).

En la presente investigación únicamente se ha empleado un tipo de aditivos. Cumpliendo con los requisitos de las normas ASTM C494. En base a la ficha técnica, la información del aditivo es presentada a continuación.

2.3.1.5.1. Aditivo Plastificante

SikaCem® Plastificante es un aditivo líquido para elaborar morteros y concretos fluidos y ayuda a reducir el agua del concreto incrementando la resistencia.

Pertenece a la clasificación “A”, aditivos reductores de agua. Diseño para mejorar la trabajabilidad, comportamiento y cohesión interna dentro del concreto. (Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**)

DISEÑO DE MEZCLA

El diseño de mezcla es el proceso mediante el cual se establecen y determinan las propiedades que se espera tenga el concreto una vez mezclado; estas propiedades pueden ser consideradas tanto en el estado fresco como en el estado endurecido de este material. Dentro de este diseño se realiza el proporcionamiento de los materiales (agregados, agua, cemento y aditivos) que se incluirán en el proceso de mezclado, de tal forma que la mezcla resultante posea propiedades adecuadas de trabajabilidad, durabilidad, resistencia, apariencia y, además de todo, que su elaboración sea económica (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

Dentro del diseño de mezcla se encuentran diversos métodos de diseño, entre los cuales están:

- Método del ACI,
- Método de Fuller,
- Método de Bolomey,
- Método del Agregado Global, entre otros.

En la presente investigación fue empleado el método de Bolomey, buscando la curva de optimización de la granulometría, la cual puede elaborarse por tanteo o en base a los módulos de finura de los agregados fino y grueso a utilizar. (Mosquera Gomez, 2019)

2.3.1.6. MÉTODO BOLOMEY

El método de Bolomey es considerado un perfeccionamiento del método propuesto por Fuller, en el cual se trabaja con una curva granulométrica ideal de la combinación de los áridos. Estas curvas granulométricas obedecen la ecuación siguiente:

$$y = a + (100 - a) \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Donde:

- y : %Pasa por el tamiz de apertura "d".
- d : apertura de cada uno de los tamices de la serie utilizada.
- D : TMN del árido.

- a : Parámetro empírico definido en base al tipo de árido y consistencia del concreto resultante.

Tipo de árido	Consistencia	Valores de a
Rodado	Seco-plástica	10
	Blanda	11
	Fluida	12
Machaqueo	Seco-plástica	12
	Blanda	13
	Fluida	14

Figura II.9: Coeficiente A para diferentes texturas de agregado y consistencias de concreto.
Fuente: (Mosquera Gomez, 2019)

Al ser este método, una mejora al método de Fuller, los datos a utilizar para la dosificación, cantidad de agua y lógica del método son los mismos que el de Fuller.

Este método busca, al igual que el método de Fuller, reducir la utilización del cemento, y realizar un seguimiento a los agregados en base a su angulosidad (forma), tamaño y granulometría independiente, de tal forma que se diseñe un concreto económico, compacto y resistente.

2.3.1.7. MATERIAL CEMENTANTE Y AGUA

En un diseño de mezcla, un factor determinante de la calidad y trabajabilidad del concreto resultante es la relación entre el material cementante y el agua. Esta relación se encuentra establecida por el cociente entre el peso del agua y el peso del material cementante utilizado durante la mezcla (entiéndase por material cementante a materiales como el cemento portland, cementos adicionados, materiales cementicios suplementarios, entre otros). (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

En base a esta relación, en adelante llamada " a/c ", serán afectadas muchas propiedades en el concreto, siendo las más significativas la resistencia y la trabajabilidad. La resistencia por obtener en un diseño de mezcla variará de forma inversamente proporcional a la relación a/c ; mientras que la trabajabilidad variará de forma proporcional a dicha relación. Cabe resaltar que, según las condiciones a las cuales vaya a estar expuesto el concreto, la relación a/c estará restringida a ciertos valores como se observa en la Tabla II.16 y Tabla II.17. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

Tabla II.16: Condiciones de exposición del concreto.

Condición de Exposición	a/c máxima	F'c mínima.
Exposición a congelamiento-deshielo.	-	-
Baja permeabilidad estando expuesto al agua.	0.50	280 kgf/cm ²
Expuesto a congelamiento-deshielo en la condición húmeda y a descongelantes.	0.45	320 kgf/cm ²
Protección contra la corrosión del acero de refuerzo.	0.40	350 kgf/cm ²

Fuente: Diseño y Control de Mezclas de Concreto (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Tabla II.17: Requisitos para el concreto expuesto a Sulfatos del suelo y del agua.

Exposición a Sulfatos	%Masa de Sulfatos Solubles	Sulfatos en el agua (ppm)	Tipo de cemento	a/c máxima	F'c mínima.
Insignificante	Menor que 0.10	Menor que 150	Ningún tipo especial necesario	-	-
Moderada	0.10 a 0.20	150 a 1500	Cemento de moderada resistencia a sulfatos	0.50	280 kgf/cm ²
Severa	0.20 a 2.00	1500 a 10000	Cemento de alta resistencia a sulfatos	0.45	320 kgf/cm ²
Muy Severa	Mayor que 2.00	Mayor que 10000	Cemento de alta resistencia a sulfatos	0.40	360 kgf/cm ²

Fuente: Diseño y Control de Mezclas de Concreto (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

2.3.1.7.1. Selección de la relación a/c y contenido de agua

Para determinar la cantidad de material cementante y agua a emplear durante el mezclado, fue seleccionada una relación a/c que permitiera obtener una trabajabilidad suficiente sin perder de vista la resistencia del concreto resultante.

Por ello, con base en el Método de Diseño ACI para la selección de la relación a/c por resistencia, se eligió una proporción de 0.45; mientras que el agua de prueba fue establecida inicialmente en 230 litros de agua.

Una vez establecida la relación a/c se procedió a realizar mezclas de prueba, con el objetivo de ajustar el contenido de agua y aditivo plastificante en base a la consistencia de la mezcla. Los resultados de la mezcla de prueba y patrón son presentados en la Tabla II.18.

Tabla II.18: Mezcla de Prueba y Mezcla Patrón ($a/c=0.45$)

Materiales	Unidades	Prueba Slump No.1	Diseño Patrón	Diseño Final
Cemento	kg	511.11	533.33	533.33
Agua	L	224.89	232.53	231.15
Arena Gruesa	kg	634.35	575.75	575.75
Confitillo	kg	952.42	967.45	967.75
SikaCem®				7.47
Plastificante	kg	5.11	7.47	
Asentamiento	"	4	5	5
Textura	-	Ligeramente pastoso	Conforme	Conforme
Corrección de agua	L	0	-1.38	0

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Tabla II.18, la proporción inicial de agregados es de 40% para agregado fino y 60% para agregado grueso, lo cual resultó en una mezcla de concreto ligeramente pastosa, por lo que, para la muestra patrón, se consideró una proporción de agregados del 37.3% para agregados fino y 62.7% para agregado grueso, resultado esta vez en una consistencia normal. En cuanto al uso de aditivo, para la mezcla de prueba es de 1% en peso del cemento, lo cual produjo un Slump de 4", mientras que para la mezcla patrón se incrementó el agua de mezclado a 240 L y la dosificación del aditivo a 1.4% en peso del cemento, obteniéndose finalmente un Slump de 5".

Realizando la verificación de la relación agua/cemento, quedó para los diseños definitivos en 0.443.

2.3.1.8. PROPORCIÓN DE AGREGADOS GRUESO Y FINO

Para el diseño de mezcla, en base al diseño de prueba y diseño patrón realizados, el uso de agregados será proporcionado en 37.3% arena y 62.7% confitillo.

DISEÑOS Y DOSIFICACIONES DEFINITIVAS

Para la presente investigación, se empleó un diseño "Patrón" con relación agua/cemento (a/c) de 0.443 (véase la subsección "Selección de la relación a/c y contenido de agua").

Para cada variación del análisis respectivo con la adición de RCP, se mantuvo la relación a/c asumiendo que este material de reemplazo posee propiedades cementantes, sin embargo, no se considerará de igual forma para el uso del aditivo plastificante, el cual solo se encontrará en función del peso del cemento Portland.

Las dosificaciones finales de las mezclas de concreto se presentan a continuación en la Tabla II.19, en la cual se muestran los pesos secos de cada mezcla. Estos pesos se han corregido por humedad y absorción, dependiendo del estado y dosificación de los agregados.

Las identificaciones de mezcla variarán en base al tipo de diseño que se esté trabajando, siendo “P” para la mezcla patrón y “A.” seguido de la dosificación para las mezclas a analizar.

Las dosificaciones porcentuales de RCP correspondientes a cada diseño de análisis serán el doble de los números que identifican cada etiqueta, siendo por ejemplo la etiqueta A.3 correspondiente a una dosificación de RCP del 6%.

Tabla II.19: Dosificaciones finales de mezclas de concreto.

MATERIALES	UNIDADES	P	A.1	A.2	A.3	A.4	A.5
Cemento	kg	533.33	522.67	512.00	501.33	490.67	480.00
RCP	kg	0.00	10.67	21.33	32.00	42.67	53.33
Agua	L	232.53	232.68	232.83	232.98	233.13	233.28
Arena Gruesa	kg	575.75	575.07	574.40	573.73	573.06	572.38
Confitillo	kg	967.45	966.32	965.19	964.06	962.93	961.80
SikaCem® Plastificante	kg	7.47	7.32	7.17	7.02	6.87	6.72

Fuente: Elaboración propia.

CURADO DEL CONCRETO

El curado es la acción de mantener en óptimas condiciones de humedad y temperatura una mezcla cementicia, de tal forma que permita la hidratación hidráulica del cemento y, en caso de utilizarse, la hidratación de materiales puzolánicos en la mezcla, de tal forma que las propiedades del concreto puedan desarrollarse de forma correcta. El curado del concreto deberá prevenir el secado prematuro de su superficie por un periodo no inferior a 7 días en diseños tradicionales y 3 días en diseños de alta resistencia (ACI 308R, 2016).

CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

ENSAYOS QUÍMICOS

3.1.1.1. PRUEBA DE CARBONATACIÓN Y PH DEL RCP

Los resultados de la presente investigación, correspondiente a los ensayos de carbonatación y pH, se muestran a continuación en la Figura III.1 y la Tabla III.1.



Figura III.1: Ensayo de Carbonatación y pH del RCP.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.1: Resultados de Carbonatación y pH del RCP.

	ENSAYOS QUÍMICOS		
	UNIDADES	CARBONATACIÓN	PH
Peso de la muestra	gr	3	2
Agua destilada	mL	-	100
Concentración de fenolftaleína (%)	%	5%	-
Coloración	-	Rojo Grosella	-
pH	-	-	12
Tipo pH	-	Básico	Básico

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados presentados en la Tabla III.1, se puede observar que el pH del RCP es básico, similar en valor al pH del Cemento Portland Tipo I (provisto en fichas técnicas).

3.1.1.2. ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X (XRD)

Los resultados de la presente investigación, correspondientes al ensayo XRD, se muestran en la Figura III.2 y la Figura III.3.

