

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO
ELABORADO CON AGUA RESIDUAL TRATADA Y
AGREGADO FINO RECICLADO, PARA A/C 0.45 y 0.50**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

**ELABORADO POR
ALDAIR JHONATAN CRUZ COSME**

**ASESOR
Mag. MAX HUAYNALAYA RASHUAMAN**

LIMA- PERÚ

2023

© 2023, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

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

Cruz Cosme, Aldair Jhonatan

ajcruz@uni.pe

992915917

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mis padres, que siempre estuvieron a mi lado apoyándome en mis estudios y motivándome siempre a ser mejor cada día; a mis hermanos y sobrinos que forman parte de este proceso de convertirme en ingeniero civil.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al LEM-UNI por brindarme las facilidades de realizar los ensayos de la tesis en sus instalaciones y a la Universidad Nacional de Ingeniería por forjarme en valores y conocimientos en el campo de la ingeniería civil.

ÍNDICE

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
PRÓLOGO	9
LISTA DE TABLAS	10
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	15
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	16
1.1 GENERALIDADES	16
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	17
1.3 PROBLEMAS DEL ESTUDIO	18
1.3.1 Problema General.....	18
1.3.2 Problemas Específicos	18
1.4 OBJETIVOS DEL ESTUDIO	18
1.4.1 Objetivo General	18
1.4.2 Objetivos Específicos.....	18
1.5 HIPÓTESIS	19
1.5.1 Hipótesis General	19
1.5.2 Hipótesis Específicas.....	19
1.6 MARCO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN	19
1.6.1 Tipo de Investigación	19
1.6.2 Nivel de Investigación	19
1.6.3 Diseño de Investigación	20
1.6.4 Enfoque de Investigación.....	20
1.6.5 Población, Muestra y Muestreo.....	20
1.7 MATRIZ DE CONSISTENCIA Y OPERACIONALIZACIÓN	21
1.8 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	23
1.8.1 Antecedentes Nacionales	23
1.8.2 Antecedentes Internacionales.....	25
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	27
2.1 CONCRETO	27
2.2 AGUA	27

2.3 AGUA RESIDUAL.....	27
2.4 AGREGADOS.....	27
2.5 AGREGADO ARTIFICIAL	27
2.6 AGREGADO RECICLADO	28
2.7 CONCRETO RECICLADO.....	28
2.8 TAMAÑO MÁXIMO Y TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL	28
2.9 MÓDULO DE FINEZA	28
2.10 DESEMPEÑO DEL CONCRETO CON AGREGADO RECICLADO	29
2.11 DESEMPEÑO DEL CONCRETO CON AGUA RESIDUAL TRATADA	30
CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL TRABAJO	31
3.1 COMPONENTES DEL CONCRETO.....	31
3.1.1 Agregados	31
3.1.2 Cemento	32
3.1.3 Agua	32
3.2 ENSAYOS A LOS AGREGADOS	32
3.2.1 Análisis Granulométrico	32
3.2.2 Peso Específico y Absorción.....	38
3.2.3 Peso Unitario	41
3.2.4 Contenido de Humedad	43
3.2.5 Proporción entre Agregados	45
3.3 ENSAYOS AL AGUA RESIDUAL TRATADA	46
3.3.1 Cloruros	47
3.3.2 Sulfatos.....	47
3.3.3 Sólidos Totales Por Masa	47
3.3.4 Álcalis	47
3.4 DISEÑO DE MEZCLA.....	47
3.5 ENSAYOS AL CONCRETO FRESCO	50
3.5.1 Asentamiento.....	50
3.5.2 Peso Unitario	52
3.5.3 Contenido de Aire	53
3.5.4 Tiempo de Fraguado.....	55
3.5.5 Exudación	59
3.6 ENSAYOS AL CONCRETO ENDURECIDO	61
3.6.1 Resistencia a Compresión	61
3.6.2 Resistencia a Tracción.....	70

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	77
4.1 ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS A LOS AGREGADOS	77
4.1.1 Análisis Granulométrico	77
4.1.2 Peso Específico y Absorción.....	78
4.1.3 Peso Unitario	78
4.1.4 Contenido de Humedad	79
4.2 ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS AL AGUA RESIDUAL TRATADA	79
4.2.1 Cloruros	79
4.2.2 Sulfatos.....	79
4.2.3 Sólidos Totales Por Masa	80
4.2.4 Álcalis	80
4.3 ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS AL CONCRETO FRESCO	80
4.3.1 Asentamiento.....	80
4.3.2 Peso Unitario	82
4.3.3 Contenido de Aire	84
4.3.4 Tiempo de Fraguado.....	85
4.3.5 Exudación.....	87
4.4 ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS AL CONCRETO ENDURECIDO	89
4.4.1 Resistencia a Compresión	89
4.4.2 Resistencia a Tracción.....	94
CONCLUSIONES.....	99
RECOMENDACIONES.....	102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
ANEXOS	107

RESUMEN

En esta investigación se realizó un estudio de las propiedades del concreto tras el reemplazo de agua potable y arena natural por agua residual tratada y arena reciclada. Ambos reemplazos fueron totales.

El agua residual tratada se obtuvo de CITRAR-UNI, mientras que la arena reciclada se obtuvo de una empresa especializada en proporcionar agregado reciclado de construcciones. La arena natural y la piedra natural se obtuvieron de las canteras de Trapiche y UNICON. Todos los componentes del concreto se obtuvieron en la zona de Lima Metropolitana.

Las relaciones a/c usadas para el diseño de las mezclas fueron 0.45 y 0.50, el método de diseño usado fue el de la máxima compactación de la combinación de agregados, donde también se usaron las tablas del método ACI 211.

El agua residual tratada que fue utilizada, cumplió con los límites que establece la NTP 339.088:2021, referente a la cantidad de cloruros, sulfatos, sólidos totales por masa y álcalis que pueden estar contenidos en agua para mezcla de concreto.

Los diseños patrón fueron elaborados con agua potable y agregados naturales. Para los diseños variante se hizo un reemplazo total de agua potable y arena natural por agua residual tratada y arena reciclada.

Los ensayos realizados al concreto fresco tuvieron como objetivo determinar el asentamiento, peso unitario, contenido de aire, tiempo de fraguado y exudación. Para ambas relaciones a/c, tras el reemplazo de agua potable y arena natural por agua residual tratada y arena reciclada, el asentamiento y el contenido de aire aumentaron, mientras que el peso unitario y el tiempo de fraguado disminuyeron. Para la exudación no se encontró una tendencia definida, porque para a/c de 0.45 disminuyó y para a/c de 0.50 aumentó.

Los ensayos realizados al concreto endurecido tuvieron como objetivo determinar la resistencia a compresión y la resistencia a tracción. Para ambas relaciones a/c, tras el reemplazo de agua potable y arena natural por agua residual tratada y arena reciclada, la resistencia a compresión disminuyó, mientras que la resistencia a tracción aumentó.

ABSTRACT

In this investigation, a study of the properties of concrete was carried out after the replacement of drinking water and natural sand by treated wastewater and recycled sand. Both replacements were total.

The treated wastewater was obtained from CITRAR-UNI, while the recycled sand was obtained from a company specialized in providing recycled construction aggregate. Natural sand and natural stone were obtained from the Trapiche and UNICON quarries. All concrete components were obtained in the Lima Metropolitana area.

The w/c ratios used for the design of the mixes were 0.45 and 0.50, the design method used was the maximum compactness of the combination of aggregates, where the ACI 211 method tables were also used.

The treated wastewater that was used complied with the limits established by NTP 339.088:2021, referring to the amount of chlorides, sulfates, total solids by mass, and alkalis that may be contained in water for concrete mixing. The pattern designs were made with potable water and natural aggregates. For the variant designs, a total replacement of potable water and natural sand was made with treated wastewater and recycled sand.

The tests carried out on the fresh concrete had the objective of determining the settlement, unit weight, air content, setting time and exudation. For both w/c ratios, after replacing potable water and natural sand with treated wastewater and recycled sand, slump and air content increased, while unit weight and setting time decreased. No definite trend was found for exudation, because for a/c of 0.45 it decreased and for a/c of 0.50 it increased.

The tests carried out on the hardened concrete had the objective of determining the compressive strength and the tensile strength. For both w/c ratios, after replacing drinking water and natural sand with treated wastewater and recycled sand, the compressive strength decreased, while the tensile strength increased.

PRÓLOGO

En los tiempos actuales la conservación del medio ambiente se ha convertido en un pilar a seguir en todos los campos de desarrollo.

En el campo de la ingeniería civil, la producción de concreto es una de las actividades que causa mayor contaminación (CSI, 2009). Es por ello que se han realizado investigaciones que se enfocan en el uso de materiales reciclados que puedan disminuir la contaminación generada.

Entre estos materiales se tiene a los agregados reciclados y al agua residual tratada, ambos han sido usados en investigaciones para determinar si podían ser usados en reemplazo de agregados naturales y agua potable en la producción de concreto.

Este trabajo continuó esa línea de investigación, usando agregados reciclados obtenidos de selección y trituración de material obtenido de demoliciones de concreto, y agua residual tratada obtenida de CITRAR-UNI en forma conjunta para la creación de concreto nuevo. Cabe mencionar que todos los componentes del concreto elaborado para esta investigación fueron obtenidos dentro de la zona de Lima Metropolitana.

La investigación pretende aportar a futuros trabajos acerca de la producción de concreto donde toda su composición, aparte del cemento, necesite de materiales reciclados en lugar de materias primas o recursos naturales, cuya extracción afecta a la conservación de canteras o la cantidad de agua destinada a la construcción.

Mag. Ing. MAX HUAYNALAYA RASHUAMAN
ASESOR

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Matriz de consistencia y operacionalización.	22
Tabla 2 Análisis granulométrico de la arena.	33
Tabla 3 Análisis granulométrico de la piedra.	35
Tabla 4 Análisis granulométrico de la arena reciclada.	36
Tabla 5 Módulo de fineza de la arena.	37
Tabla 6 Módulo de fineza de la arena reciclada.	38
Tabla 7 Peso específico y Absorción de la arena.	38
Tabla 8 Peso específico y Absorción de la piedra.	39
Tabla 9 Peso específico y Absorción de la arena reciclada.	40
Tabla 10 Peso unitario de la arena natural.	41
Tabla 11 Peso unitario de la piedra.	42
Tabla 12 Peso unitario de la arena reciclada.	43
Tabla 13 Contenido de humedad de la arena natural.	43
Tabla 14 Contenido de humedad de la piedra.	44
Tabla 15 Contenido de humedad de la arena reciclada.	44
Tabla 16 PUC de la combinación entre arena y piedra.	45
Tabla 17 PUC de la combinación entre arena reciclada y piedra.	46
Tabla 18 Diseños patrón.	49
Tabla 19 Diseños variante.	49
Tabla 20 Asentamiento de mezclas con a/c de 0.45.	50
Tabla 21 Asentamiento de mezclas con a/c de 0.50.	51
Tabla 22 Peso unitario de mezclas con a/c de 0.45.	52
Tabla 23 Peso unitario de mezclas con a/c de 0.50.	52
Tabla 24 Contenido de aire de mezclas con a/c de 0.45.	54
Tabla 25 Contenido de aire de mezclas con a/c de 0.50.	54
Tabla 26 Tiempo de fraguado de mezcla patrón con a/c de 0.45.	56
Tabla 27 Tiempo de fraguado de mezcla variante con a/c de 0.45.	57
Tabla 28 Tiempo de fraguado de mezcla patrón con a/c de 0.50.	57
Tabla 29 Tiempo de fraguado de mezcla variante con a/c de 0.50.	58
Tabla 30 Exudación de mezclas con a/c de 0.45.	59
Tabla 31 Exudación de mezclas con a/c de 0.50.	60
Tabla 32 Resultados de resistencia a compresión a 7 días – 0.45p.	62
Tabla 33 Resultados de resistencia a compresión a 7 días – 0.45v.	63

Tabla 34 Resultados de resistencia a compresión a 7 días – 0.50p.	64
Tabla 35 Resultados de resistencia a compresión a 7 días – 0.50v.....	65
Tabla 36 Resultados de resistencia a compresión a 28 días – 0.45p.	66
Tabla 37 Resultados de resistencia a compresión a 28 días – 0.45v.....	67
Tabla 38 Resultados de resistencia a compresión a 28 días – 0.50p.	68
Tabla 39 Resultados de resistencia a compresión a 28 días – 0.50v.....	69
Tabla 40 Resultados de resistencia a tracción a 7 días – 0.45p.	71
Tabla 41 Resultados de resistencia a tracción a 7 días – 0.45v.	71
Tabla 42 Resultados de resistencia a tracción a 7 días – 0.50p.	72
Tabla 43 Resultados de resistencia a tracción a 7 días – 0.50v.	73
Tabla 44 Resultados de resistencia a tracción a 28 días – 0.45p.	74
Tabla 45 Resultados de resistencia a tracción a 28 días – 0.45v.	74
Tabla 46 Resultados de resistencia a tracción a 28 días – 0.50p.	75
Tabla 47 Resultados de resistencia a tracción a 28 días – 0.50v.	76
Tabla 48 Variación del asentamiento - variante respecto a patrón.	81
Tabla 49 Variación del peso unitario - variante respecto a patrón.	82
Tabla 50 Variación del contenido de aire - variante respecto a patrón.....	84
Tabla 51 Variación del tiempo de fraguado - variante respecto a patrón.	86
Tabla 52 Variación de la exudación - variante respecto a patrón.....	87
Tabla 53 Variación de la resistencia a compresión 7 días – a/c=0.45.....	89
Tabla 54 Variación de la resistencia a compresión 7 días – a/c=0.50.....	90
Tabla 55 Variación de la resistencia a compresión 7 días – a/c=0.45.....	91
Tabla 56 Variación de la resistencia a compresión 28 días – a/c=0.50.....	92
Tabla 57 Variación de la resistencia a compresión según edades – a/c=0.45. ..	92
Tabla 58 Variación de la resistencia a compresión según edades – a/c=0.50. ..	93
Tabla 59 Variación de la resistencia a tracción 7 días – a/c=0.45.....	94
Tabla 60 Variación de la resistencia a tracción 7 días – a/c=0.50.....	95
Tabla 61 Variación de la resistencia a tracción 28 días – a/c=0.45.....	96
Tabla 62 Variación de la resistencia a tracción 28 días – a/c=0.50.....	97
Tabla 63 Variación de la resistencia a tracción según edades – a/c=0.45.	97
Tabla 64 Variación de la resistencia a compresión según edades – a/c=0.50. ..	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Producción de los agregados reciclados.....	31
Figura 2	Arena natural usada en la tesis.....	32
Figura 3	Curva granulométrica de la arena.....	33
Figura 4	Tamices para ensayo granulométrico de la arena.....	34
Figura 5	Piedra usada en la tesis.....	34
Figura 6	Curva granulométrica de la piedra.....	35
Figura 7	Tamices para ensayo granulométrico de la piedra.....	36
Figura 8	Arena reciclada usada en la tesis.....	36
Figura 9	Curva granulométrica de la arena reciclada.....	37
Figura 10	Picnómetro y cono para ensayo de peso específico y absorción.....	39
Figura 11	Peso de la piedra superficialmente seca sumergida en agua.....	40
Figura 12	Peso unitario de la arena natural.....	42
Figura 13	Contenido de humedad de la arena.....	44
Figura 14	PUC vs %Piedra – mezcla patrón.....	45
Figura 15	PUC vs %Piedra – mezcla variante.....	46
Figura 16	Asentamiento de mezclas con a/c de 0.45.....	50
Figura 17	Asentamiento de mezclas con a/c de 0.50.....	51
Figura 18	Equipo para ensayo de asentamiento del concreto.....	51
Figura 19	Peso unitario de mezclas con a/c de 0.45.....	52
Figura 20	Peso unitario de mezclas con a/c de 0.50.....	53
Figura 21	Peso unitario del concreto.....	53
Figura 22	Contenido de aire de mezclas con a/c de 0.45.....	54
Figura 23	Contenido de aire de mezclas con a/c de 0.50.....	55
Figura 24	Contenido de aire del concreto.....	55
Figura 25	Tiempo de fraguado de mezcla patrón con a/c de 0.45.....	56
Figura 26	Tiempo de fraguado de mezcla patrón con a/c de 0.45.....	57
Figura 27	Tiempo de fraguado de mezcla patrón con a/c de 0.50.....	58
Figura 28	Tiempo de fraguado de mezcla variante con a/c de 0.50.....	59
Figura 29	Exudación de mezclas con a/c de 0.45.....	60
Figura 30	Exudación de mezclas con a/c de 0.50.....	60
Figura 31	Exudación del concreto.....	61
Figura 32	Medición de diámetros de las probetas.....	62
Figura 33	Ensayo a compresión del concreto.....	62