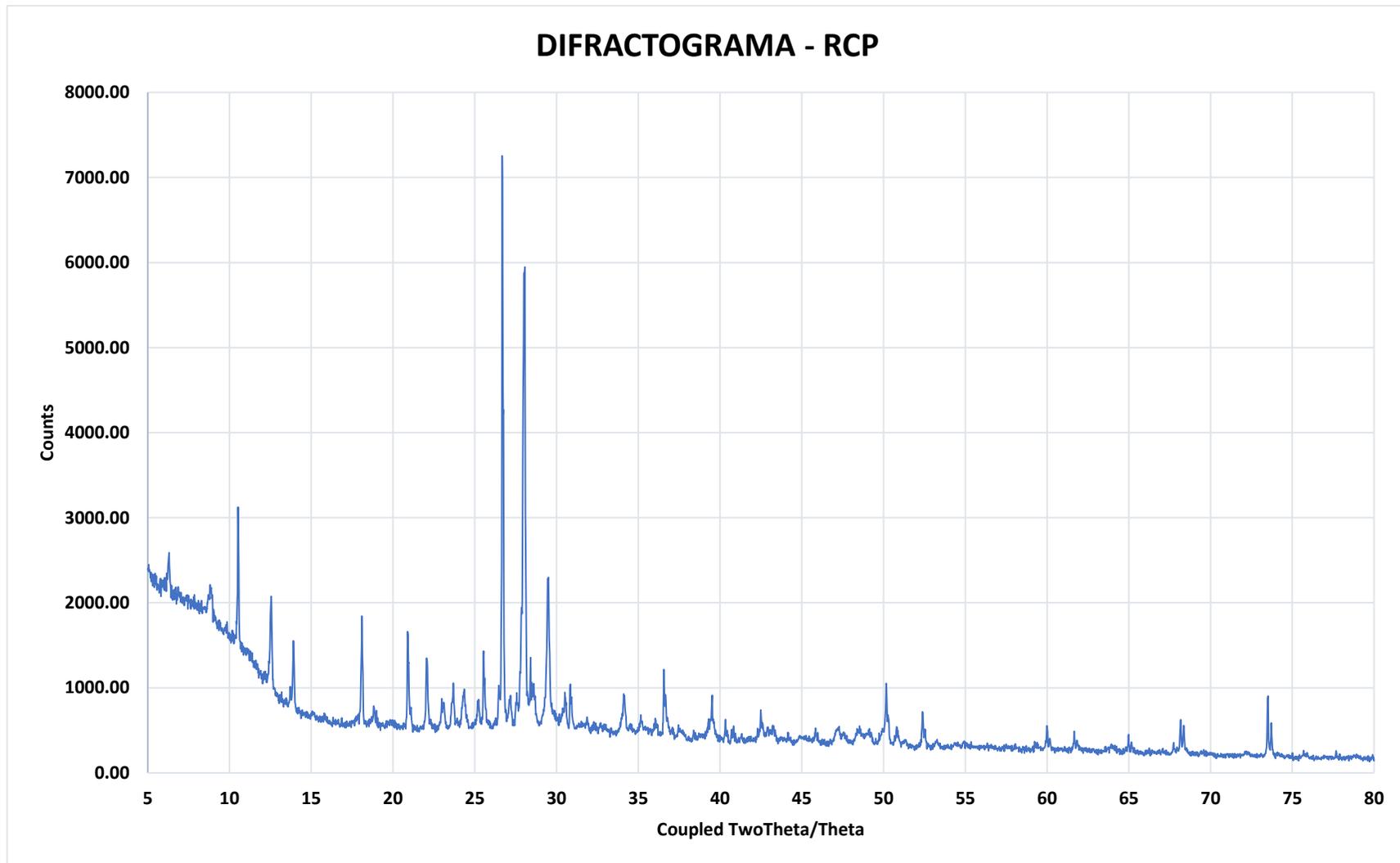


Figura III.2: Resultados del ensayo de Difracción de Rayos X (XRD) para el RCP.
Fuente: Elaboración Propia

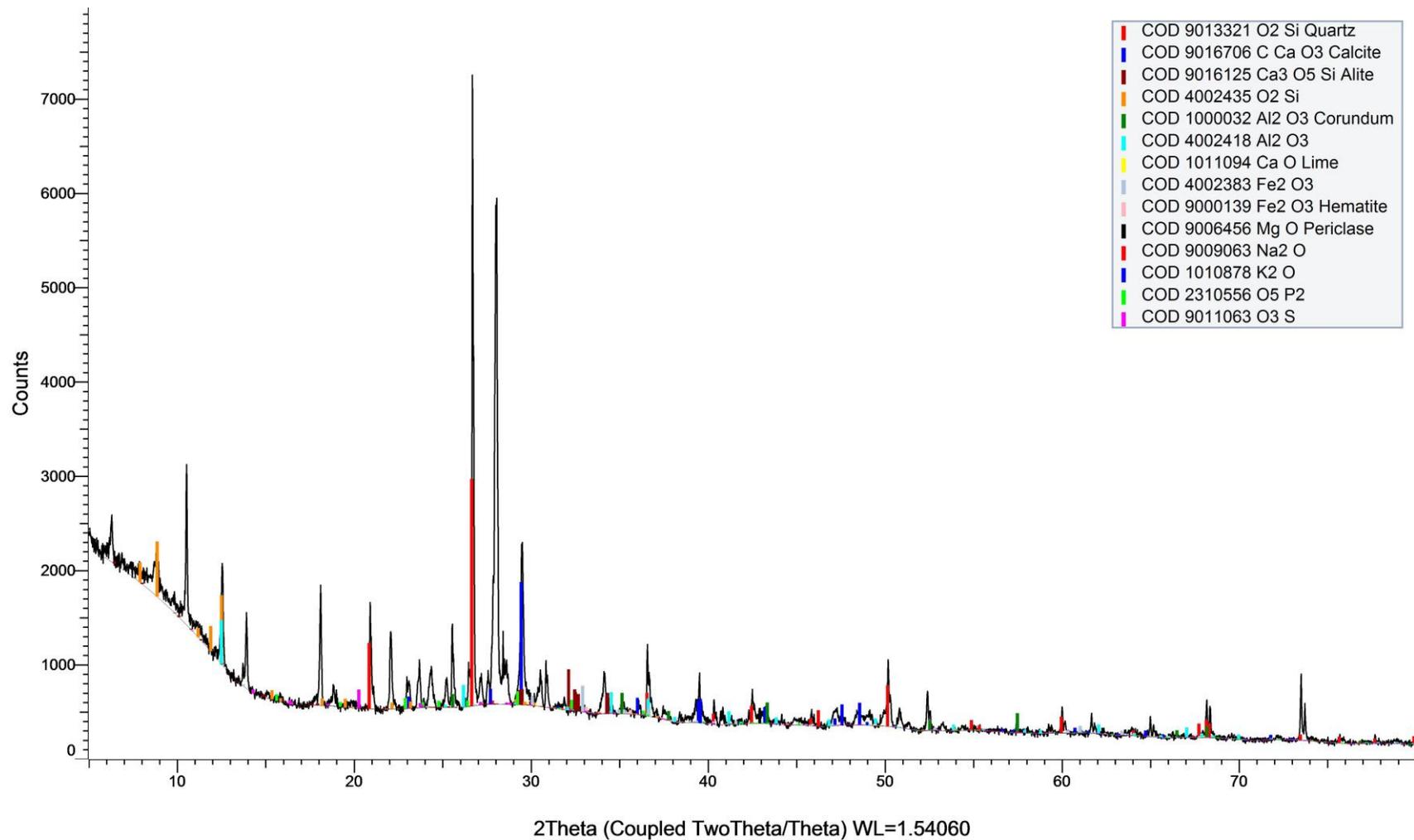


Figura III.3: Identificación Posibles Fases Cristalinas para el Difractograma XRD de una muestra de RCP (véase Figura III.2).
Fuente: Elaboración Propia.

De los resultados presentados en la Figura III.3, se puede observar que la fase cristalina con mayor presencia en la muestra de RCP analizada corresponde al Cuarzo (*Quartz*), mineral formado por óxido de silicio (SiO_2), seguido de la calcita (CaCO_3), además de minerales como Al_2O_3 , Fe_2O_3 y periclusa (MgO) en menores proporciones. Cabe destacar que estas fases cristalinas también se encuentran presentes en los difractogramas XRD realizados al cemento portland en investigaciones precedentes.

ENSAYOS EN CEMENTOS Y MORTEROS

3.1.1.3. ENSAYO DE ACTIVIDAD PUZOLÁNICA

El ensayo de actividad puzolánica, cuyo procedimiento se encontró especificado en la normativa ASTM C311, realiza diferentes tipos de pruebas, tanto químicas como físicas, para Puzolanas Naturales y Cenizas Volantes. Al tratarse el RCP de concreto finamente molido, se consideró realizar a este tres de los ensayos de análisis indicados en la ASTM C311, siendo estos el ensayo de densidad, fluidez en morteros e índice de actividad de resistencia (*Strength Activity Index*).

3.1.1.3.1. Ensayo de Densidad del RCP

El ensayo de densidad en cementos será aplicado al material en estudio (*RCP*), a fin de determinar el peso del material por metro cúbico de este, compararlo con el cemento Portland a utilizar y emplearlo en el diseño de mezcla más adelante.

Este ensayo consiste en rellenar el material de estudio en un frasco Le Chatelier con gasolina hasta cierto nivel, y en base a la diferencia de peso entre las medidas inicial y final y el volumen del líquido poder determinar la densidad del material cementante dentro del recipiente (ASTM C188, 1995).

Los resultados de la presente investigación, correspondiente al ensayo de densidad del RCP, se muestran a continuación en la Figura III.4 y la Tabla III.2.



Figura III.4: Ensayo de Densidad del RCP.
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla III.2: Resultados de Densidad del RCP.

	UNIDADES	RCP No.100		RCP No.200	
Peso del frasco + gasolina	g	330.7	330.7	279.8	278.9
Volumen inicial del frasco	mL	0.40	0.40	0.60	0.40
Peso inicial del RCP	g	55.0	60.0	64.0	50.0
Volumen final del frasco	mL	21.2	23.0	24.8	19.2
Peso final del RCP	g	54.8	59.7	63.8	49.7
Densidad del RCP	g/cm ³	2.63	2.65	2.64	2.64
Densidad final del RCP	g/cm ³	2.6410		2.6400	

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados presentados en la Tabla III.2, es posible observar que el RCP posee una densidad media de 2.6405 g/cm³, valor aproximado al 85% de la densidad del Cemento Portland Tipo I.

3.1.1.3.2. Ensayo de fluidez en morteros

El ensayo de fluidez en morteros será aplicado para determinar la cantidad de agua requerida por un mortero con RCP, de tal forma que presente una manejabilidad similar a un mortero de cemento hidráulico estándar.

Este ensayo, normado por la ASTM C1437 y NTP 334.057, y aplicable en la ASTM C311, establece que la fluidez del mortero a analizar (aquel que posee el material puzolánico o SCM) deberá tener una desviación en el rango de $\pm 5\%$ del valor de fluidez correspondiente al mortero patrón (aquel que no posee modificación del material cementante) (ASTM C311, 2018).

Los resultados de la presente investigación, correspondiente al ensayo de fluidez de morteros, se presentan a continuación en la Figura III.5 y la Tabla III.3.



Figura III.5: Ensayo de fluidez en morteros.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.3: Resultados del ensayo de fluidez en morteros.