Figura 34 Resultados de resistencia a compresión a 7 días – 0.45p.....	63
Figura 35 Resultados de resistencia a compresión a 7 días – 0.45v.....	64
Figura 36 Resultados de resistencia a compresión a 7 días – 0.50p.....	65
Figura 37 Resultados de resistencia a compresión a 7 días – 0.45v.....	66
Figura 38 Resultados de resistencia a compresión a 28 días – 0.45p.....	67
Figura 39 Resultados de resistencia a compresión a 28 días – 0.45v.....	68
Figura 40 Resultados de resistencia a compresión a 28 días – 0.50p.....	69
Figura 41 Resultados de resistencia a compresión a 7 días – 0.45v.....	70
Figura 42 Ensayo a tracción del concreto.	70
Figura 43 Resultados de resistencia a tracción a 7 días – 0.45p.....	71
Figura 44 Resultados de resistencia a tracción a 7 días – 0.45v.....	72
Figura 45 Resultados de resistencia a tracción a 7 días – 0.50p.....	73
Figura 46 Resultados de resistencia a tracción a 7 días – 0.45v.....	73
Figura 47 Resultados de resistencia a tracción a 28 días – 0.45p.....	74
Figura 48 Resultados de resistencia a tracción a 28 días – 0.45v.....	75
Figura 49 Resultados de resistencia a tracción a 28 días – 0.50p.....	76
Figura 50 Resultados de resistencia a tracción a 7 días – 0.45v.....	76
Figura 51 Curva granulométrica de la arena (natural y reciclada).	77
Figura 52 Variación de los valores de asentamiento.	81
Figura 53 Variación de los valores de asentamiento.	82
Figura 54 Variación de los valores de peso unitario.	83
Figura 55 Variación de los valores de peso unitario.	83
Figura 56 Variación de los valores de contenido de aire.	84
Figura 57 Variación de los valores de contenido de aire.	85
Figura 58 Tiempo de fraguado de mezclas con a/c de 0.45.....	85
Figura 59 Tiempo de fraguado de mezclas con a/c de 0.50.....	86
Figura 60 Variación de los valores de exudación.	88
Figura 61 Variación de los valores de exudación.	88
Figura 62 Variación de resistencia a compresión 7 días – a/c=0.45.....	89
Figura 63 Variación de resistencia a compresión 7 días – a/c=0.50.....	90
Figura 64 Variación de resistencia a compresión 28 días – a/c=0.45.....	91
Figura 65 Variación de resistencia a compresión 28 días – a/c=0.50.....	91
Figura 66 Variación de resistencia a compresión según edades – a/c=0.45.	92
Figura 67 Variación de resistencia a compresión según edades – a/c=0.50.	93
Figura 68 Variación de resistencia a tracción 7 días – a/c=0.45.....	94

Figura 69 Variación de resistencia a tracción 7 días – $a/c=0.50$	95
Figura 70 Variación de resistencia a tracción 28 días – $a/c=0.45$	96
Figura 71 Variación de resistencia a tracción 28 días – $a/c=0.50$	96
Figura 72 Variación de resistencia a tracción según edades – $a/c=0.45$	97
Figura 73 Variación de resistencia a tracción según edades – $a/c=0.50$	98

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

a/c	:	Relación agua cemento.
ACI	:	Instituto Americano del Concreto.
ANA	:	Autoridad Nacional del Agua.
ART	:	Agua Residual Tratada.
ASTM	:	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.
CA	:	Contenido de Aire.
CITRAR	:	Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales.
CM	:	Código de Mezcla.
CSI	:	Iniciativa para la Sostenibilidad del Concreto.
f _c	:	Resistencia a compresión.
f _t	:	Resistencia a tracción.
FOCSAC	:	Fomento Obras y Contratas SAC.
GCCA	:	Asociación Global de Cemento y Concreto.
LABICER	:	Laboratorio de Investigación y Certificaciones.
LEM	:	Laboratorio de Ensayo de Materiales N°1.
NTP	:	Norma Técnica Peruana.
PTAR	:	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.
PU	:	Peso Unitario.
PUC	:	Peso Unitario Compactado.
SUNASS	:	Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento.
TF	:	Tiempo de Fraguado.
TM	:	Tamaño Máximo.
TMN	:	Tamaño Máximo Nominal.
TSD	:	Cantidad total de sólidos disueltos.
UNI	:	Universidad Nacional de Ingeniería.
UNICON	:	Unión de Concreteras S.A.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

La industria de la construcción es una de las industrias que consumen la mayor cantidad de recursos naturales para la obtención de agregados y el agua (Naik et. al, 2005). Es por ello que en los tiempos actuales se está promoviendo a nivel global el reúso de materiales de construcción, para así poder reducir los impactos negativos que genera esta industria (GCCA, 2021).

Mediante el reúso de materiales se logra disminuir el impacto negativo producido por la extracción de recursos naturales para ser usados como agregados para concreto; así como el impacto que se genera por la contaminación derivada por el transporte de todo ese material a obra, puesto que en muchos casos una demolición está más cerca que una cantera (CSI, 2009).

Se han realizado investigaciones acerca del uso de agregados reciclados, obtenidos del reciclaje de residuos de construcción y demolición, en las mezclas de concretos. Ponce (2014) obtuvo que con un reemplazo total de agregados naturales por agregado reciclados las resistencias a compresión y tracción disminuyeron hasta un máximo de 14% aproximadamente. Eguchi et. al (2012) obtuvieron que la resistencia a compresión de concretos con un reemplazo total de piedra natural por piedra reciclada disminuyó hasta en 16%; además, señalaron que usando este tipo de agregados se obtuvo un concreto de menor precio y con menores impactos negativos en el medio ambiente.

También se han realizado investigaciones acerca del uso de agua residual tratada en las mezclas de concreto. Catanzaro y Zapana (2019) obtuvieron que la resistencia a compresión de concretos con reemplazo total de agua potable por agua residual tratada de dos distintas formas (lodos activados y humedales artificiales) disminuyó en 4.6% y 10.9%.

Entonces, se han analizado dos formas del reúso de materiales (agregados reciclados y agua residual tratada) para la elaboración de concreto nuevo. Colaborando así a la disminución de los impactos negativos que genera la industria de la construcción en el medio ambiente.

Lo que se plantea en esta tesis es usar ambas formas de reúso (de concreto viejo como agregado reciclado y agua residual tratada como agua para mezcla). Estudiando las propiedades en concreto fresco y endurecido, comparándolas con un concreto común (elaborado con agregados naturales y agua potable).

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

A nivel mundial, el 40% de todas las materias primas son usadas en actividades relacionadas a la construcción. Lo mismo pasa con el 17% del agua potable en el mundo (Calderón y Burbano, 2016).

Respecto a los residuos de construcción y demolición generados a nivel mundial, solo el 12.5% de estos se recicla y el 87.5% restante se deshecha (Medina, 2022). Y respecto a las aguas residuales que se generan en el mundo, solo el 48% reciben algún tipo de tratamiento y apenas 11% se llega a reutilizar (Diario El Ágora, 2021).

En el Perú, solo el 30% de los residuos de construcción y demolición se vierten en botaderos autorizados, mientras que el 70% restante se desechan directamente al mar o ríos (Medina, 2022).

Las cifras son más alentadoras para el agua residual, puesto que en Perú el agua residual que se llega a tratar representa un 77.70%, habiendo 171 PTAR en funcionamiento (SUNASS, 2022). Sin embargo, en ciudades bastante pobladas y con un crecimiento no planificado, como el caso de Lima, se ha proyectado que para el 2025 el consumo de agua se duplique, agravando una escasez de agua cada vez más notoria (ANA, 2021).

Es por ello que, a nivel mundial y en el Perú, la reducción de impactos negativos en el medio ambiente se ha convertido en una de las principales metas de la industria de la construcción. Donde uno de los pilares viene a ser la idea del reciclaje o reuso de las materias primas (CSI, 2009).

El concreto está conformado por cemento, agua, aire, arena, piedra y aditivos (Sánchez, 2001). Por medio del reciclaje de residuos de construcción y demolición se pueden generar agregados reciclados (arena y piedra) que pueden emplearse en el uso de nuevas construcciones; además, con un correcto tratamiento de aguas residuales se puede usar esta agua para la mezcla de concreto de nuevas estructuras.

Entonces, en esta tesis se ha planteado el estudio de las propiedades de un concreto elaborado con agua y arena reciclados; donde el agua reciclada (agua residual tratada) y la arena reciclada reemplazaron al agua potable y arena natural.

El agua reciclada fue agua residual tratada que se obtuvo de CITRAR-UNI, ubicada al lado de la Universidad Nacional de Ingeniería en el distrito del Rímac, y la arena reciclada se compró de empresa especializada en proporcionar agregado reciclado de construcciones, ubicada en el distrito de Villa El Salvador.

Se escogieron a/c de 0.45 y 0.50 por pertenecer a un concreto de mediana resistencia. Además, los reemplazos de agua potable y arena natural por agua residual tratada y arena reciclada fueron totales; es decir, no se reemplazó en distintas cantidades o porcentajes.

1.3 PROBLEMAS DEL ESTUDIO

1.3.1 Problema General

- ¿Cuál será la variación de las propiedades físicas y mecánicas del concreto al reemplazar arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada?

1.3.2 Problemas Específicos

- ¿Las características del agua residual tratada cumplirán lo establecido en la normativa nacional para producción de concreto?
- ¿Cuál será la variación de las propiedades físicas del concreto fresco al reemplazar arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada?
- ¿Cuál será la variación de las propiedades mecánicas del concreto endurecido al reemplazar arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada?

1.4 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.4.1 Objetivo General

- Determinar la variación de las propiedades físicas y mecánicas del concreto al reemplazar arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar la cantidad de cloruros, sulfatos, sólidos totales por masa y álcalis contenidos en el ART y verificar si cumplen la normativa nacional.
- Determinar la variación de las propiedades físicas del concreto fresco al reemplazar arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada.

- Determinar la variación de las propiedades mecánicas del concreto endurecido al reemplazar arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada.

1.5 HIPÓTESIS

1.5.1 Hipótesis General

- El reemplazo de arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada provocará una variación en las propiedades físicas y mecánicas de un concreto convencional (elaborado con agua potable y agregados naturales).

1.5.2 Hipótesis Específicas

- La cantidad de cloruros, sulfatos, sólidos totales por masa y álcalis contenidos en el ART cumplirán con la normativa nacional.
- El reemplazo de arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada provocará una variación en las propiedades físicas de un concreto convencional.
- El reemplazo de arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada provocará una variación en las propiedades mecánicas de un concreto convencional.

1.6 MARCO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1 Tipo de Investigación

Gallardo, E. (2017) indicó que la investigación de tipo experimental se da cuando se manipula una variable en condiciones estrictamente controladas para descubrir la razón por la que se da un acontecimiento particular. Por lo tanto, el tipo de investigación de esta tesis fue experimental.

Para esta investigación, se manipularon el agua potable y la arena natural, puesto que fueron reemplazados por agua residual tratada y arena reciclada.

1.6.2 Nivel de Investigación

Gallardo, E. (2017) indicó que una investigación de nivel descriptivo tiene por objetivo especificar alguna propiedad o característica que se someta a

análisis, al mismo tiempo se busca describir patrones o tendencias de los grupos que se analizan. Por lo tanto, el nivel de investigación de esta tesis fue descriptivo.

Para esta investigación, se busca determinar las características del agua residual tratada referentes a la NTP 339.088:2021; así como describir si existe alguna tendencia en las propiedades físicas del concreto fresco y en las propiedades mecánicas del concreto endurecido al reemplazar arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada.

1.6.3 Diseño de Investigación

Gallardo, E. (2017) indicó que una investigación de diseño experimental somete a objetos o grupos a condiciones específicas para ver los efectos que se producirán, esta investigación está caracterizada por el hecho de que el investigador controla las variables del experimento. Por lo tanto, el diseño de investigación de esta tesis fue experimental.

Para esta investigación, las variables independientes fueron los agregados (naturales y reciclados) y el agua (potable y residual tratada), puesto que el contenido de estos en las mezclas de concreto fue controlado estableciendo el porcentaje de reemplazo.

1.6.4 Enfoque de Investigación

Gallardo, E. (2017) indicó que una investigación de enfoque cuantitativo busca la verificación de hipótesis a través de experimentos en muestras, para establecer leyes, comportamientos o tendencias acerca de algún fenómeno; además, esta investigación necesita recolectar datos con base en mediciones numéricas para probar las hipótesis formuladas. Por lo tanto, el enfoque de investigación de esta tesis fue experimental.