	MEZCLA PATRÓN (100% PC)		MEZCLA DE ANÁLISIS (80% PC + 20% RCP)	
	PRUEBA No. 1	PRUEBA No. 2	PRUEBA No. 1	PRUEBA No. 2
Medida inicial (mm)	101.60	101.60	101.60	101.60
Agua utilizada (mL)	242.0	242.0	258.6	257.5
Medidas diametrales (mm)	D1	156.95	152.70	164.10
	D2	162.00	154.70	163.90
	D3	162.15	153.10	162.25
	D4	156.60	157.40	162.30
Medida promedio (mm)	159.43	154.48	163.14	161.80
Fluidez obtenida	56.9%	52.0%	60.6%	59.3%

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados presentados en la Tabla III.3, es posible observar que con un contenido de agua de 257.5 mL se obtuvo la fluidez del mortero de análisis dentro del rango de $\pm 5\%$ de la fluidez del mortero patrón, lo cual dio a entender que la incorporación del RCP incrementará el consumo de agua en la mezcla.

3.1.1.3.3. Ensayo de compresión en morteros

El ensayo de compresión de morteros, normado por la NTP 334.051 y presente en la ASTM C311, fue empleado para medir el potencial de reactividad de un material puzolánico, mediante la comparación de resistencias a compresión a las edades de 7 y 28 días entre un mortero patrón (100% PC) y un mortero de análisis (80% PC + 20% RCP) (ASTM C311, 2018).

Los especímenes elaborados para el ensayo de compresión en morteros consisten en muestras cúbicas de 50 mm de longitud de arista, distribuidas y compactadas en dos capas dentro de moldes no absorbentes (NTP 334.051, 2019).

Los resultados y evidencias de la presente investigación, correspondiente al ensayo de compresión de morteros, se presentan a continuación en la Figura III.6, Figura III.7 y la Tabla III.4.



Figura III.6: Materiales empleados para la elaboración de cubos de morteros.
Fuente: Elaboración propia.



Figura III.7: Cubos de mortero patrón (100% PC) y mortero de análisis (80% PC + 20% RCP).
Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.4: Resultados del Ensayo de Compresión de Morteros.

ID	Resistencia promedio (kg/cm ²)	% Resistencia reducido
MP-V3 07	258.95	-
MP-V3 14	323.97	-
MP-V3 28	338.82	-
MP-V3 60	355.13	-
M1-V3 07	183.39	33.52%
M1-V3 14	210.88	33.55%
M1-V3 28	256.27	24.36%
M1-V3 60	266.33	25.01%

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados presentados en la Tabla III.4, es posible observar que se obtuvo una resistencia a la compresión a 7 días del mortero con RCP correspondiente al 66.48% de resistencia a la compresión a 7 días del mortero patrón, valor que se incrementa hasta el 74.99% de resistencia a la compresión a una edad de 60 días. Estos resultados confirman que el RCP no reacciona como el cemento portland puro a primera instancia, sin embargo, su presencia dentro de la mezcla de morteros empieza a notarse posterior a los 28 días.

ENSAYOS EN CONCRETO FRESCO

3.1.1.4. MUESTREO DE MEZCLAS DE CONCRETO FRESCO

Para el muestreo de diseños de mezclas de concreto fresco, se debe resaltar la importancia en la obtención de un volumen mínimo de diseño, correspondiente a 1 ft³; caso contrario, los resultados de los ensayos de control de calidad serán engañosos. Las muestras por obtener y utilizar deben seguir las normativas ASTM C172 y NTP 339.036.

El tiempo de obtención de la muestra no debe exceder los 15 minutos, siendo este periodo de tiempo entre la obtención de la primera y última muestra. Además, las muestras individuales deben ser homogeneizadas con una pala o espátula a fin de garantizar su uniformidad (ASTM C172, 2017).

El muestreo y elaboración de probetas de la presente investigación se muestran a continuación en la Figura III.8.



Figura III.8: Muestreo de mezclas de concreto.
Fuente: Elaboración propia.

Cabe resaltar que, para el muestreo de las muestras de concreto, el volumen de mezclado fue de 0.10 m³, valor calculado previamente para la obtención de 36 probetas de 10 cm x 20 cm (total de probetas por tanda de diseño), considerando un valor de pérdidas del 20%.

3.1.1.5. ASENTAMIENTO (SLUMP)

El ensayo de asentamiento fue originalmente desarrollado para medir la consistencia del concreto fresco. Bajo condiciones de laboratorio, el asentamiento (Slump) incrementa conforme se aumenta el contenido de agua en la mezcla (ASTM C143, 2020).

Los resultados de la presente investigación, correspondientes al ensayo de asentamiento, se muestran a continuación en la Figura III.9 y la Tabla III.5.



Figura III.9: Determinación del Slump en mezclas de concreto.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.5: Resultados de Slump para los diseños de mezcla realizados.

MEZCLA	ID	%ADICIÓN	Slump (in)
Patrón	P	0%	5.0
Análisis 1	A.1	2%	5.0
Análisis 2	A.2	4%	5.0
Análisis 3	A.3	6%	6.0
Análisis 4	A.4	8%	3.5
Análisis 5	A.5	10%	3.5

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados presentados en la Tabla III.5, se puede observar que el Slump se mantiene prácticamente constante hasta una dosificación del 6% de RCP, valor que en adelante disminuye con el incremento de dosificaciones del RCP

3.1.1.6. PESO UNITARIO DEL CONCRETO

Permite determinar la densidad y rendimiento del concreto fresco. Este ensayo es de vital importancia en campo, ya que ello permite conocer el volumen de vaciado requerido y el rendimiento de la mezcla de concreto.

Los resultados de la presente investigación, correspondientes al ensayo de peso unitario, se muestran a continuación en la Figura III.10 y la Tabla III.6.



Figura III.10: Determinación del peso unitario en mezclas de concreto.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.6: Resultados de los ensayos de peso unitario realizados.

MEZCLA	ID	%ADICIÓN	PU MEZCLA (kg/m ³)
Patrón	P	0%	2375
Análisis 1	A.1	2%	2353
Análisis 2	A.2	4%	2372
Análisis 3	A.3	6%	2375
Análisis 4	A.4	8%	2377
Análisis 5	A.5	10%	2373

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados presentados en la Tabla III.6, se puede observar que el P.U. para cada dosificación de RCP se mantuvo en valores cercanos al diseño patrón, los cuales no son significativos para las bajas dosificaciones empleadas.

3.1.1.7. CONTENIDO DE AIRE ATRAPADO

Permite determinar el contenido de aire (atrapado e incluido) en el concreto fresco, a partir un cambio volumétrico ejercido por cambios en la presión dentro del recipiente.

Los resultados de la presente investigación, correspondientes al ensayo de contenido de aire atrapado, se muestran a continuación en la Figura III.11 y la Tabla III.7.



Figura III.11: Determinación del contenido de aire en mezclas de concreto.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.7: Resultados de los ensayos de contenido de aire atrapado realizados.

MEZCLA	ID	%ADICIÓN	%AIRE
Patrón	P	0%	3.8%
Análisis 1	A.1	2%	4.4%
Análisis 2	A.2	4%	3.6%
Análisis 3	A.3	6%	3.1%
Análisis 4	A.4	8%	3.1%
Análisis 5	A.5	10%	1.8%

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados presentados en la Tabla III.7, se puede observar que el contenido de aire atrapado de las dosificaciones iniciales (2% y 4%) se acercan bastante al del patrón, mientras que este parámetro empezó a disminuir conforme aumenta la dosificación de RCP.

A su vez, en una vista combinada de los resultados del análisis en concreto fresco (Figura III.12), para los ensayos de Slump (Asentamiento), Peso Unitario Fresco y Porcentaje de Aire Atrapado, se observa que la mezcla denominada “Análisis 3” presentó un mejor comportamiento frente a las demás, con un Slump de 6”, Porcentaje de Aire atrapado del 3.1%, y Peso Unitario de 2375 kg/m³.

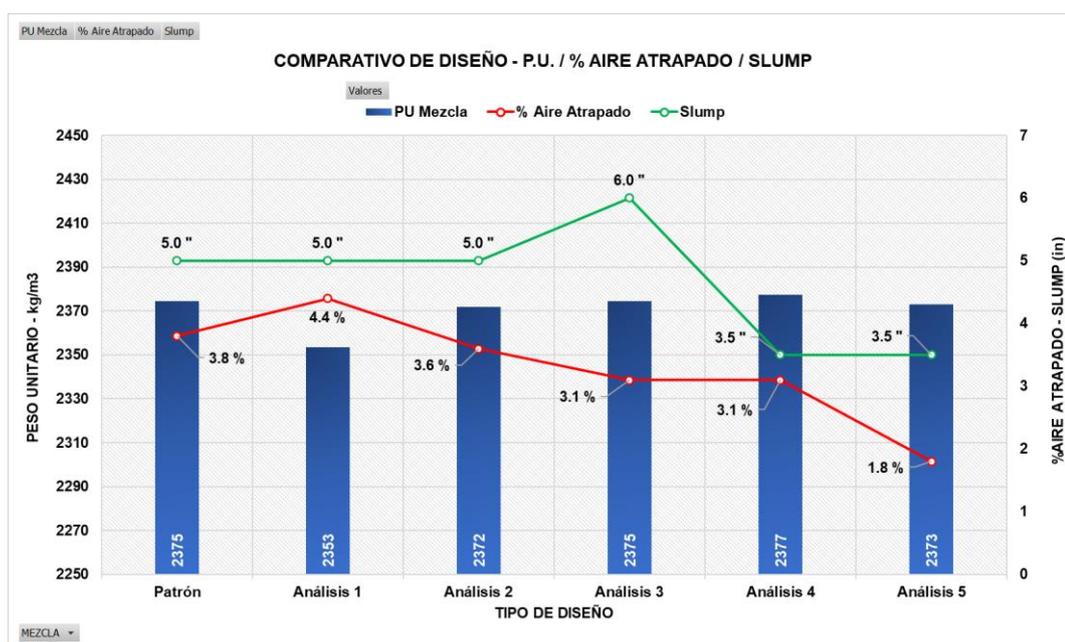


Figura III.12: Comparativo de P.U., %Aire Atrapado y Slump para cada diseño analizado.
 Fuente: Elaboración propia.

ENSAYOS EN CONCRETO ENDURECIDO

3.1.1.8. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (F'c)

La resistencia a la compresión del concreto es una medida de la cantidad de esfuerzo que este material requiere para fallar. Esta propiedad es, para muchos diseñadores e ingenieros en control de calidad, la más importante del concreto. Consecuentemente, analizando la composición interna de este material, la porosidad de cada componente del concreto puede convertirse en un limitante de su resistencia. Los agregados naturales, los cuales componen gran parte del volumen del concreto, son densos y resistentes, dejando como única limitante de resistencia del concreto a la pasta de cemento, la cual genera una zona de

transición entre la matriz cementante y los agregados, zona que suele determinar las características físicas de un concreto estándar (Mehta & Monteneiro, 2001).

La resistencia a la compresión del concreto se encuentra definida con la siguiente ecuación:

$$f'_c = \frac{4 * P_{m\acute{a}x}}{\pi * D_{prom}^2}$$

Donde:

- f'_c = Resistencia a la compresión, kg/cm².
- $P_{m\acute{a}x}$ = Carga axial máxima soportada, kgf.
- D_{prom} = Diámetro promedio de la muestra cilíndrica, cm.

Los resultados del ensayo de resistencia a la compresión, para las muestras elaboradas en la presente investigación, se presentan en la Figura III.13 y los datos de ensayo completos se presentan en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

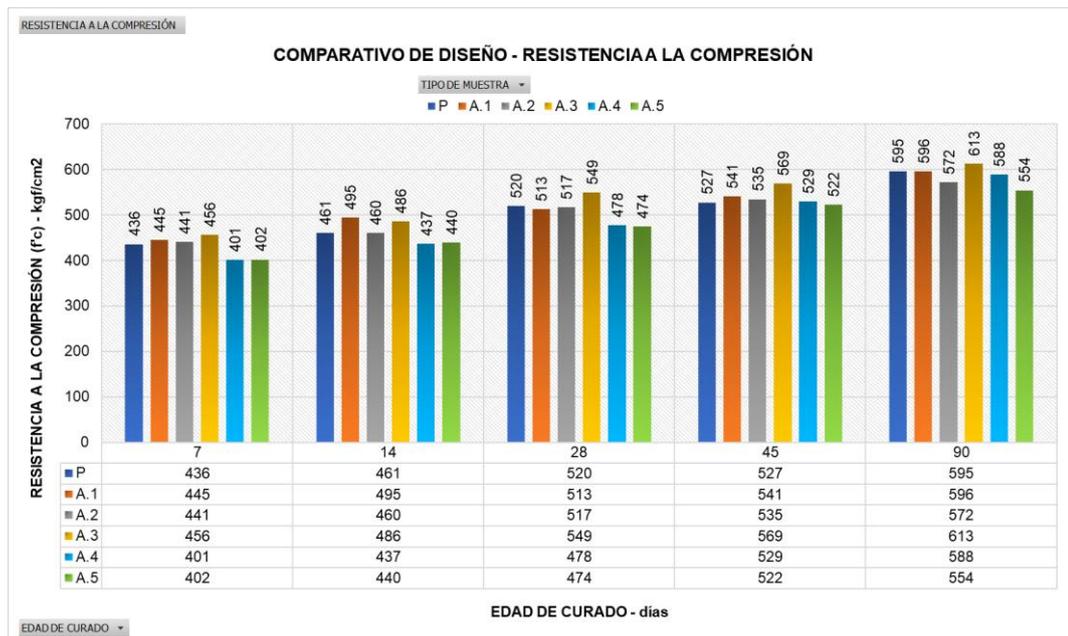


Figura III.13: Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión del concreto.
Fuente: Elaboración propia.

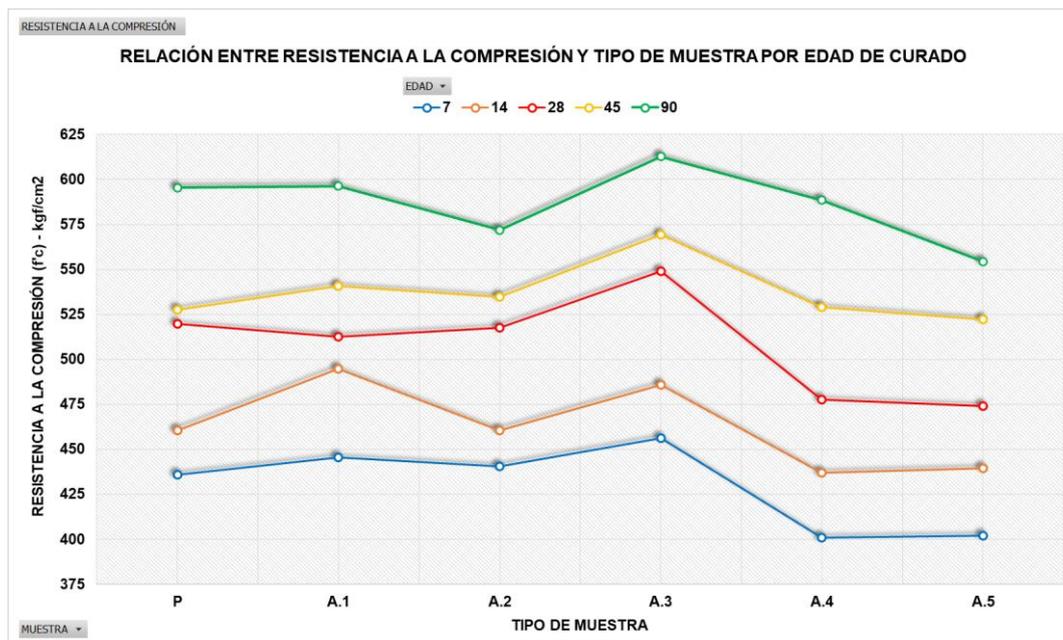


Figura III.14: Relación entre resistencia a la compresión y dosificación de RCP por edades de desarrollo del concreto.

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados presentados en la Figura III.13, se puede observar que la incorporación de RCP en el concreto produjo algunas mejoras y similitud de resultados a 28 y 90 días, los cuales no necesariamente varían proporcionalmente con la dosificación del RCP incorporado. Además, a pesar de que el RCP requirió de mayor contenido de agua para su hidratación, fue posible observar que no se produjeron deficiencias notables en cuanto a la resistencia a compresión, debido en gran parte por el aditivo utilizado.

De los resultados presentados en la Figura III.14, se puede observar que dosificaciones mayores al 6% de RCP produjeron bajones en la resistencia a la compresión a todas las edades de curado, mientras que, en la mayoría de los casos, la dosificación del 6% de RCP generó los mejores resultados de resistencia a la compresión, bajo lo cual queda asegurado que la óptima dosificación de RCP en reemplazo parcial del cemento Portland, en la presente investigación, es del 6%.

3.1.1.9. DENSIDAD, ABSORCIÓN Y VACÍOS

El ensayo de densidad, absorción y vacíos en el concreto endurecido puede ser realizado siguiendo el procedimiento de ensayo indicado en la ASTM C642. Este ensayo permite conocer la densidad SSS del concreto, valor que puede ser utilizado para el propósito de otros ensayos de control de calidad. Cabe resaltar

que posterior al proceso de hervido de los especímenes de ensayo ya no podrá realizarse ensayos como el de resistencia a la compresión. Adicionalmente, los valores de porcentaje de absorción y vacíos obtenidos podrán indicar si el concreto en cuestión puede o no utilizarse en zonas de clima frío, en las cuales ocurra el efecto de descascaramiento por hielo y deshielo.

Los resultados del ensayo de densidad, absorción y vacíos, para las muestras elaboradas en la presente investigación, se presentan en la Figura III.15 y los datos de ensayo completos se presentan en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

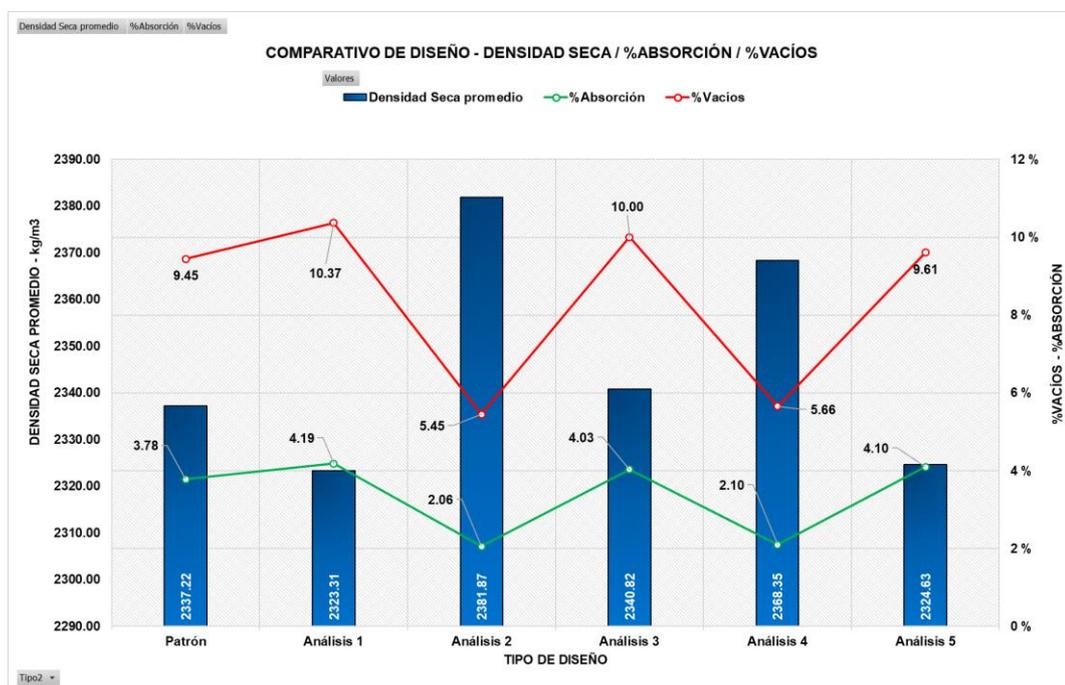


Figura III.15: Resultados del Ensayo de Densidad, %Absorción y %Vacíos en el concreto.
 Fuente: Elaboración propia.

De los resultados presentados en la Figura III.15, se puede observar que el diseño denominado “Análisis 3”, correspondiente a una incorporación del 6% de RCP, presentó parámetros de Densidad seca promedio, %Absorción y %Vacíos bastante similares al diseño “Patrón”, mientras que el diseño denominado “Análisis 2”, correspondiente a una incorporación del 4% de RCP, presentó una Densidad seca promedio superior en 2% y, %Absorción y %Vacíos de alrededor del 50% de los valores correspondientes al diseño “Patrón”.

3.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la investigación de Letelier et al. (2016), titulada “*Combined effects of Recycled Hydrated Cement and Recycled Aggregates on Mechanical Properties of Concrete*”, el uso del RHC a diferentes finuras y temperaturas de tratamiento junto a la incorporación de RAs, en la óptima combinación de estos parámetros (20% RAs + 5% RHC + 75 μ m RHC + 900°C RHC DT) se obtiene una disminución de la resistencia a la compresión del concreto del 10.9%, mientras que en la presente investigación el uso de RCP en la óptima combinación de parámetros (6% RCP) produce un incremento en la resistencia a la compresión del concreto del 4.6% y 5.6% y 3% a los 7, 28 y 90 días respectivamente.

Por otra parte, en la investigación de Horsakulthai, V. (2021), titulada “*Effect of recycled concrete powder on strength, electrical resistivity, and water absorption of self-compacting mortars*”, el uso de RCP al 20% de dosificación y la incorporación de aditivo superplastificante generó un índice de actividad de resistencia promedio del 89.4% y 87.2% a los 7 y 28 días respectivamente, cuyo valor fue disminuyendo conforme aumentaba la dosis incorporada de RCP, mientras que en la presente investigación, el índice de actividad de resistencia del RCP, en base a una dosificación de reemplazo del 20% del cemento Portland (acorde con la ASTM C311), dio valores promedio del 66.5% y 75.64% a los 7 y 28 días respectivamente (Tabla III.4). Puede observarse que, a pesar que en la investigación de Horsakulthai, V. el índice de actividad de resistencia entre 7 y 28 días fue mayor a los obtenidos en esta investigación, este disminuyó en un 2.2%; mientras que en esta investigación, el índice de actividad de resistencia aumentó aproximadamente en un 9%.