Para esta investigación, el enfoque fue cuantitativo porque se midió la cantidad de cloruros, sulfatos, sólidos totales por masa y álcalis contenidos en el agua residual tratada; además de realizar mediciones para establecer tendencias en las propiedades físicas del concreto fresco y en las propiedades mecánicas del concreto endurecido.

1.6.5 Población, Muestra y Muestreo

Gallardo, E. (2017) estableció que la población viene a ser un grupo de elementos que tienen uno o más características en común, esas características

son fijadas por el problema y objetivo de la investigación. Por lo tanto, la población de la investigación estuvo constituida por concreto convencional (elaborado con agregados naturales y agua potable) y concreto reciclado (elaborado con arena reciclada y agua residual tratada).

Gallardo, E. (2017) estableció que la muestra viene a ser un subconjunto extraído de la población, se considera que la muestra es un grupo representativo de la población; además, permite generalizar resultados para la población de la investigación. Por lo tanto, la muestra de la investigación estuvo constituida por 12 muestras de agregados (para 12 ensayos en agregados), 10 muestras de concreto fresco (para 10 ensayos en concreto fresco) y 108 probetas (para ensayos a compresión y a tracción). Además, se llevó una muestra de agua residual tratada al Laboratorio de Investigación y Certificaciones de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería (LABICER) para ser analizada.

Gallardo, E. (2017) estableció que el muestreo no probabilístico usa procesos que no siguen la ley del azar o las probabilidades, por lo que no se puede conocer la probabilidad de escoger una sola muestra, sigue únicamente criterios o razonamientos del investigador.

Para esta investigación, se obtuvo los grupos muestrales siguiendo el criterio del investigador de reemplazar arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada. Por lo tanto, el muestreo de la investigación fue de tipo no probabilístico.

1.7 MATRIZ DE CONSISTENCIA Y OPERACIONALIZACIÓN

En la Tabla 1 se muestra la matriz de consistencia y operacionalización.

Tabla 1

Matriz de consistencia y operacionalización.

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	OPERACIONALIZACIÓN			METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Independiente	Dimensiones	Indicadores	
¿Cuál será la variación de las propiedades físicas y mecánicas del concreto al reemplazar arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada?	Determinar la variación de las propiedades físicas y mecánicas del concreto al reemplazar arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada.	El reemplazo de arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada provocará una variación en las propiedades físicas y mecánicas de un concreto convencional (elaborado con agua potable y agregados naturales).	VI1. Agregados naturales y reciclados.	Granulometría	Porcentaje (%)	Tipo de Investigación: Cuantitativa experimental.
				Peso Específico	g/cm ³	
				Absorción	Porcentaje (%)	
				Peso Unitario	kg/m ³	
				Contenido de	Porcentaje (%)	
			Proporción entre agregados por máxima compacidad	Porcentaje (%)	Nivel de investigación: Descriptivo.	
VI2. Agua potable y agua residual tratada.	Peso Específico	g/cm ³	Diseño de investigación: Experimental.			
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	Variables Dependientes	Dimensiones	Indicadores	
1. ¿Las características del agua residual tratada cumplirán lo establecido en la normativa nacional para producción de concreto?	1. Determinar la cantidad de cloruros, sulfatos, sólidos totales por masa y álcalis contenidos en el ART y verificar si cumplen la normativa nacional.	1. La cantidad de cloruros, sulfatos, sólidos totales por masa y álcalis contenidos en el ART cumplirán con la normativa nacional.	VD1. Contenido de cloruros, sulfatos, sólidos totales por masa y álcalis del ART.	Contenido de cloruros	mg/l o ppm	Enfoque de investigación: Cuantitativo.
				Contenido de sulfatos	mg/l o ppm	
				Contenido de sólidos totales por masa	mg/l o ppm	
				Contenido de álcalis	mg/l o ppm	
2. ¿Cuál será la variación de las propiedades físicas del concreto fresco al reemplazar arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada?	2. Determinar la variación de las propiedades físicas del concreto fresco al reemplazar arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada.	2. El reemplazo de arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada provocará una variación en las propiedades físicas de un concreto convencional.	VD2. Propiedades físicas y mecánicas del concreto.	Asentamiento	Pulgadas (")	Población: Concreto con agua potable, agua residual tratada, arena natural y arena reciclada.
				Peso Unitario	kg/m ³	
				Contenido de aire	Porcentaje (%)	
3. ¿Cuál será la variación de las propiedades mecánicas del concreto endurecido al reemplazar arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada?	3. Determinar la variación de las propiedades mecánicas del concreto endurecido al reemplazar arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada.	3. El reemplazo de arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada provocará una variación en las propiedades mecánicas de un concreto convencional.	VD2. Propiedades físicas y mecánicas del concreto.	Tiempo de fraguado	Minutos (min)	Muestra: -Para ensayos al agua: Se envió una muestra de agua potable y una de ART. -Para ensayos físicos: Se hicieron 12 en agregados y 10 en concreto fresco. -Para ensayos mecánicos: 108 probetas.
				Exudación	Porcentaje (%)	
				Resistencia a compresión	kgf/cm ²	
				Resistencia a tracción	kgf/cm ²	

Nota 1. "ART" es Agua Residual Tratada.

Nota 2. Se hizo un reemplazo total (100%) de arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada.

Nota 3. Fuente: Elaboración propia.

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO ELABORADO CON AGUA RESIDUAL TRATADA Y AGREGADO FINO RECICLADO, PARA A/C 0.45 y 0.50

1.8 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.8.1 Antecedentes Nacionales

En el trabajo “Estudio del concreto reciclado de mediana a baja resistencia, utilizando cemento portland tipo I”, realizado por Ponce en 2014; se tuvo como objetivo calcular la variación de las resistencias a compresión y tracción entre un concreto con agregados naturales y otro con agregados reciclados, cabe recalcar que los diseños de mezcla tuvieron como requisito alcanzar un valor de asentamiento de entre 3” y 4”. Las relaciones agua cemento usadas fueron de 0.80, 0.70 y 0.60 para el concreto con agregados naturales y de 0.87, 0.77 y 0.66 para el concreto con agregados reciclados. Además, el reemplazo de agregados naturales por agregados reciclados se dio de forma total (100% de reemplazo). Para el concreto patrón obtuvo resistencias a compresión de 202 kg/cm², 258 kg/cm² y 313 kg/cm² (para relaciones a/c de 0.80, 0.70 y 0.60 respectivamente) a los 28 días, y usando los agregados reciclados obtuvo resistencias a compresión de 196 kg/cm², 238 kg/cm² y 266 kg/cm² (para relaciones a/c de 0.87, 0.77 y 0.66 respectivamente) a los 28 días, lo que implica una disminución de dicha resistencia de hasta 14.9%. Para la resistencia a tracción a 28 días, encontró que las resistencias de concretos con agregados reciclados son menores hasta en un 14.0% respecto a las resistencias de concretos con agregados naturales.

En el trabajo “Efecto del agregado fino reciclado en las propiedades del concreto f'c 210 kg/cm²”, realizada por Urbina (2019); elaboró concreto con agregados naturales comprados en Sodimac Homecenter, al cual le reemplazó el agregado fino natural por agregado fino reciclado comprado de una empresa en porcentajes de 15%, 25%, 35% y 50% para ver como determinar el efecto en las propiedades del concreto. Entre sus resultados obtuvo que la resistencia a compresión a 28 días fue de 300.23 kgf/cm² para el concreto patrón, y para los porcentajes de reemplazo de 15%, 25%, 35% y 50% obtuvo 370.30 kgf/cm², 328.50 kgf/cm², 332.50 kgf/cm² y 341.77 kgf/cm². También obtuvo que la resistencia a tracción a 28 días fue de 23.00 kgf/cm² para el concreto patrón, y para los porcentajes de reemplazo de 15%, 25%, 35% y 50% obtuvo 28.53 kgf/cm², 26.47 kgf/cm², 26.80 kgf/cm² y 27.57 kgf/cm². Concluyó que el porcentaje de reemplazo de 15% fue el que optimizó las resistencias a compresión y tracción.

En el trabajo “Análisis de las propiedades del concreto de mediana a baja resistencia elaborado con agua residual tratada”, realizado por Sáenz, E. en 2021;

usó agua obtenida de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de CITRAR-UNI; de donde se analizaron Agua residual tratada de tratamiento primario (ART-1) y Agua residual tratada de tratamiento secundario (ART-2) en la elaboración de concreto; concluyó que el concreto con ART presenta un mayor valor de asentamiento que el obtenido por el concreto patrón a medida que a/c disminuye y que el concreto con ART presenta tendencia creciente de la exudación al disminuir la relación a/c . También concluyó que el concreto con ART presenta diferente comportamiento del contenido de aire y que, según la calidad del agua, el concreto con ART presenta un aumento del tiempo de fraguado inicial al disminuir la relación a/c . Además, concluyó que el concreto con ART presenta una tendencia creciente de la resistencia a la compresión axial al disminuir la relación a/c . Señaló que el concreto con ART presenta menores valores a la compresión axial respecto al concreto patrón.

En el trabajo “Diseño y evaluación de concreto estructural de $f'c$ 280 kg/cm² elaborado con aguas residuales domésticas tratadas mediante procesos biológicos como alternativa al uso de agua potable en Lima Metropolitana”, realizado por Catanzaro y Zapana en 2019; usaron agua tratada de dos tipos, una tratada mediante el proceso biológico de lodos activados y otra tratada mediante el proceso biológico de humedales artificiales. Concluyeron que las resistencias a compresión a 7, 14 y 28 días mediante lodos activados varió en -3.1%, -6.3% y -4.6%, y mediante humedales artificiales en +2.7%, -3.8% y -10.9% respecto al patrón (concreto con agua potable). Además, concluyeron que el uso de aguas residuales tratadas es una alternativa factible al uso de agua potable para la elaboración de concreto estructural.

En el trabajo “Efecto en las propiedades físicas y mecánicas del concreto $f'c$ 175 kg/cm² y $f'c$ 210 kg/cm² elaborado con aguas residuales tratadas, Chimbote – 2021”, realizado por Bardales y Jara en 2021; usaron agua residual tratada de la PTAR San Bartolo y agua potable para realizar mezclas cuyos diseños patrón se hicieron para un asentamiento de 3” a 4” y resistencias a compresión a 28 días de 175 kgf/cm² y 210 kgf/cm². Para el diseño patrón de 175 kgf/cm² encontraron que la resistencia a compresión a 28 días de las mezclas con ART y agua potable fueron 343 kgf/cm² y 253 kgf/cm²; y para el diseño patrón de 210 kgf/cm² encontraron que la resistencia a compresión a 28 días de las mezclas con ART y agua potable fueron 355 kgf/cm² y 291 kgf/cm². También obtuvieron que para el diseño patrón de 175 kgf/cm², el asentamiento de las mezclas con

ART y agua potable fue de 3" y 3.25" respectivamente; y para el diseño patrón de 210 kgf/cm² fueron de 3" y 3" respectivamente. Además, obtuvieron que para el diseño patrón de 175 kgf/cm², el peso unitario de las mezclas con ART y agua potable fue de 2328 kg/m³ y 2313 kg/m³ respectivamente; y para el diseño patrón de 210 kgf/cm² fueron de 2340 kg/m³ y 2325 kg/m³ respectivamente. Concluyeron que las mezclas elaboradas con ART tuvieron mayores resistencias que las mezclas elaboradas con agua potable.

1.8.2 Antecedentes Internacionales

En el trabajo "Aplicación de agregado grueso reciclado en mezcla para construcción de concreto", realizado por Eguchi, Teranishi, Nakagome, Kishimoto, Shinozaki y Narikawa en 2007; desarrollaron un nuevo método de producción de concreto reciclado, buscando mejorar el método establecido por el Ministerio de Construcción de Japón en 1996, analizaron diferentes características del concreto como el rendimiento estructural, la resistencia al fuego y la trabajabilidad. Concluyeron que la resistencia al fuego y trabajabilidad de concretos reciclados son similares a los de un concreto ordinario. También concluyeron que, si bien la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad disminuyen en aproximadamente 8% y 16% respectivamente (diferencia de valores obtenidos entre un concreto con una proporción de reemplazo de concreto reciclado de 30% y otro de 100%), es posible estimar el porcentaje de reemplazo de concreto reciclado para garantizar la calidad requerida por el concreto. Además, señalaron que el proceso de trituración debe ser cuidadoso debido a que se podría generar morfología indeseable en los agregados obtenidos, pudiendo tener formas alargadas y/o semicirculares que no contribuyen a una mezcla homogénea. Así mismo, señalaron que en comparación con la construcción que usa exclusivamente concreto ordinario, una construcción que use concreto reciclado puede reducir su costo y el efecto que provoca en el medio ambiente.

En el trabajo "Propiedades de concreto preparado con agregados reciclados de baja calidad", realizado por Kou, Poon y Wan en 2012; se usaron agregados reciclados de tres tipos (uno comercial o de alta calidad y dos de baja calidad) para analizar las propiedades mecánicas del concreto, por medio de comparación con las propiedades obtenidas en un concreto con agregados naturales. Los agregados reciclados se usaron en porcentajes de reemplazo de 20%, 50% y 100% respecto de la cantidad total de agregados. Concluyeron que

las resistencias a compresión a 28 días de concretos con agregados naturales y de concretos con agregados reciclados de buena calidad (o comercial) son mayores a las resistencias obtenidas con los dos tipos de agregados reciclados de baja calidad. Para la relación a/c de 0.55, las resistencias a compresión a 28 días obtenidas con el agregado comercial fueron de 442.6 kgf/cm², 461.9 kgf/cm², 433.4 kgf/cm² y 388.5 kgf/cm²; con el primer tipo de agregado reciclado de baja calidad fueron de 442.6 kgf/cm², 404.8 kgf/cm², 345.7 kgf/cm² y 329.4 kgf/cm²; y con el segundo tipo de agregado reciclado de baja calidad fueron de 442.6 kgf/cm², 401.8 kgf/cm², 385.4 kgf/cm² y 284.5 kgf/cm²; para porcentajes de reemplazo de 0%, 20%, 50% y 100% respectivamente. También concluyeron que las resistencias a tracción a 28 días obtenidas en concretos con entre 20% y 50% de agregado reciclado fueron mayores que las obtenidas para concretos con agregados naturales. Además, concluyeron que se tendrá un agregado reciclado de mejor calidad, mientras mejor sea el concreto primario.