Además, acorde a los resultados presentados por Xiufeng et al. (2021), en su investigación titulada “*An accelerator prepared from waste concrete recycled powder and its effect on hydration of cement-based materials*”, la incorporación del SRP (*submicron RCP*), una variante más fina del RCP obtenida mediante tamizaje húmedo, generó resultados favorables de hasta 150% más de resistencia a una edad temprana de 12 horas, para una dosificación del 6% de SRP, mientras que a edades de 7 y 28 días esta ganancia fue debilitándose, pero aún así no mostró un efecto adverso en la resistencia futura; mientras que en la presente investigación, una dosificación del 6% de RCP (material no refinado como en la investigación de Xiunfeng et al.), presentó la misma ganancia de resistencia a la

edades de 7 y 28 días, y confirmó la estabilidad y no presencia de efectos adversos a edades futuras (90 días).

Finalmente, acorde con la investigación de Xiaoyan et al. (2022), "*Enhanced early hydration and mechanical properties of cement-based materials with recycled concrete powder modified by nano-silica*", la incorporación de RCP en una dosificación del 30% redujo la resistencia a la compresión del concreto en un 29%, debido a la disminución de los productos de hidratación del cemento portland. Sin embargo, dicha disminución en la resistencia pudo compensarse con la incorporación de 2% de NS (*nanosilica*). En la presente investigación, la óptima dosificación de RCP (6% de reemplazo del cemento portland) produjo un ligero incremento en la resistencia a la compresión, mientras que dosificaciones superiores de RCP (hasta un 10%) produjeron decrementos de hasta un 6.9% en este mismo parámetro, razón por la cual una incorporación del 30% de RCP sí podría generar la misma pérdida obtenida por Xiaoyan et al.

CAPÍTULO IV. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Con base en los resultados experimentales obtenidos en la presente investigación, se puede presentar los siguientes hechos.

1. De las gráficas presentas en la Figura III.13 y Figura III.14, la incorporación de RCP en el concreto produce fluctuaciones en la resistencia a la compresión, siendo éstas positivas en determinadas edades de ensayo y dosificaciones de RCP, mientras que en otras circunstancias son negativas respecto del diseño patrón.
2. De la gráfica presentada en la Figura III.15, la incorporación de RCP en el concreto produce variaciones en el porcentaje de vacíos (porosidad) una vez que la mezcla se encuentra seca; presentando valores que, en la mayoría de los casos, se mantienen cerca del 9.45% de vacíos del concreto patrón, pero que en dosificaciones del 4% y 8% por ejemplo, dicho parámetro presenta un valor del 5.45%.
3. De la gráfica presentada en la Figura III.12, la incorporación de RCP en el concreto no produce modificaciones en el asentamiento (*slump*) con dosificaciones menores al 4%, hecho que cambia completamente para dosificaciones del 6% (incremento en el asentamiento) y, 8% y 10% (decremento en el slump).

Por ello, fue posible contrastar la veracidad de la hipótesis planteada inicialmente. La incorporación de RCP en un diseño de mezcla sí influye en las propiedades del concreto como son la resistencia a la compresión, slump y porosidad.

CONCLUSIONES

En esta investigación, la resistencia a la compresión del concreto con RCP fue estudiado. Las conclusiones a continuación son alcanzadas con base a la evidencia experimental.

1. La relación entre las diferentes dosificaciones de RCP en el concreto y la resistencia a la compresión de este (Figura III.14) no fue constante a lo largo del tiempo, puesto que existieron edades a las cuales la resistencia a la compresión del concreto con RCP superó al concreto patrón y otras en las que su resistencia fue inferior a lo esperado; cumpliendo el incremento constante respecto del patrón en únicamente una dosificación trabajada de RCP.
2. La influencia de la incorporación del RCP como sustituto parcial del cemento portland, en dosificaciones menores o iguales al 6%, no necesariamente produce una disminución en la resistencia a la compresión del concreto, llegando a tener, en este parámetro, incrementos de hasta el 5.6%. Sin embargo, incorporar dosificaciones de RCP superiores al 6% sí generó decrementos de hasta un 8.8% a edades tempranas.

El valor óptimo de dosificación del RCP (Figura III.13), con el cual fue observado el mejor comportamiento en la resistencia a la compresión del concreto, en la mayoría de los casos, fue con la incorporación de un 6% en peso de diseño del cemento portland, produciendo mejorías en la resistencia a la compresión del 4.6% a edades tempranas (7 días) y 3% a edades tardías (90 días).

3. La relación entre las diferentes dosificaciones de RCP, el asentamiento y porosidad en el concreto no varía de forma constante para cada dosificación. El asentamiento y la porosidad máximos se dan para la dosificación de 6% de RCP.
4. El índice de actividad puzolánica, basado en el índice de actividad de resistencia (parámetro principal del ensayo de actividad puzolánica en base a la ASTM C311), poseía a 7 días valores de alrededor del 66.5% de resistencia del mortero patrón, mientras que a 28 días se observó un incremento leve de resistencia de en promedio 75.6% del mortero patrón, resultado que permite decir que existe una actividad puzolánica baja en morteros. Sin embargo, realizando una similitud del ensayo en concretos,

se pudo asegurar más la presencia de dicha actividad puzolánica con el contraste de los resultados presentados en esta investigación.

Adicionalmente, el análisis XRD indica una principal presencia de minerales como SiO_2 y CaO , los cuales son considerados como los más importantes para la actividad puzolánica de un material.

RECOMENDACIONES

De los resultados y conclusiones hechas en la presente investigación, las recomendaciones brindadas en base al análisis experimental realizado son las siguientes.

1. Si bien las dosificaciones menores al 10% utilizadas en esta investigación no generan pérdidas ni ganancias significativas en la resistencia a la compresión del concreto, es recomendable a futuro poder estudiar otros parámetros como son la resistencia a la flexión, resistencia a la tracción, tiempo de fragua, calor de hidratación, permeabilidad, entre otras propiedades.
2. Evaluar la actividad puzolánica del RCP mediante otros métodos de ensayo, ajenos a la ASTM C311, permitirá observar mejor el potencial de este material como SCM, puesto que este aún no se encuentra clasificado como un tipo específico de SCM.
3. El refinamiento del RCP puede ofrecer mejoras en su desempeño dentro del concreto, en especial cuando el tamaño de partículas es menor a los 75µm. Adicionalmente, evaluar el comportamiento del RCP mediante tratamiento térmico por debajo de los 1000°C también es otra posibilidad para observar su comportamiento como SCM, sin la incorporación adicional de otros materiales (RAs, NS, etc.).
4. Si bien el incremento de dosificaciones del RCP generaría resultados no tan favorables en la resistencia a la compresión, es recomendable estudiarlo a fin de observar cómo parámetros de resistencia a la tracción, elasticidad, creep, entre otros, pueden llegar a ser afectados con la inclusión de este material y, mediante la inclusión de otros SCM o incluso la incorporación de fibras, poder así contrarrestar más adelante sus efectos negativos en el concreto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 211.1. (2016). *Diseño de Mezclas de Concreto*. American Concrete Institute.
- ACI 308R. (2016). *Guide to External Curing of Concrete*. American Concrete Institute.
- ACI Education Bulletin E1-07. (2007). *Aggregates for Concrete*. American Concrete Institute.
- ASOCEM. (2022). *Introducción a las adiciones minerales*. Buenos Aires: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- ASTM C117. (2017). *Standard Test Method for materials finer than 75um (No.200) sieve in mineral aggregates by washing*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. Retrieved from <https://www.astm.org/>
- ASTM C127. (2015). *Standard Test Method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. Retrieved from <https://www.astm.org/>
- ASTM C128. (2015). *Standard Test Method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. Retrieved from <https://www.astm.org/>
- ASTM C131. (2020). *Standard Test Method for resistance to degradation of small-size aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. Retrieved from <https://www.astm.org/>
- ASTM C136. (2019). *Standard Test Method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. Retrieved from <https://www.astm.org/>
- ASTM C138. (2017). *Standard Test Method for density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. Retrieved from <https://www.astm.org/>
- ASTM C143. (2020). *Standard Test Method for slump of hydraulic-cement concrete*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. Retrieved from <https://www.astm.org/>

- ASTM C150. (2021). *Standard Specification for Portland Cement*. ASTM. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. Retrieved from <https://www.astm.org/>
- ASTM C1602. (2018). *Standard Specification for mixing water in the production of hydraulic-cement concrete*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. Retrieved from <https://www.astm.org/>
- ASTM C172. (2017). *Standard Test Method for Sampling Freshly Mixed Concrete*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. Retrieved from <https://www.astm.org/>
- ASTM C188. (1995). *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. Retrieved from <https://www.astm.org/>
- ASTM C231. (2017). *Standard Test Method for air content of freshly mixed concrete by the pressure method*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. Retrieved from <https://www.astm.org/>
- ASTM C29. (2017). *Standard Test Method for bulk density (unit weight) and voids in aggregate*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. Retrieved from <https://www.astm.org/>
- ASTM C311. (2018). *Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. Retrieved from <https://www.astm.org/>
- ASTM C33. (2018). *Standard Specification for concrete aggregates*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. Retrieved from <https://www.astm.org/>
- ASTM C39. (2021). *Standard Test Method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. Retrieved from <https://www.astm.org/>
- ASTM C40. (2020). *Standard Test Method for organic impurities in fine aggregates for concrete*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. Retrieved from <https://www.astm.org/>

- ASTM C494. (2019). *Standard Specification for chemical admixtures for concrete*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. Retrieved from <https://www.astm.org/>
- ASTM C566. (2019). *Standard Test Method for total evaporable moisture content of aggregate by drying*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. Retrieved from <https://www.astm.org/>
- ASTM C642. (2021). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. West Conshohocken: American Society of Testing and Materials. Retrieved from <https://www.astm.org/>
- Cagiao, J., Gómez, B., Domênech, J. L., Gutiérrez, S., Gutiérrez, H., Martínez, F., & González, M. B. (2010). *HUELLA ECOLÓGICA DEL CEMENTO. Cálculo de la huella ecológica de una industria cementera y propuesta de medidas de ingeniería sostenible destinadas a su reducción*. Laboratorio de Ingeniería Sostenible. España: LIS.
- Campdesuñer, C., Alena, B., & Antúnez, A. F. (2020, Octubre 25). *Cuba. Medio ambiente y desarrollo*. Retrieved from CMAD Web Site: <http://www.cmad.ama.cu/index.php/cmad/article/view/214>
- Cemento YURA. (2023). Obtenido de Patologías del concreto: <https://www.yura.com.pe/blog/patologias-del-concreto/>
- De Schepper, M., Snellings, R., De Buysser, K., Van, I., & De Belie, N. (2014, February 26). The hydration of cement regenerated from Completely Recyclable Concrete. *Construction and Buildings Materials - ELSEVIER*, 9. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.067
- Feng, Y., Li, J., Zhang, B., Fu, H., Chen, W., Xue, Z., . . . Xie, J. (2023, May 05). Concrete improvement incorporating recycled powder and aggregates treated via a combination of calcination and carbonation: The impact behaviors. *Journal of Cleaner Production - ELSEVIER*, 17. doi:10.1016/j.jclepro.2023.138069
- Gastaldi, D., Canonico, F., Capelli, L., Buzzi, L., Boccaleri, E., & Irico, S. (2015, April 11). An investigation on the recycling of hydrated cement from concrete demolition waste. *Cement & Concrete Composites - ELSEVIER*, 25. doi:10.1016/j.cemconcomp.2015.04.010

- Horsakulthai, V. (2021, October 02). Effect of recycled concrete powder on strength, electrical resistivity, and water absorption of self-compacting mortars. *Case Studies in Construction Materials - ELSEVIER*, 10. doi:10.1016/j.cscm.2021.e00725
- Kim, J., Nciri, N., Sicakova, A., & Kim, N. (2023, May 07). Characteristics of waste concrete powders from multi-recycled coarse aggregate concrete and their effects as cement replacements. *Construction and Building MATERIALS - ELSEVIER*, 12. doi:10.16/j.conbuildmat.2023.132525
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto* (1ra ed.). Illinois, EE.UU.: PCA.
- Kwon, E., Ahn, J., Cho, B., & Park, D. (2015, February 28). A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder. *Construction and Building MATERIALS - ELSEVIER*, 7. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.02.086
- LeBow, C. J. (2018). *Effect of Cement Content on Concrete Performance*. Fayetteville: University of Arkansas.
- Letelier, V., Tarela, E., Muñoz, P., & Moriconi, G. (2016, December 03). Combined effect of recycled hydrated cement and recycled aggregates on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building MATERIALS - ELSEVIER*, 11. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.010
- Martín, C., Manu, E., Hou, P., & Adu-Amankwah, S. (2023, March 28). Circular economy, data analytics, and low carbon concreting: A case for managing recycled powder from end-of-life concrete. *Resources, Conservation & Recycling - ELSEVIER*, 11. doi:10.1016/j.resconrec.2023.107197
- MeasurLabs. (2023). *What is the difference between XPS, XRF, and XRD?* Retrieved from Measurlabs Web Site: <https://measurlabs.com/>
- Mehta, P. K., & Monteneiro, P. J. (2001). *CONCRETE. Microstructure, Properties and Materials*. Mc Graw-Hill Education.
- Mokhtar, A., & Nasooti, M. (2020, January 15). A decision support tool for cement industry to select energy efficiency measures. *ENERGY STRATEGY - ELSEVIER*, 14. doi:10.1016/j.esr.2020.100458

- Mosquera Gomez, S. (2019). *Métodos de Optimización de muestras granulométricas utilizadas en el Diseño de Mezcla de Concreto Simple Hidráulico*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co>
- Nilson, A. H. (1999). *Design of Concrete Structures* (12va ed.). (E. Ariza H., Ed., & L. E. Yamin L., Trad.) Santafé de Bogotá, Colombia: Mc.Graw-Hill.
- NTG 41017 h21. (2013). *Metodo de ensayo. Determinación de la densidad, la absorción de agua y los vacíos en el concreto endurecido*. COGUANOR.
- NTP 334.003. (2017). *CEMENTOS. Procedimiento para la obtención de pastas y morteros de consistencia plástica por mezcla mecánica*. Ministerio de la Producción. Lima: INACAL. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe>
- NTP 334.005. (2018). *CEMENTOS. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento Pórtland*. Ministerio de la Producción. Lima: INACAL. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe>
- NTP 334.009. (2016). *CEMENTOS. Cemento Pórtland. Requisitos*. Ministerio de la Producción. Lima: INACAL. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe>
- NTP 334.051. (2019). *CEMENTOS. Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cemento Pórtland usando especímenes cúbicos de 50 mm de lado*. Ministerio de la Producción. Lima: INACAL. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe>
- NTP 339.034. (2015). *CONCRETO. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas*. Ministerio de la Producción. Lima: INACAL. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe>
- NTP 339.046. (2019). *CONCRETO. Método de ensayo para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico) del concreto*. Ministerio de la Producción. Lima: INACAL. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe>
- NTP 339.057. (2019). *CEMENTOS. Método de ensayo para determinar la fluidez de morteros de cemento Pórtland*. Ministerio de la Producción. Lima: INACAL. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe>

- NTP 339.088. (2019). *CONCRETO. Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento portland. Requisitos*. Ministerio de la Producción. Lima: INACAL. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe>
- NTP 339.183. (2013). *CONCRETO. Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio*. Ministerio de la Producción. Lima: INACAL. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe>
- NTP 339.185. (2002). *AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para contenido de humedad total evaporable de agregados por secado*. Ministerio de la Producción. Lima: INACAL. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe>
- NTP 339.187. (2018). *CONCRETO. Método de ensayo para determinar la densidad, absorción y porcentaje de vacíos en concreto endurecido*. Ministerio de la Producción. Lima: INACAL. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe>
- NTP 400.012. (2013). *AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregados fino, grueso y global*. Ministerio de la Producción. Lima: INACAL. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe>
- NTP 400.015. (2013). *AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para terrones de arcilla y partículas desmenuzables en los agregados*. Ministerio de la Producción. Lima: INACAL. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe>
- NTP 400.016. (2011). *AGREGADOS. Determinación de la inalterabilidad de agregados por medio de sulfato de sodio o sulfato de magnesio*. Ministerio de la Producción. Lima: INACAL. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe>
- NTP 400.017. (2020). *AGREGADOS. Método de ensayo para determinar la masa por unidad de volumen o densidad ("Peso Unitario") y los vacíos en los agregados*. Ministerio de la Producción. Lima: INACAL. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe>
- NTP 400.018. (2020). *AGREGADOS. Determinación de materiales más finos que pasan por el tamiz normalizado 75 μm (No.200) por lavado en agregados. Método de ensayo*. Ministerio de la Producción. Lima: INACAL. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe>

- NTP 400.019. (2020). *AGREGADOS. Determinación de la resistencia al desgaste en agregados gruesos de tamaños menores por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles. Método de ensayo*. Ministerio de la Producción. Lima: INACAL. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe>
- NTP 400.021. (2020). *AGREGADOS. Densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado grueso. Método de ensayo*. Ministerio de la Producción. Lima: INACAL. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe>
- NTP 400.022. (2013). *AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino*. Ministerio de la Producción. Lima: INACAL. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe>
- NTP 400.024. (2011). *AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar las impurezas orgánicas en el agregado fino para concreto*. Ministerio de la Producción. Lima: INACAL. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe>
- NTP 400.037. (2018). *AGREGADOS. Agregados para concreto. Requisitos*. Ministerio de la Producción. Lima: INACAL. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe>
- Nurdeen, A., Megat, M., & Syed, S. (2011). Strength Activity Index and Microstructural Characteristics of Treated Palm Oil Fuel Ash. *International Journal of Civil & Environmental Engineering (IJCEE - IJENS)*, 11(05), 8. Retrieved from <https://citeseerx.ist.psu.edu>
- Shen, Z., Zhu, H., Zhao, Z., Pang, S., Li, Z., Yang, S., . . . Lin, S. (2023, April 17). High-performance artificial aggregate prepared with recycled concrete powder and its impact on concrete properties. *Construction and Building MATERIALS - ELSEVIER*, 17. doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.133151
- Sika. (2013). *Sika Informaciones Técnicas - Aditivos para Concreto - Una visión actual*. Lima: Sika.
- Singh, M. (2018). Coal bottom ash. (R. Siddique, & P. Cachim, Eds.) *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete - ELSEVIER*, 48. doi:10.1016/B978-0-08-102156-9.00001-8.

- Sui, Y., Ou, C., Liu, S., Zhang, J., & Tian, Q. (2020). Study on Properties of Waste Concrete Powder by Thermal Treatment and Application in Mortar. *Applied Sciences - MDPI*, 10.
- Tabsh, S. W., & Abdelfatah, A. S. (2008, June 8). Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Buildings MATERIALS - ELSEVIER*, 5. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.06.007
- Tanash, A. O., Muthusamy, K., Yahaya, F., & Ismail, M. (30 de January de 2023). Potential of recycled powder from clay Brick, sanitary Ware, and concrete waste as a cement substitute for Concrete: An overview. *Construction and Building MATERIALS - ELSEVIER*, 22. doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.132760
- Torre, A. (2004). *Curso Básico de Tecnología del Concreto para Ingenieros Civiles*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima. Lima: UNI. Obtenido de <https://documents.pub/document/curso-basico-de-tecnologia-del-concreto.html>
- TWI. (2023). *What is X-ray diffraction analysis (XRD) and how does it work?* Retrieved from TWI web site: <https://www.twi-global.com>
- Xiaoyan, L., Li, L., Kai, L., Tianyu, L., Pingzhong, Z., Ruidan, L., . . . Surendra P., S. (2022, February 04). Enhanced early hydration and mechanical properties of cement-based material with recycled concrete powder modified by nano-silica. *Journal of Building Engineering - ELSEVIER*, 15. doi:10.1016/j.job.2022.104175
- Xiufeng, D., Huiyong, G., Hongbo, T., Xingyang, H., Zhengqi, Z., Ying, S., & Jin, Y. (2021, June 03). An accelerator prepared from waste concrete recycled powder and its effect on hydration of cement-based materials. *Construction and Building MATERIALS - ELSEVIER*, 12. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123767
- Yang, K.-H., Jung, Y.-B., Cho, M.-S., & Tae, S.-H. (2014, March 08). Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO2 emissions from concrete. *Construction and Building MATERIALS - ELSEVIER*, 10. doi:10.1016/j.jclepro.2014.03.018

Zhu, H., Shen, Z., Li, Z., Zhao, Z., Liang, S., Yang, S., . . . Ding, Y. (2023, March 21). Properties study of artificial aggregate with high-content recycled concrete powder. *Journal of Building Engineering - ELSEVIER*, 18. doi:10.1016/j.job.2023.107697

ANEXOS

Anexo A: Límites químicos opcionales para el agua de mezcla combinada.....	69
Anexo B: Hoja de datos SikaCem® Plastificante – Usos.	70
Anexo C: Hoja de datos SikaCem Plastificante® - Dosificación.....	71
Anexo D: Tabla completa de resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión del Concreto.	72
Anexo E: Tabla completa de resultados del Ensayo de Densidad, Absorción y Vacíos del Concreto.	77
Anexo F: Constancia de Análisis XRD del RCP.....	78

ANEXO A: LÍMITES QUÍMICOS OPCIONALES PARA EL AGUA DE MEZCLA COMBINADA.

Anexo A: Límites químicos opcionales para el agua de mezcla combinada.

Fuente: Tabla 2 (NTP 339.088, 2019)

Tabla 2 - Límites químicos opcionales para el agua de mezcla combinada^A

	Límite	Métodos de Ensayo
Concentración máxima en el agua de mezcla combinada, ppm ^B		
A. Cloruro como Cl ⁻ , ppm		
1 En concreto pretensado, tableros de puentes, o designados de otra manera.	500 ^C	NTP 334.086
2 Otros concretos reforzados en ambientes húmedos o que contengan aluminio embebido o metales diversos o con formas metálicas galvanizadas permanentes	1 000 ^C	NTP 334.086
B. Sulfatos como SO ₄ , ppm	3000	NTP 334.086
C. Álcalis como (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O), ppm	600	NTP 334.086
D. Sólidos totales por masa, ppm	50 000	ASTM C1603

^A Los límites de especificación de esta tabla no están prohibidos de ser especificados como elementos individuales o en conjunto de acuerdo con la sección sobre Información de pedido de la NTP 334.114 .

^B ppm es la abreviación de partes por millón.

^C Cuando el productor pueda demostrar que estos límites para el agua de mezcla pueden ser excedidos, se registrarán los requerimientos para el concreto Norma Técnica E-060 del Reglamento de Edificación. Para condiciones que permiten utilizar cloruro de calcio (CaCl₂) como aditivo acelerador, se permitirá que el comprador pueda prescindir de la limitación del cloruro.