En el trabajo “Efectos en la resistencia del hormigón simple elaborados con agua residual tratada proveniente de la PTAR Cañaveralejo”, realizado por Calderón y Burbano en 2016; se usaron aguas de distintas Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) para la elaboración de concreto. Concluyeron que las resistencias a compresión a 28 días de concretos con 50% de agua residual tratada alcanzan el 100% de las resistencias obtenidas por concretos elaborados con agua potable. También concluyeron que las resistencias a compresión a 28 días de concretos con 100% de agua residual tratada alcanzan el 90% de las resistencias obtenidas por concretos elaborados con agua potable. Además, señalan que al no afectar de forma considerable las resistencias del concreto, el uso del agua residual tratada en la elaboración de concreto tiene potencial a futuro.

En el trabajo “Desempeño mecánico y durable de concretos que incorporan agregado reciclado fino comercial”, realizado por Burgos, Guzmán y Torres en 2017; usaron agregado fino reciclado como reemplazo de agregado fino natural en porcentajes de 20% y 40% para estudiar la variación de propiedades mecánicas y de durabilidad. Obtuvieron como resistencias a compresión a 28 días 385.5 kgf/cm², 375.3 kgf/cm² y 364.0 kgf/cm² y como resistencias a tracción a 28 días 41.8 kgf/cm², 38.7 kgf/cm² y 34.7 kgf/cm² para los reemplazos de 0%, 20% y 40%. Cabe mencionar que usaron cemento tipo I y relación agua cemento de 0.55 para el diseño de mezclas. Concluyeron que las resistencias obtenidas tras el reemplazo del agregado fino fueron similares a las del concreto patrón.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 CONCRETO

Sánchez, D. (2001) definió al concreto como el resultado de la mezcla de cemento, agua, aire, arena, piedra y aditivos (en caso se añadan), se le denomina comúnmente como concreto ciclópeo.

2.2 AGUA

Sánchez, D. (2001) señaló que el agua viene a ser el elemento perteneciente al concreto que se encarga de hidratar al cemento mediante reacciones químicas, haciendo que este tenga propiedades aglutinantes y así le permita fraguar para endurecer como un único cuerpo sólido junto a los agregados. También dijo que en las mezclas de concreto hay agua que queda dentro del concreto cuando éste fragua, al que se le denomina agua de hidratación, y el resto viene a ser agua que se evapora.

2.3 AGUA RESIDUAL

Según OEFA (2014), este tipo de agua es aquel que fue alterada por actividades humanas. Para su reúso, su vertimiento en el sistema de alcantarillado o su descarga al mar requieren de algún tipo de tratamiento, generalmente dado en las Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR).

2.4 AGREGADOS

Sánchez, D. (2001) señaló que vienen a ser aquellos materiales inertes de forma granular que poseen una resistencia propia tal que no afectan el endurecimiento del cemento, además de garantizar una adherencia suficiente con el cemento para formar un nuevo material compacto llamado concreto. También mencionó que, por su origen, pueden dividirse entre naturales o artificiales.

2.5 AGREGADO ARTIFICIAL

Sánchez, D. (2001) señaló que este tipo de agregados vienen a ser aquellos que son obtenidos por procesos industriales y no de la naturaleza (como el caso de los agregados naturales que se extraen de canteras), suelen ser más livianos o pesados que los agregados naturales.

De acuerdo a esa definición, los agregados reciclados vienen a ser un tipo de agregado artificial.

2.6 AGREGADO RECICLADO

Según el Proyecto de Norma Ambiental para la Ciudad de México (2020) se define a este tipo de agregado como el obtenido mediante procesos de selección y trituración a partir de residuos de construcción y demolición, hasta que las partículas sean de un tamaño similar a los de los agregados naturales.

2.7 CONCRETO RECICLADO

Según la Norma Técnica Peruana 400.053 (1999), este tipo de concreto es aquel que está elaborado con agregados reciclados, los cuales son obtenidos de las demoliciones de concreto y mortero. Es decir, cuando se usa un agregado reciclado en la mezcla de un concreto, a este concreto se le denomina concreto reciclado.

2.8 TAMAÑO MÁXIMO Y TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL

Según la Norma Técnica Peruana 400.037 (2021), el Tamaño Máximo (TM) de un agregado está dado por el menor tamiz normalizado por el que pasa toda la muestra. La norma también nos dice que el Tamaño Máximo Nominal (TMN) de un agregado está dado por el menor tamiz en el que se obtiene el primer retenido de la muestra.

Sánchez, D. (2001) indicó que el valor del TM representa el tamaño de la partícula más grande de la muestra de agregado. También indicó que el valor del TMN representa el tamaño promedio de las partículas más grandes de la muestra de agregado. Además, señaló que generalmente la mayoría de especificaciones hacen referencia al TMN debido a que representa mejor el tamaño de las partículas más grandes de un agregado, a diferencia del TM que solo representa a la partícula más grande.

2.9 MÓDULO DE FINEZA

La Norma Técnica Peruana 400.012 (2021) indica que en caso sea necesario calcular este valor, se hará dividiendo entre 100 el resultado de sumar el porcentaje acumulado retenido en los tamices N°100, N°50, N°30, N°16, N°8, N°4, 3/8", 3/4", 1 1/2" (y mayores, incrementando en relación 2 a 1). La ecuación sería como se indica a continuación.

$$\text{Módulo de fineza} = \frac{\% \text{Retenido acumulado (N}^\circ 100, \text{N}^\circ 50, \text{N}^\circ 30, \text{N}^\circ 16, \text{N}^\circ 8, \dots)}{100}$$

2.10 DESEMPEÑO DEL CONCRETO CON AGREGADO RECICLADO

Kou, Poon y Wan (2012) concluyeron que, al reemplazar los agregados naturales por agregados reciclados en porcentajes de 20%, 50% y 100%, la resistencia a compresión a 28 días aumentó en 4.4% y disminuyó en 2.1% y 12.2% respectivamente.

Ponce (2014) concluyó que, al reemplazar totalmente los agregados naturales por agregados reciclados, la resistencia a compresión a 28 días disminuyó en 14.9% y la resistencia a tracción disminuyó en 14.0%.

Burgos, Guzmán y Torres (2017) concluyeron que, al reemplazar los agregados naturales por agregados reciclados en porcentajes de 20% y 40%, la resistencia a compresión a 28 días disminuyó en 2.6% y 5.6%.

Urbina (2019) concluyó que, al reemplazar los agregados naturales por agregados reciclados en porcentajes de 15%, 25%, 35% y 50%, la resistencia a compresión a 28 días aumentó en 23.3%, 9.4%, 10.8% y 13.8%.

Entonces, al usar agregados reciclados, en el caso más desfavorable (reemplazo total de ambos agregados) la resistencia a compresión disminuyó en 14.0%; mientras que en el caso más favorable (también con reemplazo total de ambos agregados) la resistencia a compresión aumentó en 23.3%. Por lo que se espera que al reemplazar únicamente agregado fino natural por agregado fino reciclado, la resistencia a compresión disminuya.

Para esta investigación se usó agregado fino reciclado de una empresa especializada en la producción de agregados reciclados, una de las principales conclusiones a las que llegaron Kou et al. (2012) en su investigación fue que mientras mejor sea el concreto del que provienen los agregados reciclados, estos tendrán un mejor desempeño. En la visita a la planta de producción de estos agregados se pudo comprobar que la empresa clasificó los elementos de concreto a reciclar, tratando que su producto tenga la menor cantidad de impurezas (como cerámicos, ladrillos u otros), por lo que al usar este agregado no se espera una reducción considerable de las resistencias (a compresión y tracción) del concreto obtenido.

Si bien hubo antecedentes donde se reportó un incremento de las resistencias al reemplazar agregados naturales por agregados reciclados, como los agregados reciclados tienen un peso específico menor que los agregados naturales, se espera que la resistencia tienda a disminuir. Sin embargo, también se podría esperar que el agregado reciclado, contenga partículas de concreto que

se comporten de forma similar al cemento, reaccionando con la nueva mezcla y aportando resistencia al concreto resultante.

Respecto a las propiedades del concreto fresco, un dato importante de los antecedentes revisados es que los agregados reciclados tenían un mayor contenido de humedad y absorción que los agregados naturales. Esto haría que se obtenga una mezcla con mayor cantidad de humedad, donde se incremente el asentamiento, lo cual sería otra señal de que la resistencia del concreto tenderá a disminuir.

Además, debido a que el agregado reciclado puede estar conformado por partículas que se comporten de forma similar al cemento, la mezcla fraguaría más rápido, por lo que la temperatura aumentaría y el tiempo de fraguado disminuiría.

2.11 DESEMPEÑO DEL CONCRETO CON AGUA RESIDUAL TRATADA

Calderón y Burbano (2016) concluyeron que, al reemplazar totalmente el agua potable por agua residual tratada en porcentajes de 50% y 100%, la resistencia a compresión a 28 días disminuyó en 0.0% y 10.0%.

Catanzaro y Zapana (2019) concluyeron que, al reemplazar totalmente el agua potable por agua residual tratada (de dos tipos), la resistencia a compresión a 28 días disminuyó en 4.6% y 10.9%.

Bardales y Jara (2021) concluyeron que, al reemplazar totalmente el agua potable por agua residual tratada en dos mezclas distintas, la resistencia a compresión a 28 días aumentó en 35.6% y 22.0%.

De los resultados anteriores, se espera que el reemplazo de agua potable por agua residual tratada provoque una disminución de la resistencia a compresión.

Los resultados del reemplazo de agua potable por agua residual tratada varían de acuerdo a la planta de tratamiento de la cual se realizó la investigación, según las referencias las resistencias tendían a disminuir, pero otras lo contrario. Esto se puede deber a que el agua residual tratada va a estar conformada por distintas partículas dependiendo del proceso de tratamiento del agua residual y del nivel de tratamiento que se realice.

CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1 COMPONENTES DEL CONCRETO

3.1.1 Agregados

La arena reciclada se compró de una empresa especializada en proporcionar agregado reciclado de construcciones, esta empresa se encarga de la producción de agregados reciclados y de prefabricados elaborados con este tipo de agregados. Los agregados naturales, arena y piedra, se obtuvieron de la cantera de Trapiche y la cantera de UNICON respectivamente, ubicadas en los distritos de Comas y Lurigancho- Chosica, ambas en la provincia de Lima.

La Figura 1 muestra una captura del video donde la empresa explica cómo producen los agregados reciclados. En el video explican que el proceso inicia con la recolección de los residuos de construcción, que son llevados a la planta de producción, se seleccionan los residuos para luego pasar por dos procesos de trituración; este material es zarandeado y las partículas finas obtenidas (con un tamaño similar a la arena natural) vienen a conformar la arena reciclada; las partículas de tamaños mayores conforman la piedra reciclada.



Figura 1 Producción de los agregados reciclados.

Fuente:

https://www.youtube.com/watch?v=SKGOMFkfRJM&ab_channel=FOCSACConstruccionEcol%C3%B3gicas.

3.1.2 Cemento

El cemento usado fue Portland TIPO I de la marca SOL, la ficha técnica que brinda la empresa que elabora este producto se encuentra en el Anexo N°01.

3.1.3 Agua

En esta investigación se usaron dos tipos de agua: agua potable y agua residual tratada (ART). El agua potable se consiguió de la red de agua del Laboratorio de Ensayo de Materiales (que pertenece a la UNI, que se ubica en la ciudad de Lima); mientras que el ART se consiguió de CITRAR-UNI, donde se realiza el tratamiento de las aguas residuales que se usan en la Universidad Nacional de Ingeniería.

Para el diseño de mezclas se consideró que el agua potable, usada en la mezcla patrón, tenía un peso específico de 1 g/cm^3 . Mientras que el peso específico del ART se calculó con ayuda de un recipiente de volumen y peso conocidos, su valor fue de 0.9968 g/cm^3 , ese valor fue usado en el diseño de la mezcla variante (para cada a/c).

3.2 ENSAYOS A LOS AGREGADOS

Se realizaron en el Laboratorio de Ensayo de Materiales N°1 de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (LEM).

3.2.1 Análisis Granulométrico

Norma usada: NTP 400.012:2021 “AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino y grueso. Método de ensayo. 4ª Edición” y la NTP 400.037:2021 “AGREGADOS. Agregados para concreto. Especificaciones. 5ª Edición”.

En la Figura 2 se muestra una foto de la arena natural usada en la tesis.



Figura 2 Arena natural usada en la tesis.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del análisis granulométrico de la arena se muestran en la Tabla 2 y Figura 3.

Tabla 2

Análisis granulométrico de la arena.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA ARENA					
TAMIZ		% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	% Que Pasa HUSO ASTM
mm	(pulg)				
9.50	3/8"	0.00	0.00	100.00	100
4.75	N°4	2.05	2.05	97.95	95 - 100
2.38	N°8	13.74	15.80	84.20	80 - 100
1.19	N°16	24.55	40.35	59.65	50 - 85
0.60	N°30	24.72	65.07	34.93	25 - 60
0.30	N°50	17.26	82.33	17.67	5 - 30
0.15	N°100	10.08	92.41	7.59	0 - 10
FONDO		7.59	100.00	0.00	0 - 3

Nota. Fuente: Elaboración propia.

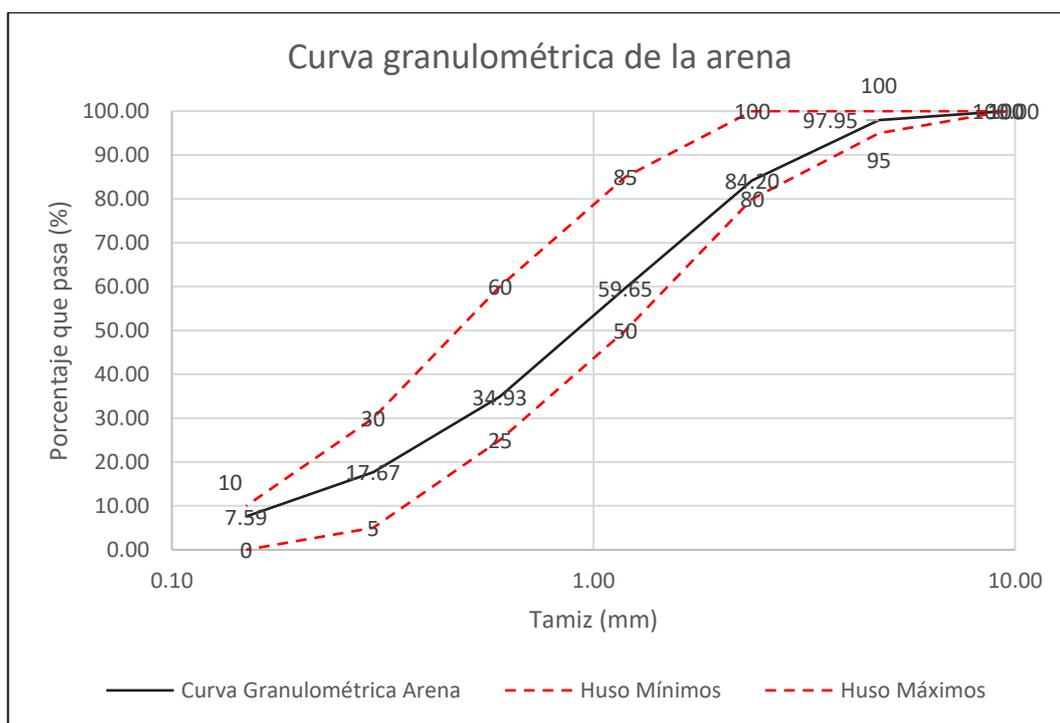


Figura 3 Curva granulométrica de la arena.

Fuente: Elaboración propia.

Este ensayo se realiza ordenando tamices con un tamaño de abertura conocidos, de forma que las partículas de la arena sean retenidas de mayor a menor tamaño desde arriba hacia abajo. La Figura 4 muestra al aparato de ensayo

con los tamices debidamente colocados y ajustados. Tras el vibrado se pesan las partículas retenidas en cada uno de los tamices y el fondo, que servirán para calcular el porcentaje que pasa por cada tamiz y así poder dibujar la curva granulométrica.



Figura 4 Tamices para ensayo granulométrico de la arena.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5 se muestra una foto de la piedra usada en la tesis.



Figura 5 Piedra usada en la tesis.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del análisis granulométrico de la piedra se muestran en la Tabla 3 y Figura 6. Para la piedra, la NTP 400.037:2018 establece un grupo de husos, de los cuales se selecciona el que mejor se ajuste a las características de la piedra usando los valores de Tamaño Máximo Nominal y los valores de los porcentajes que pasan los tamices normalizados; se usaron los valores del Huso 57.

Tabla 3

Análisis granulométrico de la piedra.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA PIEDRA					
TAMIZ		% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	% Que Pasa HUSO ASTM
mm	(pulg)				
38.10	1 1/2"	0.00	0.00	100.00	100
25.40	1"	0.00	0.00	100.00	95 - 100
19.05	3/4"	21.79	21.79	78.21	
12.70	1/2"	26.00	47.79	52.21	25 - 60
9.50	3/8"	15.52	63.31	36.69	
4.75	N°4	29.88	93.19	6.81	0 - 10
FONDO		6.81	100.00	0.00	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

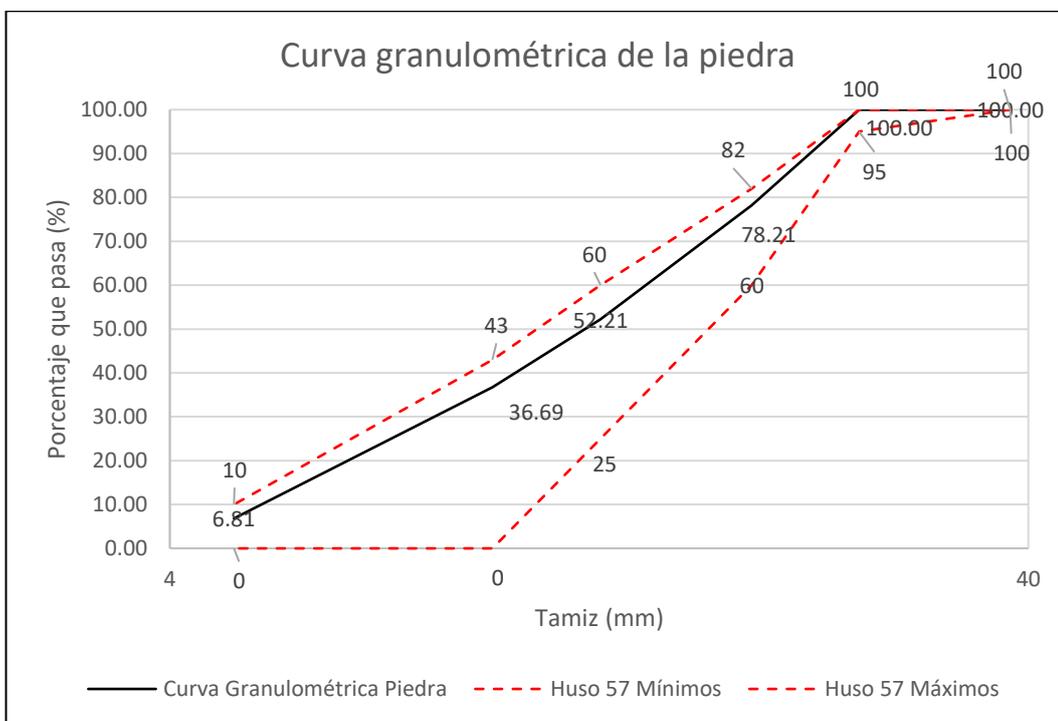


Figura 6 Curva granulométrica de la piedra.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 7 muestra cómo se ajusta los tamices del aparato de ensayo. Tras el vibrado se pesan las partículas retenidas en cada uno de los tamices y el fondo, que servirán para calcular el porcentaje que pasa por cada tamiz y así poder dibujar la curva granulométrica.



Figura 7 Tamices para ensayo granulométrico de la piedra.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 8 se muestra una foto de la arena reciclada usada en esta tesis.



Figura 8 Arena reciclada usada en la tesis.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del análisis granulométrico de la arena reciclada se muestran en la Tabla 4 y Figura 9.

Tabla 4

Análisis granulométrico de la arena reciclada.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA ARENA RECICLADA					
TAMIZ		% Retenido	% Retenido	% Que	% Que Pasa
mm	(pulg)		Acumulado	Pasa	HUSO ASTM
9.50	3/8"	0.00	0.00	100.00	100
4.75	N°4	0.64	0.64	99.36	95 - 100
2.38	N°8	17.52	18.16	81.84	80 - 100
1.19	N°16	28.75	46.91	53.09	50 - 85
0.60	N°30	17.95	64.85	35.15	25 - 60
0.30	N°50	14.28	79.13	20.87	5 - 30
0.15	N°100	10.48	89.62	10.38	0 - 10
FONDO		10.38	100.00	0.00	0 - 3

Nota. Fuente: Elaboración propia.

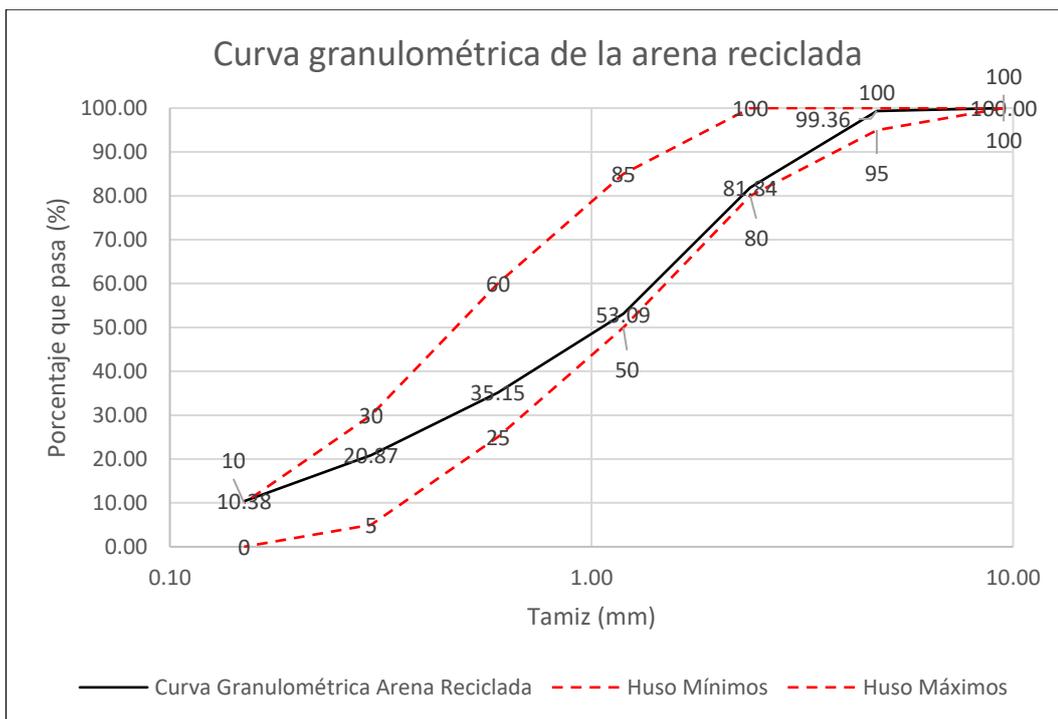


Figura 9 Curva granulométrica de la arena reciclada.

Fuente: Elaboración propia.

Módulo de fineza. Norma usada: NTP 400.012:2021 “AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global”. El módulo de fineza de la arena (natural) y la arena reciclada se encuentran en la Tabla 5 y Tabla 6 respectivamente.

Tabla 5

Módulo de fineza de la arena.

MÓDULO DE FINEZA DE LA ARENA		
Malla	% Retenido	%Retenido Acumulado
3/8"	0.00	0.00
N°4	2.05	2.05
N°8	13.74	15.80
N°16	24.55	40.35
N°30	24.72	65.07
N°50	17.26	82.33
N°100	10.08	92.41
	SUMA =	298.00
	Módulo de Fineza de la Arena =	2.98

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6

Módulo de fineza de la arena reciclada.

MÓDULO DE FINEZA DE LA ARENA RECICLADA		
Malla	% Retenido	%Retenido Acumulado
3/8"	0.00	0.00
N°4	0.64	0.64
N°8	17.52	18.16
N°16	28.75	46.91
N°30	17.95	64.85
N°50	14.28	79.13
N°100	10.48	89.62
	SUMA =	299.31
Módulo de Fineza de la Arena Reciclada =		2.99

Nota. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Peso Específico y Absorción

Norma usada para la arena: NTP 400.022:2021 "AGREGADOS. Determinación de la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino. Método de ensayo. 4ª Edición".

Norma usada para la piedra: NTP 400.021:2020 "AGREGADOS. Densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado grueso. Método de ensayo. 4ª Edición".

Los resultados de los ensayos de Peso específico y Absorción de la arena, piedra y arena reciclada se muestran en la Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9 respectivamente.

Tabla 7

Peso específico y Absorción de la arena.

PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DE LA ARENA			
Muestra:	1	2	3
Peso de la muestra superficialmente seca (g)	500.0	500.0	500.0
Peso de la muestra superficialmente seca + picnómetro + agua (g)	1003.7	1002.8	999.7
Peso del picnómetro (g)		193.1	
Peso del agua (g)	310.6	309.7	306.6
Peso de la muestra seca al horno (g)	499.1	485.8	485.2

Volumen del picnómetro (ml)	500.0
Peso específico de masa (g/cm^3)	2.57
Peso específico de masa superficialmente seco (g/cm^3)	2.62
Peso específico aparente (g/cm^3)	2.71
Absorción (%)	2.05

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Para realizar este ensayo se deja la arena sumergida en agua, tras lo cual se retira del agua, luego de eso se debe esperar hasta que la arena esté en estado superficialmente seca, luego se usa un picnómetro donde se vierten 500 gramos de la arena y 500 ml de agua, se registra el peso para retirar la arena y el agua del picnómetro en un recipiente que se lleva al horno.

La Figura 10 muestra el picnómetro que se menciona anteriormente, también se puede ver el cono donde se hace la comprobación de que la arena esté en estado superficialmente seca.



Figura 10 Picnómetro y cono para ensayo de peso específico y absorción.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8

Peso específico y Absorción de la piedra.

PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DE LA PIEDRA				
	Muestra:	1	2	3
Peso de la muestra secada al horno (kg)		3.9	3.9	3.9
Peso de la muestra saturada superficialmente seca (kg)		4.0	4.0	4.0

Peso de la muestra sumergida en agua (kg)	2.5	2.5	2.5
Peso específico de masa (g/cm ³)		2.63	
Peso específico de masa saturado superficialmente seco (g/cm ³)		2.67	
Peso específico aparente (g/cm ³)		2.74	
Absorción (%)		1.58	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Este ensayo consiste en dejar sumergida la piedra en agua, tras lo cual se retira y se seca con un trapo hasta que esté superficialmente seca, entonces se pesa cierta cantidad (en este caso 4kg) definida por la norma, tras lo cual se vuelve a pesar, pero esta vez sumergida en agua.

La Figura 11 muestra cómo se registra el peso de la piedra en estado superficialmente seca sumergida en agua.



Figura 11 Peso de la piedra superficialmente seca sumergida en agua.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9

Peso específico y Absorción de la arena reciclada.

PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DE LA ARENA RECICLADA			
Muestra:	1	2	3
Peso de la muestra superficialmente seca (g)	500.0	500.0	500.0
Peso de la muestra superficialmente seca + picnómetro + agua (g)	976.7	972.4	973.6
Peso del picnómetro (g)		193.1	
Peso del agua (g)	283.6	279.3	280.5
Peso de la muestra seca al horno (g)	454.8	472.0	472.0

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO ELABORADO CON AGUA RESIDUAL TRATADA Y AGREGADO FINO RECICLADO, PARA A/C 0.45 y 0.50

Volumen del picnómetro (ml)	500.0
Peso específico de masa (g/cm ³)	2.13
Peso específico de masa superficialmente seco (g/cm ³)	2.28
Peso específico aparente (g/cm ³)	2.52
Absorción (%)	7.27

Nota. Fuente: Elaboración propia.

3.2.3 Peso Unitario

Norma usada para el peso unitario: NTP 400.017:2020 “AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar la masa por unidad de volumen o densidad (“Peso Unitario”) y los vacíos en los agregados. 4ª Edición”.

Estos ensayos se realizaron para la arena, piedra y arena reciclada.

Los resultados del ensayo de Peso Unitario se muestran en la Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12 para la arena, piedra y arena reciclada respectivamente.

Tabla 10

Peso unitario de la arena natural.

PESO UNITARIO DE LA ARENA NATURAL				
PESO UNITARIO SUELTO				
	Muestra:	1	2	3
Peso del recipiente más el agregado (kg)		6.25	6.40	6.39
Peso del recipiente (kg)			1.57	
Peso del agregado (kg)		4.68	4.83	4.82
Volumen nominal del recipiente (m ³)			0.0028	
Peso unitario suelto (kg/m ³)			1705.95	
PESO UNITARIO COMPACTADO				
	Muestra:	1	2	3
Peso del recipiente más el agregado (kg)		6.77	6.78	6.75
Peso del recipiente (kg)			1.57	
Peso del agregado (kg)		5.2	5.21	5.18
Volumen nominal del recipiente (m ³)			0.0028	
Peso unitario compactado (kg/m ³)			1855.95	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Para este ensayo se debe usar agregados en estado seco, por eso previo al ensayo se puso una muestra en un recipiente que se llevó al horno.