^D Métodos de ensayo NTP 334.086 incluye referencia y métodos de ensayo alternativos para medir la concentración de cloruros, sulfatos, álcalis y en soluciones preparadas a partir de la disolución de materiales de cemento. Utilizar los métodos de ensayo aplicables en la NTP 334.086 para medir estos constituyentes. El laboratorio que realiza estas pruebas no está obligado a cumplir con los requisitos en materia de calificación de la NTP 334.086. Se permiten métodos instrumentales y métodos químicos húmedos alternativos que se señalan en la NTP 334.086 que miden la concentración de estas especies químicas en solución. Cuando se utilizan métodos alternativos, el método de ensayo utilizado se incluirá en el informe.

ANEXO B: HOJA DE DATOS SIKACEM® PLASTIFICANTE – USOS.

Anexo B: Hoja de datos SikaCem® Plastificante – Usos.
Fuente: Ficha Técnica SikaCem® Plastificante.



HOJA DE DATOS DEL PRODUCTO

SikaCem® Plastificante

Aditivo plastificante y reductor de agua para morteros y hormigones

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

SikaCem® Plastificante es un aditivo líquido para elaborar morteros y hormigones fluidos. Reduce agua del concreto incrementando la resistencia; NO CONTIENE CLORUROS, de modo que no corroe los metales.

USOS

SikaCem® Plastificante es recomendable para:

- Estructuras en general canales, diques, estructuras de fundación, columnas, vigas, tanques elementos prefabricados, losas, etc.)
- Cualquier tipo de estructura, cuando se desee aumentar las resistencias mecánicas o dar mayor fluidez al hormigón.

CARACTERÍSTICAS / VENTAJAS

En el hormigón fresco:

- Mejora la trabajabilidad del hormigón (plastifica), facilitando su colocación y compactación.
- Permite una reducción en la cantidad de agua de amasado en un 15% aproximadamente, lo que se manifiesta en un aumento de las resistencias mecánicas del hormigón endurecido.
- Aumento de la cohesión interna en el hormigón fresco, tendiendo a evitar la segregación de los áridos.
- Disminuye la exudación.

En el hormigón endurecido:

- Posibilita un incremento de las resistencias mecánicas a la compresión del orden de más del 15%.
- Reduce la contracción.
- Aumenta la adherencia al acero.

CERTIFICADOS / NORMAS

SikaCem® Plastificante cumple con la Norma ASTM C 494, tipo A y Tipo D

INFORMACIÓN DEL PRODUCTO

Base Química	Mezcla de lignosulfonatos y polímeros orgánicos.
Empaques	<ul style="list-style-type: none"> • Envase PET x 4 L • Balde x 20 L
Apariencia / Color	Líquido marrón oscuro
Vida Útil	1 año
Condiciones de Almacenamiento	En sus envases de origen, bien cerrados y no deteriorados, en lugares frescos y secos, a temperaturas entre + 5°C y + 30°C. Protegido del congelamiento, del calor excesivo y de la radiación solar directa.
Densidad	1.20 +/- 0.02

INFORMACIÓN TÉCNICA

Guía de Vaciado de Concreto Mezclar los materiales componentes del hormigón o mortero con parte del

Hoja De Datos Del Producto
SikaCem® Plastificante
Junio 2021, Versión 01.02
021302011000000829

ANEXO C: HOJA DE DATOS SIKACEM PLASTIFICANTE® - DOSIFICACIÓN.

Anexo C: Hoja de datos SikaCem Plastificante® - Dosificación.
Fuente: Ficha Técnica SikaCem® Plastificante

agua de mezclado, incorpore el contenido del DoyPack de SikaCem® Plastificante al pastón y complete con la menor cantidad de agua hasta lograr la fluidez requerida.
Para asegurar la homogeneidad del hormigón o mortero, se recomienda mezclar durante 3 minutos adicionales luego de incorporar todos los materiales componentes a la mezcladora.
Para mejorar el desempeño de morteros y hormigones se recomienda mantener la dosificación y proporción de los materiales componentes, Utilizar la menor cantidad de agua de mezclado hasta alcanzar la fluidez necesaria para la obra.
Cuidar que se cumplan las correctas condiciones de elaboración, colocación, compactación y curado.
La sobre-dosificación de SikaCem® Plastificante puede causar retardo de fragüe.
El desempeño de los aditivos pueden variar si se modifican los materiales componentes o sus cantidades.

INFORMACIÓN DE APLICACIÓN

Dosificación Recomendada

- Como plastificante: 250 mL por bolsa de cemento de 42.5 Kg.
- Como superplastificante: hasta 500 mL por bolsa de cemento de 42.5 Kg.

NOTAS

Todos los datos técnicos recogidos en esta hoja técnica se basan en ensayos de laboratorio. Las medidas de los datos actuales pueden variar por circunstancias fuera de nuestro control.

LIMITACIONES

Temperatura Ambiente +5°C mín. / +30°C máx.

ECOLOGÍA, SALUD Y SEGURIDAD

Para información y asesoría referente al transporte, manejo, almacenamiento y disposición de productos químicos, los usuarios deben consultar la Hoja de Seguridad del Material actual, la cual contiene información médica, ecológica, toxicológica y otras relacionadas con la seguridad

RESTRICCIONES LOCALES

Nótese que el desempeño del producto puede variar dependiendo de cada país. Por favor, consulte la hoja técnica local correspondiente para la exacta descripción de los campos de aplicación del producto

La información y en particular las recomendaciones sobre la aplicación y el uso final de los productos Sika son proporcionadas de buena fe, en base al conocimiento y experiencia actuales en Sika respecto a sus productos, siempre y cuando éstos sean adecuadamente almacenados, manipulados y transportados; así como aplicados en condiciones normales. En la práctica, las diferencias en los materiales, sustratos y condiciones de la obra en donde se aplicarán los productos Sika son tan particulares que de esta información, de alguna recomendación escrita o de algún asesoramiento técnico, no se puede deducir ninguna garantía respecto a la comercialización o adaptabilidad del producto a una finalidad particular, así como ninguna responsabilidad contractual. Los derechos de propiedad de las terceras partes deben ser respetados. Todos los pedidos aceptados por Sika Perú S.A.C. están sujetos a Cláusulas Generales de Contratación para la Venta de Productos de Sika Perú S.A.C. Los usuarios siempre deben remitirse a la última edición de la Hojas Técnicas de los productos; cuyas copias se entregarán a solicitud del interesado o a las que pueden acceder en Internet a través de nuestra página web www.sika.com.pe. La presente edición anula y reemplaza la edición anterior, misma que deberá ser destruida.

NOTAS LEGALES

Sika Perú
Habilitación Industrial
El Lúcumo Mz. "B" Lote 6
Lurín, Lima
Tel. (511) 618-6060

Hoja De Datos Del Producto
SikaCem® Plastificante
Junio 2021, Versión 01.02
02130201100000829

2 / 2

SikaCemPlastificante-es-PE-(06-2021)-1-2.pdf

CONSTRUYENDO CONFIANZA



ANEXO D: TABLA COMPLETA DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO.

Anexo D: Tabla completa de resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión del Concreto.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN					
ID	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga Máxima (kgf)	F'c (kgf/cm²)	Falla
P-07-C.1	10.06	20.66	34144	429.6	5
P-07-C.2	10.04	20.69	33924	428.5	5
P-07-C.3	10.04	20.59	33936	428.7	5
P-07-C.4	10.18	20.37	35561	437.3	5
P-07-C.5	10.20	20.45	36533	447.1	5
P-07-C.6	9.98	20.26	34714	443.8	5
P-14-C.1	10.17	20.60	37496	462.0	2
P-14-C.2	10.07	20.69	37084	466.1	5
P-14-C.3	10.00	20.54	35600	453.7	5
P-14-C.4	10.05	20.53	33424	421.3	5
P-14-C.5	10.07	20.59	36692	461.2	5
P-14-C.6	10.20	20.49	37561	460.1	5
P-28-C.1	10.25	20.62	42936	520.8	1
P-28-C.2	10.14	20.79	40123	497.3	2
P-28-C.3	9.99	20.93	42550	542.8	2
P-28-C.4	10.20	20.48	43434	531.5	2
P-28-C.5	10.18	20.22	42063	516.8	2
P-28-C.6	10.07	20.61	40443	508.3	2
P-45-C.1	9.98	20.77	40195	514.3	2
P-45-C.2	9.95	20.73	41267	530.7	2
P-45-C.3	10.21	20.69	42758	522.8	2
P-45-C.4	10.03	20.64	41323	523.5	2
P-45-C.5	10.05	20.42	41923	528.5	2
P-45-C.6	9.99	20.66	42695	544.7	5
P-90-C.1	10.04	20.58	47062	595.0	2
P-90-C.2	9.98	20.72	46291	592.4	1
P-90-C.3	10.17	20.42	48560	598.4	2
P-90-C.4	10.02	20.55	48294	613.1	2
P-90-C.5	9.98	20.66	46822	599.1	1
P-90-C.6	9.98	20.56	46346	592.5	1
A.1-07-C.1	10.02	20.52	35024	444.2	5
A.1-07-C.2	10.07	20.70	35641	447.5	2
A.1-07-C.3	10.07	20.38	36261	455.7	2

A.1-07-C.4	10.04	20.46	34182	431.8	5
A.1-07-C.5	10.03	20.40	38078	481.9	2
A.1-07-C.6	9.99	20.29	35068	447.4	2
A.1-14-C.1	10.00	20.51	38730	493.6	5
A.1-14-C.2	10.02	20.53	38531	489.1	2
A.1-14-C.3	10.03	20.45	39869	505.1	5
A.1-14-C.4	10.01	20.71	38294	487.1	2
A.1-14-C.5	10.03	20.46	39611	501.3	2
A.1-14-C.6	10.06	20.56	39095	491.9	1
A.1-28-C.1	10.05	20.61	41400	521.9	2
A.1-28-C.2	9.98	20.62	41435	530.2	1
A.1-28-C.3	10.25	20.42	42440	514.3	2
A.1-28-C.4	10.06	20.67	38617	486.3	2
A.1-28-C.5	10.06	20.74	39849	501.3	2
A.1-28-C.6	10.06	20.57	41412	521.0	2
A.1-45-C.1	10.12	20.49	43289	538.7	1
A.1-45-C.2	10.02	20.46	43226	548.2	5
A.1-45-C.3	10.11	20.64	43440	541.7	2
A.1-45-C.4	10.09	20.50	45155	564.7	2
A.1-45-C.5	10.07	20.50	42924	539.5	1
A.1-45-C.6	10.09	20.51	42844	535.8	2
A.1-90-C.1	10.03	20.16	44801	567.6	2
A.1-90-C.2	10.07	20.56	48031	603.1	2
A.1-90-C.3	10.19	20.63	49878	611.6	2
A.1-90-C.4	10.05	20.45	45989	579.7	2
A.1-90-C.5	9.99	20.35	46775	596.7	2
A.1-90-C.6	9.94	20.72	48019	619.4	1
A.2-07-C.1	10.15	20.68	37184	459.6	3
A.2-07-C.2	10.01	20.66	34775	442.3	2
A.2-07-C.3	10.16	20.43	36710	452.8	2
A.2-07-C.4	10.20	20.31	36793	450.7	3
A.2-07-C.5	10.16	20.54	33994	419.3	5
A.2-07-C.6	9.97	20.70	32684	418.7	5
A.2-14-C.1	10.10	20.79	36254	452.5	2
A.2-14-C.2	9.96	20.72	35282	453.3	2
A.2-14-C.3	10.06	20.38	37193	467.9	3
A.2-14-C.4	10.16	20.79	37725	465.3	3
A.2-14-C.5	10.02	20.44	38970	494.2	3