Figura 12 Peso unitario de la arena natural.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 12 se ve el recipiente donde se realiza el ensayo de peso unitario (suelto y compactado) de la arena. Para la piedra el proceso es similar, solo cambia el tamaño del recipiente a usar.

Tabla 11

Peso unitario de la piedra.

PESO UNITARIO DE LA PIEDRA				
PESO UNITARIO SUELTO				
	MUESTRA:	1	2	3
Peso del recipiente más el agregado (kg)		17.14	17.24	17.13
Peso del recipiente (kg)			4.34	
Peso del agregado (kg)		12.80	12.90	12.79
Volumen nominal del recipiente (m ³)			0.0093	
Peso unitario suelto (kg/m ³)			1379.57	
PESO UNITARIO COMPACTADO				
	MUESTRA:	1	2	3
Peso del recipiente más el agregado (kg)		18.61	18.49	18.55
Peso del recipiente (kg)			4.34	
Peso del agregado (kg)		14.27	14.15	14.21
Volumen nominal del recipiente (m ³)			0.0093	
Peso unitario compactado (kg/m ³)			1527.96	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12

Peso unitario de la arena reciclada.

PESO UNITARIO DE LA ARENA RECICLADA				
PESO UNITARIO SUELTO				
	MUESTRA:	1	2	3
Peso del recipiente más el agregado (kg)		5.45	5.59	5.47
Peso del recipiente (kg)			1.57	
Peso del agregado (kg)		3.88	4.02	3.90
Volumen nominal del recipiente (m ³)			0.0028	
Peso unitario suelto (kg/m ³)			1404.76	
PESO UNITARIO COMPACTADO				
	MUESTRA:	1	2	3
Peso del recipiente más el agregado (kg)		5.68	5.69	5.72
Peso del recipiente (kg)			1.57	
Peso del agregado (kg)		4.11	4.12	4.15
Volumen nominal del recipiente (m ³)			0.0028	
Peso unitario compactado (kg/m ³)			1473.81	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

3.2.4 Contenido de Humedad

Norma usada para el contenido de humedad: NTP 339.185:2021 "AGREGADOS. Determinación del contenido de humedad total evaporable de agregados por secado. Método de ensayo. 3ª Edición".

Estos ensayos se realizaron para la arena, piedra y arena reciclada.

Los resultados del ensayo de Contenido de Humedad se muestran en la Tabla 13, Tabla 14 y Tabla 15 para la arena, piedra y arena reciclada respectivamente.

Tabla 13

Contenido de humedad de la arena natural.

CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA ARENA NATURAL				
	MUESTRA:	1	2	3
Peso de la muestra húmeda original (g)		501.7	500.0	503.3
Peso de la muestra seca (g)		491.7	490.5	494.3
Peso del agua en muestra húmeda original (g)		10.0	9.5	9.0
Contenido de Humedad (%)			1.93	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14

Contenido de humedad de la piedra.

CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA PIEDRA				
	MUESTRA:	1	2	3
Peso de la muestra húmeda original (g)		5006.2	5011.5	5001.3
Peso de la muestra seca (g)		4938.2	4938.0	4936.3
Peso del agua en muestra húmeda original (g)		68.0	73.5	65.0
Contenido de Humedad (%)			1.39	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15

Contenido de humedad de la arena reciclada.

CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA ARENA RECICLADA				
	MUESTRA:	1	2	3
Peso de la muestra húmeda original (g)		502.2	500.5	500.8
Peso de la muestra seca (g)		465.7	465.0	465.3
Peso del agua en muestra húmeda original (g)		36.5	35.5	35.5
Contenido de Humedad (%)			7.70	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento de este ensayo consiste en pesar una muestra del agregado (sea fino o grueso) en su estado natural, con la humedad con la que llega de la cantera o planta de producción (para el agregado reciclado), tras lo cual se lleva al horno para obtener el peso seco de la muestra. La Figura 13 muestra cómo se dejan los recipientes para la arena natural y la arena reciclada.



Figura 13 Contenido de humedad de la arena.

Fuente: Elaboración propia.

Para la piedra el procedimiento de ensayo es el mismo, solo cambia en que el peso de la muestra a ensayar es mayor que el de la arena.

3.2.5 Proporción entre Agregados

Previo al diseño de mezcla, se calculó la proporción entre arena y piedra por el método de máxima compactación del peso unitario. Este método es usado cuando se quiere calcular el mejor acomodo entre las partículas de los agregados (arena y piedra) de forma experimental, como alternativa se tienen otros métodos en los cuales mediante tablas se puede hallar esta proporción.

Para la mezcla patrón, que estuvo conformada por arena y piedra, se halló la mejor proporción entre estos. Para la mezcla variante, que estuvo conformada por arena reciclada y piedra, se tuvo que hallar otra mejor proporción, puesto que el tipo de arena usado entre ambas mezclas fue distinto.

Los resultados del ensayo de Peso Unitario Compactado (PUC) entre distintas proporciones de arena y piedra se muestran en la Tabla 16. Esta proporción fue usada en la mezcla patrón.

Tabla 16

PUC de la combinación entre arena y piedra.

Muestra	% Arena	% Piedra	PUC (kg/m ³)
1	45.0	55.0	1951.61
2	47.5	52.5	1970.97
3	50.0	50.0	1939.78
4	52.5	47.5	1930.11
5	55.0	45.0	1912.90

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 14 muestra la gráfica de los resultados de la Tabla 16, en la figura se ve un valor máximo, que representa la mejor proporción entre arena y piedra. Esta proporción fue usada en la mezcla patrón.

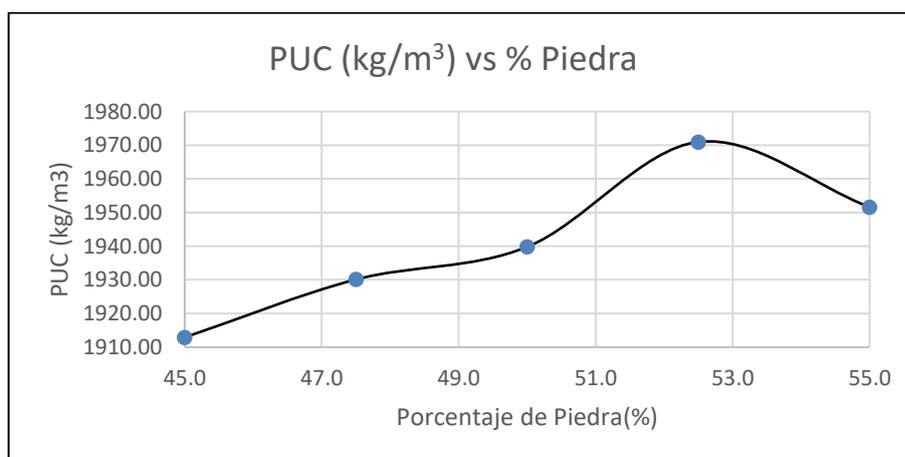


Figura 14 PUC vs %Piedra – mezcla patrón.

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo la máxima compactación cuando se tuvo una proporción de 47.5% de arena y 52.5% de piedra.

Los resultados del ensayo de Peso Unitario Compactado (PUC) entre distintas proporciones de arena reciclada y piedra se muestran en la Tabla 17. Esta proporción fue usada en la mezcla variante.

Tabla 17

PUC de la combinación entre arena reciclada y piedra.

Muestra	% Arena Reciclada	% Piedra	PUC (kg/m ³)
1	42.5	57.5	1719.35
2	45.0	55.0	1727.96
3	47.5	52.5	1694.62
4	50.0	50.0	1690.32

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 15 muestra la gráfica de los resultados de la Tabla 17, en la figura se ve un valor máximo, que representa la mejor proporción entre arena reciclada y piedra. Esta proporción fue usada en la mezcla variante.

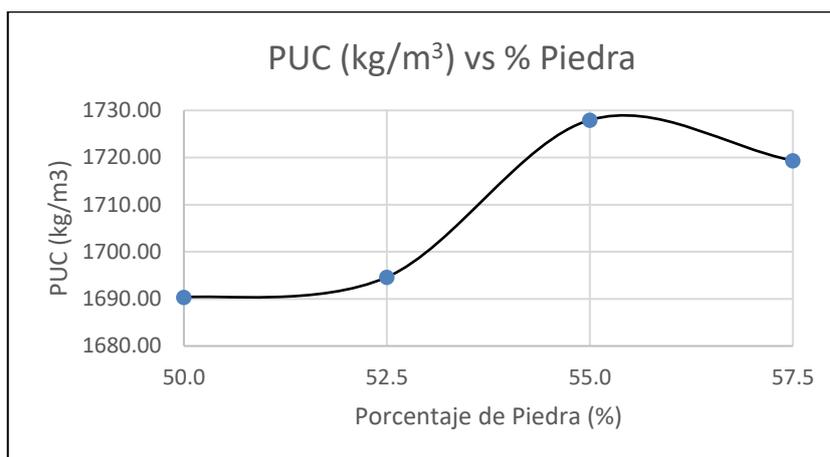


Figura 15 PUC vs %Piedra – mezcla variante.

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo la máxima compactación cuando se tuvo una proporción de 45.0% de arena reciclada y 55.0% de piedra.

3.3 ENSAYOS AL AGUA RESIDUAL TRATADA

Se realizaron en el Laboratorio de Investigación y Certificaciones de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería (LABICER).

3.3.1 Cloruros

Norma usada para determinar la cantidad de cloruros en el agua residual tratada: NTP 214.021:2016 "AGUA POTABLE. Determinación de cloruros. Método argentométrico. 1ª Edición".

El resultado de la cantidad de cloruros solubles (Cl^-) en el agua residual tratada usada como agua de mezcla fue de 105.14 mg/l o 105.14 ppm.

3.3.2 Sulfatos

Norma usada para determinar la cantidad de sulfatos en el agua residual tratada: NTP 214.023:2016 "CALIDAD DEL AGUA. Determinación de sulfatos. Método turbidimétrico. 3ª Edición".

El resultado de la cantidad de sulfatos solubles (SO_4^{2-}) en el agua residual tratada usada como agua de mezcla fue de 337.25 mg/l o 337.25 ppm.

3.3.3 Sólidos Totales Por Masa

Norma usada para determinar la cantidad total de sólidos disueltos en el agua residual tratada: NTP 339.152:2015 "SUELOS. Método de ensayo normalizado para la determinación del contenido de sales solubles en suelos y agua subterránea. 1ª Edición".

El resultado de la cantidad total de sólidos disueltos (TSD) en el agua residual tratada usada como agua de mezcla fue de 815.00 mg/l o 815.00 ppm.

3.3.4 Álcalis

Norma usada para determinar la cantidad de álcalis en el agua residual tratada: ASTM C114 ". Métodos de prueba estándar para análisis químicos del cemento hidráulico".

El resultado de la cantidad de álcalis (Na_2O y K_2O) en el agua residual tratada usada como agua de mezcla fue de 157.90 mg/l o 157.90 ppm.

3.4 DISEÑO DE MEZCLA

El diseño de mezcla se realizó para un total de 4 mezclas. Dos mezclas patrón y dos mezclas variantes, ambas para a/c de 0.45 y 0.50.

Las mezclas patrón estuvieron conformadas (aparte del cemento) por arena natural, piedra y agua potable. Mientras que las mezclas variantes

estuvieron conformadas por arena reciclada (reemplazo total de arena natural), piedra y agua residual tratada (reemplazo total de agua potable).

El procedimiento de diseño inició con la caracterización de los componentes del concreto. En este punto se calcularon los valores de las propiedades de los agregados que son necesarias para el procedimiento de diseño (granulometría, peso específico, absorción, peso unitario, contenido de humedad y proporción entre agregados).

El método de diseño del concreto patrón (para cada a/c) usado fue el de la Máxima compacidad de la combinación de agregados, también se usaron las tablas de diseño confeccionadas por ACI 211.

El método de máxima compacidad de la combinación de agregados es un método usado en trabajos de investigación, donde por medio de ensayos de peso unitario donde se combinan distintas proporciones de los agregados (arena y piedra), obteniendo un peso unitario máximo y así estimar la óptima o mejor proporción entre los agregados. Esta proporción se usa en el diseño del concreto, cabe mencionar que para esta tesis se calcularon dos proporciones óptimas, una para el diseño patrón (arena y piedra naturales) y otra para el diseño variante (arena reciclada y piedra natural).

El procedimiento de diseño se puede resumir en los siguientes pasos:

- Ensayo en agregados: granulometría, peso específico, absorción, peso unitario, contenido de humedad y proporción entre agregados.
- Para el valor del peso específico del agua se tuvieron dos casos: el agua en diseño patrón (agua potable), para el cual se consideró un valor de 1000 kg/m^3 ; y el agua en el diseño variante (agua residual tratada o ART), mediante ensayos se calculó que fue un valor de 996.8 kg/m^3 .
- Tabla ACI: usando el TMN de la piedra y un valor de asentamiento de entre 3" y 4", se estimó el Volumen unitario de agua.
- Tabla ACI: usando el TMN de la piedra se estimó el contenido de aire en la mezcla.
- Los valores de a/c fueron valores fijos, de 0.45 y 0.50.
- Con el Volumen unitario de agua y el a/c, se obtuvo la cantidad de cemento.
- Se calculó el volumen y el peso seco del cemento, agua y los agregados en la mezcla.

- Se corrigieron los pesos secos de los agregados por humedad, calculando así el peso húmedo de los agregados.
- Entonces, ya se tienen los pesos de cemento, agua y agregados (arena y piedra, considerando la humedad que tienen estos).
- Como verificación del procedimiento de diseño de mezcla, al obtener el concreto fresco se le realizó el ensayo de asentamiento, dando como resultado un valor contenido en el rango de entre 3" y 4".
- En los casos donde no cumpla con estar dentro del rango propuesto de asentamiento, se debe variar ligeramente la cantidad de agua (reducir la cantidad de agua si se quiere disminuir al asentamiento y viceversa) considerando que también se deberá variar la cantidad de cemento para que el valor del a/c se mantenga.

La Tabla 18 muestra el resumen de los diseños patrón para cada a/c, en estos diseños se usó cemento tipo I, agua potable, arena natural y piedra natural.

Tabla 18

Diseños patrón

a/c	Cemento (kg/m ³)	Agua (l/m ³)	Arena natural (kg/m ³)	Piedra (kg/m ³)
0.45	566.67	257.35	679.53	826.13
0.50	500.00	252.43	751.88	826.62

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Para identificar las mezclas con mayor facilidad, se usarán los siguientes Códigos de Mezcla (C.M.) para los diseños patrón:

- 0.45p: Mezcla patrón de a/c de 0.45.
- 0.50p: Mezcla patrón de a/c de 0.50.

La Tabla 19 muestra el resumen de los diseños variante para cada a/c, en estos diseños se usó cemento tipo I, agua residual tratada (ART), arena reciclada y piedra natural. Para las mezclas variante de ambos a/c se tuvo que realizar el ajuste de la cantidad de agua para encontrar un asentamiento de entre 3" y 4".

Tabla 19

Diseños variante

a/c	Cemento (kg/m ³)	ART (l/m ³)	Arena reciclada (kg/m ³)	Piedra (kg/m ³)
0.45	560	250.71	699.83	805.23
0.50	494	245.42	772.38	803.67

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Para identificar las mezclas variantes, se usarán los siguientes Códigos de Mezcla (C.M.) será:

- 0.45v: Mezcla variante de a/c de 0.45.
- 0.50v: Mezcla variantes de a/c de 0.50.

3.5 ENSAYOS AL CONCRETO FRESCO

Se realizaron en el Laboratorio de Ensayo de Materiales N°1 de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (LEM).

3.5.1 Asentamiento

Norma usada: NTP 339.035:2022 "CONCRETO. Medición del asentamiento del concreto de cemento hidráulico. Método de Ensayo. 5ª Edición".

La Tabla 20 muestra los asentamientos de las mezclas con a/c de 0.45.

Tabla 20

Asentamiento de mezclas con a/c de 0.45.

C.M.	Asentamiento (")
0.45p	3.3
0.45v	3.6

Nota 1. En el C.M., el número es el a/c y la letra indica si es patrón (p) o variante (v).

Nota 2. Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que el asentamiento en el procedimiento de diseño se estimó entre 3" y 4". La Figura 16 muestra en un diagrama los asentamientos de las mezclas con a/c de 0.45.

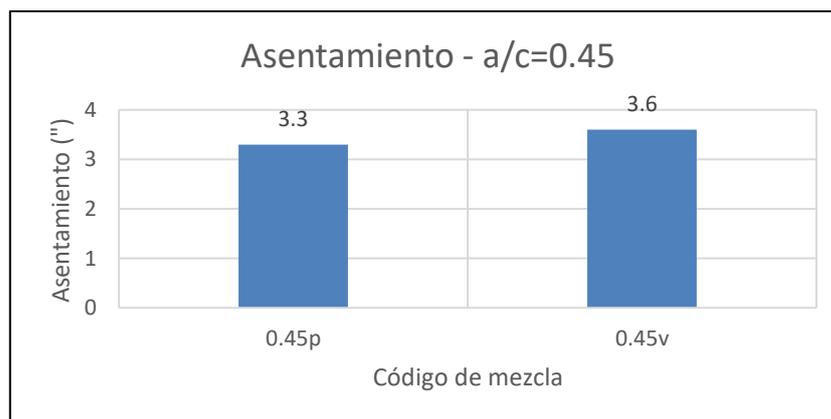


Figura 16 Asentamiento de mezclas con a/c de 0.45.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 21 muestra los asentamientos de las mezclas con a/c de 0.50.

Tabla 21

Asentamiento de mezclas con a/c de 0.50.

C.M.	Asentamiento (")
0.50p	3.3
0.50v	3.7

Nota 1. En el C.M., el número es el a/c y la letra indica si es patrón (p) o variante (v).

Nota 2. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 17 muestra en un diagrama los asentamientos de las mezclas con a/c de 0.50.

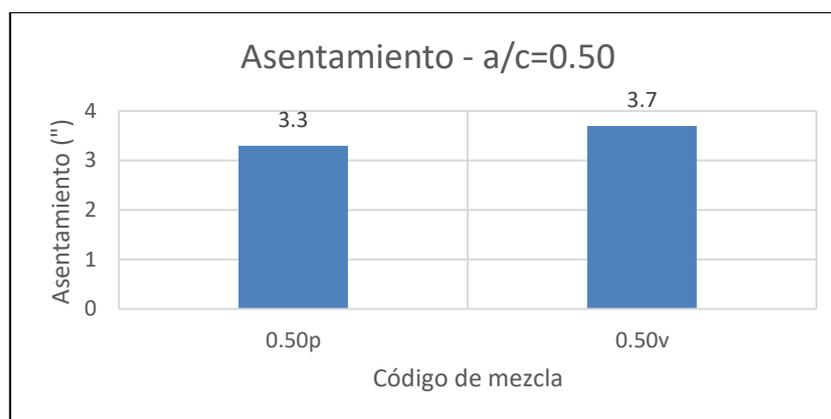


Figura 17 Asentamiento de mezclas con a/c de 0.50.

Fuente: Elaboración propia.

Para este ensayo se vierte la mezcla de concreto fresco en el cono de Abrams en 3 capas, compactando con 25 golpes en cada capa, tras lo cual se levanta el cono para medir cuánto de altura pierde el cono de concreto formado por el molde y la compactación. En la Figura 18 se muestra cómo se está a punto de retirar el cono para proceder a medir el asentamiento.



Figura 18 Equipo para ensayo de asentamiento del concreto.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2 Peso Unitario

Norma usada: NTP 339.046:2019 “CONCRETO. Método de ensayo para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico) del concreto. 3ª Edición”.

La Tabla 22 muestra el peso unitario de las mezclas con a/c de 0.45.

Tabla 22

Peso unitario de mezclas con a/c de 0.45.

C.M.	P.U. (kg/m ³)
0.45p	1755.91
0.45v	1653.76

Nota 1. En el C.M., el número es el a/c y la letra indica si es patrón (p) o variante (v).

Nota 2. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 19 muestra en un diagrama el peso unitario de las mezclas con a/c de 0.45.

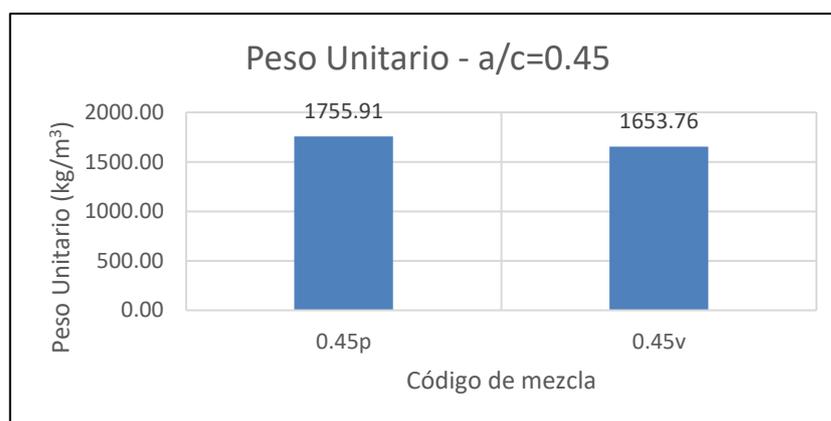


Figura 19 Peso unitario de mezclas con a/c de 0.45.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 23 muestra el peso unitario (P.U.) de las mezclas con a/c de 0.50.

Tabla 23

Peso unitario de mezclas con a/c de 0.50.

C.M.	P.U. (kg/m ³)
0.50p	1761.29
0.50v	1690.32

Nota 1. En el C.M., el número es el a/c y la letra indica si es patrón (p) o variante (v).

Nota 2. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 20 muestra en un diagrama el peso unitario de las mezclas con a/c de 0.50.

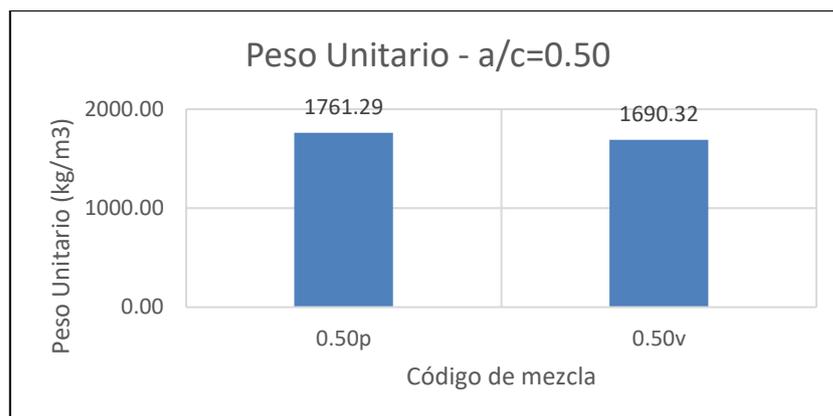


Figura 20 Peso unitario de mezclas con a/c de 0.50.

Fuente: Elaboración propia.

Para este ensayo se vierte la mezcla de concreto fresco en el recipiente en 3 capas, compactando con 25 golpes en cada capa, una vez se tengan las 3 capas se pesa la muestra en una balanza. En la Figura 21 se muestra una foto del procedimiento, donde se está a punto de iniciar la compactación de la segunda capa.



Figura 21 Peso unitario del concreto.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.3 Contenido de Aire

Norma usada: NTP 339.046:2019 “CONCRETO. Método de ensayo para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico) del concreto. 3ª Edición”.

La Tabla 24 muestra el contenido de aire de las mezclas con a/c de 0.45.

Tabla 24

Contenido de aire de mezclas con a/c de 0.45.

C.M.	C.A. (%)
0.50p	1.8
0.50v	2.5

Nota 1. En el C.M., el número es el a/c y la letra indica si es patrón (p) o variante (v).

Nota 2. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 22 muestra en un diagrama el contenido de aire de las mezclas con a/c de 0.45.

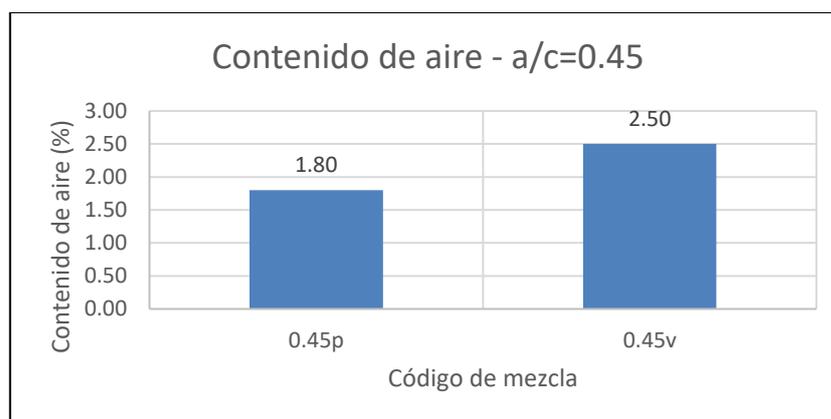


Figura 22 Contenido de aire de mezclas con a/c de 0.45.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 25 muestra el contenido de aire (C.A.) de las mezclas con a/c de 0.50.

Tabla 25

Contenido de aire de mezclas con a/c de 0.50.

C.M.	C.A. (%)
0.50p	1.45
0.50v	2.2

Nota 1. En el C.M., el número es el a/c y la letra indica si es patrón (p) o variante (v).

Nota 2. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 23 muestra en un diagrama el contenido de aire de las mezclas con a/c de 0.50.

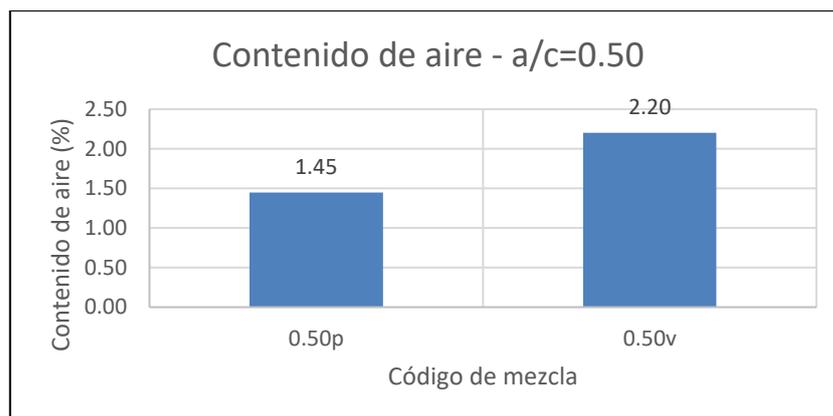


Figura 23 Contenido de aire de mezclas con a/c de 0.50.

Fuente: Elaboración propia.

Para este ensayo se vierte la mezcla de concreto fresco en la olla de Washington en 3 capas, compactando con 25 golpes en cada capa, tras lo cual se pone la parte superior del equipo, luego de lo cual se puede registrar el contenido de aire en la mezcla de concreto. La Figura 24 muestra cómo se asegura la olla Washington previo a registrar el contenido de aire de la mezcla de concreto.



Figura 24 Contenido de aire del concreto.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.4 Tiempo de Fraguado

Norma usada: NTP 339.082:2017 "CONCRETO. Método de ensayo para la determinación del tiempo de fraguado de mezclas por medio de la resistencia a la penetración. 4ª Edición".

Para este ensayo se usó un equipo que registra la fuerza con que penetran unas agujas (de área conocida) en la pasta de concreto. Con los valores de fuerza y el área, se pudo obtener un esfuerzo, que viene a ser la resistencia a la penetración.

Cabe mencionar que los tiempos de fraguado inicial y final se alcanzan cuando el valor de la resistencia a la penetración alcanza 500 lb/pulg² y 4000 lb/pulg² respectivamente. Para obtener estos tiempos, se usa la ecuación exponencial (que se muestra en cada una de las gráficas) a la que se aproxima la curva de Tiempo de fraguado, donde se puede obtener los valores de los tiempos de fraguado inicial y final.

La Tabla 26 muestra el tiempo de fraguado (T.F.) de la mezcla patrón con a/c de 0.45, cuyo código fue 0.45p.

Tabla 26

Tiempo de fraguado de mezcla patrón con a/c de 0.45.

Tiempo (min)	200	230	260	290	320	350
Fuerza (lb)	140	154	178	168	182	154
Área de aguja (pulg ²)	1	0.5	0.25	0.1	0.05	0.025
Resistencia a la penetración (lb/pulg ²)	140	308	712	1680	3640	6160
Tiempo de fraguado inicial (min):	247		Tiempo de fraguado final (min):			328

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 25 muestra en un diagrama el tiempo de fraguado de la mezcla patrón con a/c de 0.45, cuyo código fue 0.45p.