A.2-14-C.6	10.13	20.84	37311	462.9	3
A.2-28-C.1	9.99	20.74	40511	517.4	2
A.2-28-C.2	9.98	20.75	40793	521.5	2
A.2-28-C.3	10.05	20.52	39466	498.0	2
A.2-28-C.4	10.16	20.42	43802	540.3	2
A.2-28-C.5	10.04	20.67	39986	505.1	2
A.2-28-C.6	10.03	20.73	41238	522.4	1
A.2-45-C.1	10.05	20.59	43784	552.5	2
A.2-45-C.2	9.99	20.77	41459	528.9	2
A.2-45-C.3	10.20	20.29	43053	527.4	5
A.2-45-C.4	9.94	20.60	45308	583.9	1
A.2-45-C.5	10.15	20.68	42973	531.6	3
A.2-45-C.6	10.04	20.68	42139	532.8	1
A.2-90-C.1	10.22	20.59	47643	581.3	2
A.2-90-C.2	10.15	20.27	47044	581.4	2
A.2-90-C.3	10.03	20.60	43878	555.3	2
A.2-90-C.4	10.02	20.50	43981	557.8	2
A.2-90-C.5	10.11	20.66	45060	561.9	5
A.2-90-C.6	10.17	20.19	48211	594.1	2
A.3-07-C.1	10.24	20.35	35414	430.4	5
A.3-07-C.2	10.17	20.45	37634	463.7	5
A.3-07-C.3	9.99	20.49	38307	488.7	2
A.3-07-C.4	10.14	20.81	36379	450.5	2
A.3-07-C.5	10.17	20.25	36478	449.1	2
A.3-07-C.6	10.25	20.41	37586	455.5	5
A.3-14-C.1	10.07	20.71	38260	480.4	3
A.3-14-C.2	10.16	20.23	38894	479.7	5
A.3-14-C.3	10.12	20.63	37694	468.6	2
A.3-14-C.4	10.02	20.55	39165	497.2	3
A.3-14-C.5	10.02	20.58	39814	504.9	3
A.3-14-C.6	9.98	20.62	37908	484.6	1
A.3-28-C.1	10.22	20.37	45585	555.7	2
A.3-28-C.2	10.16	20.66	44330	547.3	1
A.3-28-C.3	9.91	20.67	41116	533.1	1
A.3-28-C.4	10.15	20.36	45250	559.2	2
A.3-28-C.5	10.08	20.55	43349	543.7	3
A.3-28-C.6	9.97	20.60	43323	555.5	2
A.3-45-C.1	10.20	20.35	45469	556.4	5

A.3-45-C.2	10.02	20.63	44043	558.5	2
A.3-45-C.3	10.00	20.59	44334	564.5	1
A.3-45-C.4	9.99	20.82	44411	566.6	1
A.3-45-C.5	10.21	20.26	47686	582.4	2
A.3-45-C.6	10.22	20.35	48162	587.7	2
A.3-90-C.1	10.17	20.51	50408	620.5	1
A.3-90-C.2	10.01	20.61	46854	595.4	3
A.3-90-C.3	10.05	20.49	48980	618.1	1
A.3-90-C.4	10.19	20.10	51132	627.6	1
A.3-90-C.5	10.04	20.49	48727	616.1	1
A.3-90-C.6	9.96	20.21	46661	598.9	2
A.4-07-C.1	10.22	20.31	34536	421.0	2
A.4-07-C.2	10.19	20.42	31349	384.8	5
A.4-07-C.3	9.99	20.24	31265	398.9	5
A.4-07-C.4	10.06	20.63	31758	399.5	2
A.4-07-C.5	9.98	20.66	30635	392.0	5
A.4-07-C.6	10.20	20.61	33445	409.7	2
A.4-14-C.1	10.02	20.33	33552	425.5	5
A.4-14-C.2	10.13	20.80	34025	422.6	2
A.4-14-C.3	10.17	20.38	35905	442.0	2
A.4-14-C.4	10.19	20.74	35830	439.8	5
A.4-14-C.5	9.98	20.81	34057	435.8	5
A.4-14-C.6	9.99	20.68	35727	455.8	2
A.4-28-C.1	10.02	20.40	39226	497.4	5
A.4-28-C.2	10.00	20.72	37920	482.8	5
A.4-28-C.3	10.18	20.83	38867	477.5	2
A.4-28-C.4	10.09	20.57	37548	470.1	2
A.4-28-C.5	10.14	20.73	36345	450.5	2
A.4-28-C.6	10.03	20.59	38504	487.3	4
A.4-45-C.1	10.17	20.41	41824	514.9	2
A.4-45-C.2	10.03	20.68	42300	535.9	2
A.4-45-C.3	10.21	20.49	42331	517.5	1
A.4-45-C.4	10.09	20.68	42323	529.8	1
A.4-45-C.5	10.05	20.62	42600	537.0	4
A.4-45-C.6	10.19	20.31	44007	539.6	2
A.4-90-C.1	10.17	20.11	47242	582.1	2
A.4-90-C.2	10.16	20.28	46479	573.9	2
A.4-90-C.3	9.92	20.62	45540	589.2	5

A.4-90-C.4	10.00	20.46	46458	592.1	2
A.4-90-C.5	9.93	20.70	46086	595.7	4
A.4-90-C.6	10.14	20.45	48278	597.8	4
A.5-07-C.1	9.95	20.62	30374	390.6	5
A.5-07-C.2	10.21	20.10	34613	422.8	5
A.5-07-C.3	10.08	20.46	30959	388.3	5
A.5-07-C.4	10.13	20.69	33074	410.4	2
A.5-07-C.5	9.98	20.61	32093	410.3	2
A.5-07-C.6	10.07	20.71	30986	389.1	2
A.5-14-C.1	10.22	20.63	35512	432.9	2
A.5-14-C.2	9.98	20.65	34512	441.6	2
A.5-14-C.3	10.05	20.49	36255	457.5	2
A.5-14-C.4	10.06	20.52	33826	426.0	2
A.5-14-C.5	10.17	20.24	35529	437.8	5
A.5-14-C.6	10.13	20.59	35593	441.6	2
A.5-28-C.1	10.09	20.70	36450	456.3	4
A.5-28-C.2	10.09	20.52	38796	485.2	2
A.5-28-C.3	10.08	20.63	39080	490.2	2
A.5-28-C.4	10.21	20.64	39995	489.0	1
A.5-28-C.5	10.17	20.74	39203	483.1	1
A.5-28-C.6	10.09	20.77	35247	440.8	5
A.5-45-C.1	10.04	20.47	40289	509.4	2
A.5-45-C.2	10.05	20.59	41888	528.6	4
A.5-45-C.3	9.96	20.46	39975	513.6	1
A.5-45-C.4	10.22	20.53	43459	530.3	1
A.5-45-C.5	10.20	20.69	39673	485.5	2
A.5-45-C.6	10.01	20.58	44455	565.5	2
A.5-90-C.1	10.17	20.44	43357	533.7	5
A.5-90-C.2	10.06	20.52	44206	556.7	2
A.5-90-C.3	10.04	20.60	42571	538.3	2
A.5-90-C.4	10.07	20.53	44671	560.9	2
A.5-90-C.5	10.19	20.30	47065	577.7	2
A.5-90-C.6	10.20	20.26	45659	559.3	2

ANEXO E: TABLA COMPLETA DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE DENSIDAD, ABSORCIÓN Y VACÍOS DEL CONCRETO.

Anexo E: Tabla completa de resultados del Ensayo de Densidad, Absorción y Vacíos del Concreto.
Fuente: Elaboración Propia.

DENSIDAD, ABSORCIÓN Y VACÍOS			
ID	Absorción después de inmersión (%)	Densidad seca global	Volumen de vacíos (%)
P-90-D.1	3.62	2324.65	10.01
P-90-D.2	3.07	2353.96	8.76
P-90-D.3	2.89	2360.12	8.23
P-90-D.4	3.61	2345.39	8.17
P-90-D.5	4.89	2314.53	11.10
P-90-D.6	4.62	2324.65	10.41
A.1-90-D.1	5.87	2276.76	14.99
A.1-90-D.2	3.79	2336.43	8.55
A.1-90-D.3	5.84	2274.21	15.32
A.1-90-D.4	3.00	2345.96	8.49
A.1-90-D.5	3.08	2360.74	6.92
A.1-90-D.6	3.53	2345.77	7.95
A.2-90-D.1	4.67	2332.32	10.71
A.2-90-D.2	1.09	2391.58	3.88
A.2-90-D.3	1.86	2394.53	4.58
A.2-90-D.4	1.29	2394.98	4.24
A.2-90-D.5	0.94	2401.79	3.38
A.2-90-D.6	2.48	2376.00	5.89
A.3-90-D.1	4.04	2342.05	10.09
A.3-90-D.2	1.16	2413.40	3.05
A.3-90-D.3	4.74	2324.47	10.77
A.3-90-D.4	4.89	2312.09	12.46
A.3-90-D.5	5.34	2312.08	13.65
A.4-90-D.1	1.46	2380.25	3.91
A.4-90-D.2	3.14	2345.61	8.10
A.4-90-D.3	1.00	2393.07	3.10
A.4-90-D.4	1.38	2387.59	4.49
A.4-90-D.5	1.79	2389.26	4.69
A.4-90-D.6	3.83	2314.31	9.67
A.5-90-D.1	3.27	2348.61	7.88
A.5-90-D.2	3.38	2346.38	7.47
A.5-90-D.3	5.13	2297.28	11.45
A.5-90-D.4	4.40	2314.30	10.86
A.5-90-D.5	4.30	2316.59	10.37

ANEXO F: CONSTANCIA DE ANÁLISIS XRD DEL RCP.

Anexo F: Constancia de Análisis XRD del RCP.
Fuente: Laboratorio de Microscopía Electrónica – FC UNI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de Ciencias

CONSTANCIA

EL ENCARGADO DEL LABORATORIO DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA: QUE SUSCRIBE:

HACE CONSTAR

Que en el Laboratorio de Microscopia Electrónica se realizaron los análisis de muestras de la tesis titulada "**Influencia de la Incorporación del Polvo de Concreto Reciclado empleado como adición en la Resistencia a la Compresión del Concreto**" a solicitud del Sr. Walter Iván Escalante Cieza con DNI: 70194975 y Código UNI: 20164507E de la Facultad de Ingeniería Civil-UNI, siendo el asesor de la tesis el Mag. Ing. Marco Antonio Tejada Silva. Los análisis se realizaron con el Microscopio Electrónico de Barrido de marca Zeiss modelo EVO MA10.

Mg Clemente Luyo Caycho
Docente Facultad de Ciencias
Laboratorio de Microscopia Electrónica

Lima, 03 de agosto de 2023

Av. Túpac Amaru 210, Lima 25, - Perú
Teléfono Decanato: (511) 481-0824
Email: fc@uni.edu.pe
Página Web: www.fc.uni.edu.pe

Central Telefónica FC: (511) 381-3868 / 381-3869
Central Telefónica UNI: (511) 481-1070 Anexos: 5001 y 5003