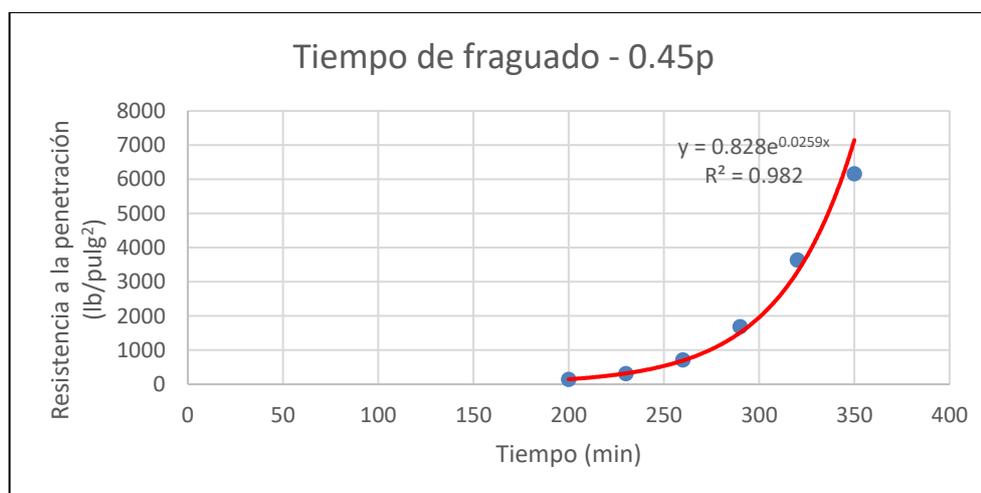


Figura 25 Tiempo de fraguado de mezcla patrón con a/c de 0.45.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 27 muestra el tiempo de fraguado de la mezcla variante con a/c de 0.45, cuyo código fue 0.45v.

Tabla 27

Tiempo de fraguado de mezcla variante con a/c de 0.45.

Tiempo (min)	193	223	253	283	313	343
Fuerza (lb)	186	169	186	169	200	183
Área de aguja (pulg ²)	1	0.5	0.25	0.1	0.05	0.025
Resistencia a la penetración (lb/pulg ²)	186	338	744	1690	4000	7320
Tiempo de fraguado inicial (min):	235		Tiempo de fraguado final (min):			318

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 26 muestra en un diagrama el tiempo de fraguado de la mezcla con código 0.45v.

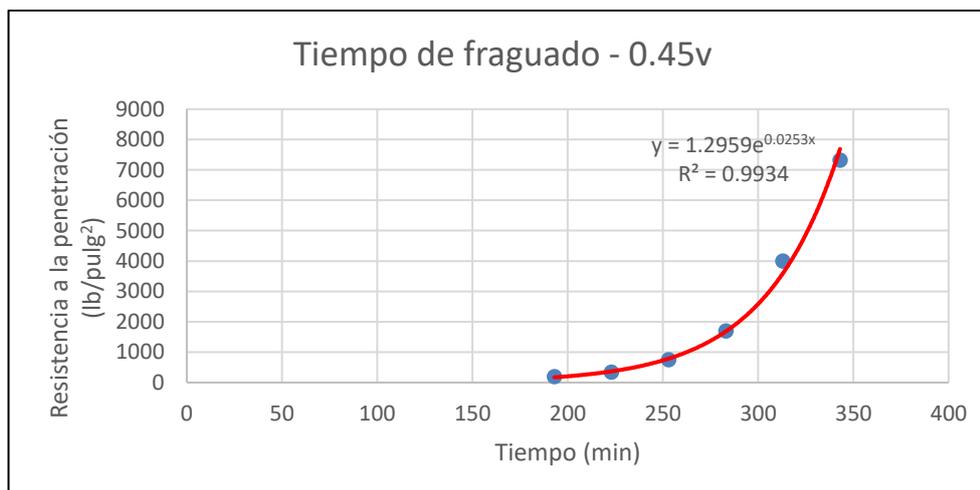


Figura 26 Tiempo de fraguado de mezcla patrón con a/c de 0.45.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 28 muestra el tiempo de fraguado de la mezcla patrón con a/c de 0.50, cuyo código fue 0.50p.

Tabla 28

Tiempo de fraguado de mezcla patrón con a/c de 0.50.

Tiempo (min)	160	190	220	250	280	310
Fuerza (lb)	104	132	144	138	120	132
Área de aguja (pulg ²)	1	0.5	0.25	0.1	0.05	0.025
Resistencia a la penetración (lb/pulg ²)	104	264	576	1380	2400	5280

Tiempo de fraguado inicial (min):	217	Tiempo de fraguado final (min):	297
-----------------------------------	-----	---------------------------------	-----

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 27 muestra en un diagrama el tiempo de fraguado de la mezcla con código 0.50p.

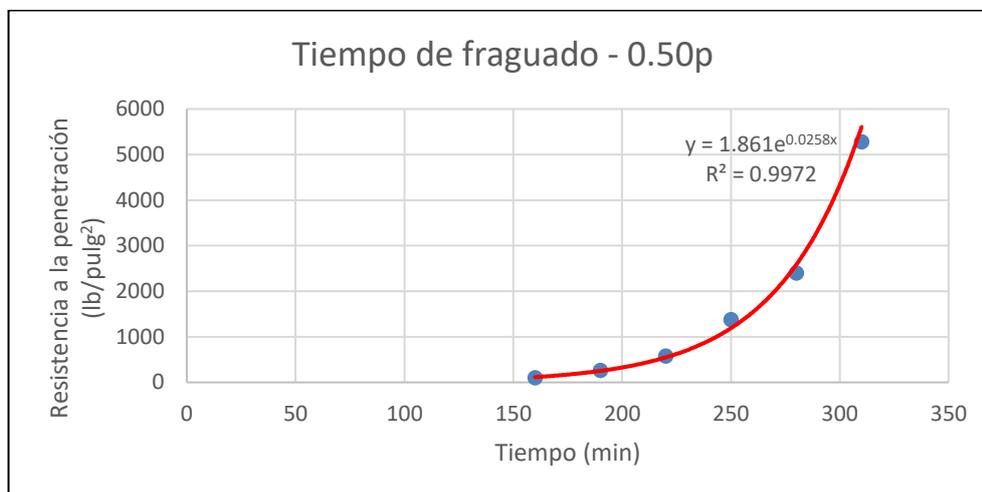


Figura 27 Tiempo de fraguado de mezcla patrón con a/c de 0.50.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 29 muestra el tiempo de fraguado de la mezcla variante con a/c de 0.50, cuyo código fue 0.50v.

Tabla 29

Tiempo de fraguado de mezcla variante con a/c de 0.50.

Tiempo (min)	158	188	218	248	278	308
Fuerza (lb)	154	142	146	138	142	160
Área de aguja (pulg ²)	1	0.5	0.25	0.1	0.05	0.025
Resistencia a la penetración (lb/pulg ²)	154	284	584	1380	2840	6400
Tiempo de fraguado inicial (min):	209	Tiempo de fraguado final (min):				292

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 28 muestra en un diagrama el tiempo de fraguado de la mezcla con código 0.50v.

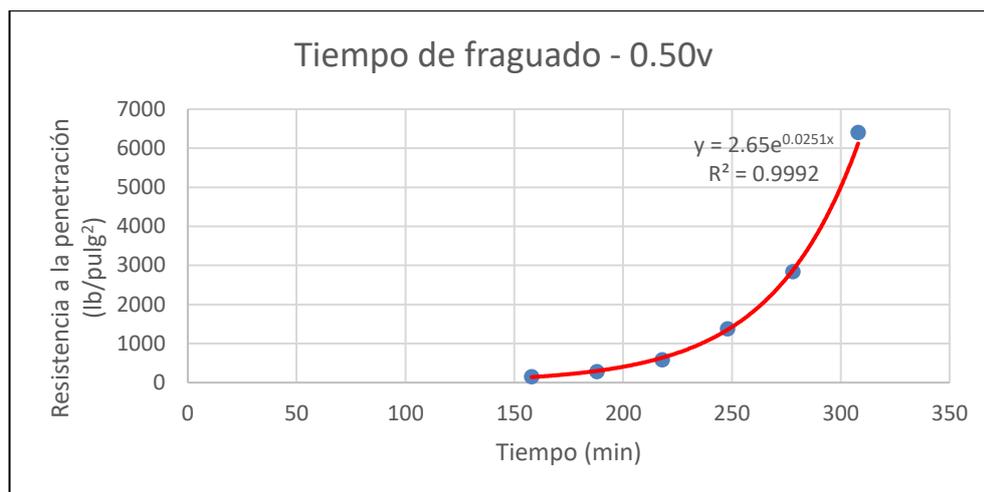


Figura 28 Tiempo de fraguado de mezcla variante con a/c de 0.50.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.5 Exudación

Norma usada: NTP 339.077:2020 “CONCRETO. Determinación de la exudación del concreto. Métodos de ensayo. 4ª Edición”.

La Tabla 30 muestra el cálculo del agua de exudación acumulada, como un porcentaje del agua de la mezcla en la probeta, para las mezclas con a/c de 0.45.

Tabla 30

Exudación de mezclas con a/c de 0.45.

Código de mezcla:	0.45p	0.45v
Masa de agua de exudación (g)	14.60	9.50
Agua de mezclado neta (kg)	8.28	8.12
Masa total de tanda (kg)	75.00	75.00
Masa de la muestra (g)	20175.00	20320.00
Masa del agua en muestra del ensayo (g)	2227.32	2199.98
%Exudación	0.66	0.43

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 29 muestra en un diagrama el valor de la exudación de las mezclas con a/c de 0.45 para la mezcla patrón y variante (con códigos de 0.45p y 0.45v respectivamente).

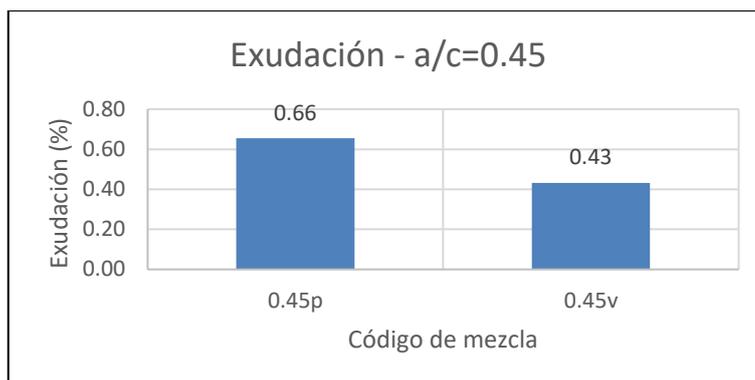


Figura 29 Exudación de mezclas con a/c de 0.45.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 31 muestra el cálculo del agua de exudación acumulada, como un porcentaje del agua de la mezcla en la probeta, para las mezclas con a/c de 0.50.

Tabla 31

Exudación de mezclas con a/c de 0.50.

Código de mezcla:	0.50p	0.50v
Masa de agua de exudación (g)	7.40	9.70
Agua de mezclado neta (kg)	8.12	7.95
Masa total de tanda (kg)	75.00	75.00
Masa de la muestra (g)	20102.00	20221.00
Masa del agua en muestra del ensayo (g)	2176.38	2143.43
%Exudación	0.34	0.45

Nota 1. En el C.M., el número es el a/c y la letra indica si es patrón (p) o variante (v).

Nota 2. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 30 muestra en un diagrama el valor de la exudación de las mezclas con a/c de 0.50 para la mezcla patrón y variante (con códigos de 0.50p y 0.50v respectivamente).

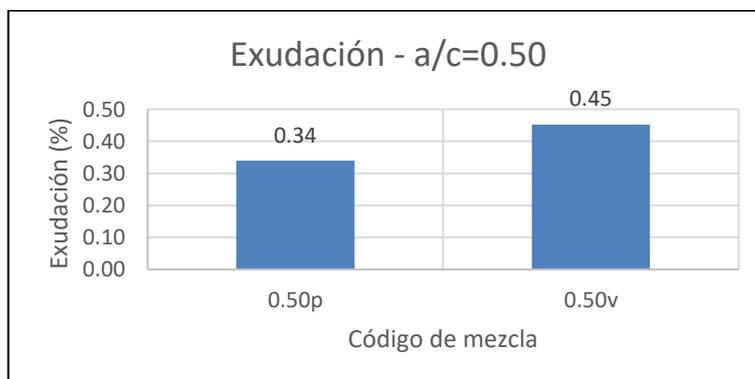


Figura 30 Exudación de mezclas con a/c de 0.50.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 31 muestra el molde con el concreto fresco y la pipeta con la que se extrae el agua que va exudando de la mezcla. La extracción de agua debe hacerse cuidadosamente para registrar valores más exactos.



Figura 31 Exudación del concreto.

Fuente: Elaboración propia.

3.6 ENSAYOS AL CONCRETO ENDURECIDO

Se realizaron en el Laboratorio de Ensayo de Materiales N°1 de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (LEM).

3.6.1 Resistencia a Compresión

Norma usada: NTP 339.034:2021 “CONCRETO. Determinación de la resistencia a compresión del concreto en muestras cilíndricas. Método de ensayo. 5ª Edición”.

Para cada tipo de mezcla se ensayaron 6 probetas a una edad de 7 días, mientras que para una edad de 28 días se ensayaron 15 probetas. Al tener 4 diseños, se tuvieron un total de 84 ensayos de resistencia a compresión.

La Figura 32 muestra la medición de los diámetros de las probetas, cabe mencionar que para el ensayo de compresión se deben medir dos diámetros, mientras que para el ensayo de tracción se deben medir tres diámetros. Esto porque en el primer ensayo solo se requiere la sección transversal de las probetas, mientras que en el segundo ensayo se requiere la sección longitudinal y se deben medir los diámetros de un extremo, a la mitad y al otro extremo de la probeta debido a que por efectos de gravedad hay variaciones en las dimensiones de la

probeta; razón por la cual se realizan más mediciones. En ambos casos se usó como valor de diámetro al promedio de las lecturas realizadas.



Figura 32 Medición de diámetros de las probetas.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 33 muestra la colocación vertical de una probeta en el aparato de ensayo para ser ensayada a compresión.



Figura 33 Ensayo a compresión del concreto.

Fuente: Elaboración propia.

- Resistencias a compresión a 7 días – $a/c = 0.45$.

La Tabla 32 tiene los resultados de resistencia a compresión del diseño patrón de a/c de 0.45 a una edad de 7 días.

Tabla 32

Resultados de resistencia a compresión a 7 días – 0.45p.

PATRÓN	$a/c = 0.45$	Edad: 7 días	C.M.:	0.45p
Muestra N°	Diámetro (cm)		Fuerza (kgf)	$f'c$ (kgf/cm ²)
1	9.90	9.95	28389	366.9
2	9.93	9.95	31610	407.3
3	9.97	10.00	26419	337.4
4	9.96	9.96	30331	389.3
5	9.93	9.95	28522	367.5
6	9.94	9.97	28015	359.9

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO ELABORADO CON AGUA RESIDUAL TRATADA Y AGREGADO FINO RECICLADO, PARA A/C 0.45 y 0.50

Promedio:	371.4
Desviación estándar (kgf/cm ²) = 24.2 Coeficiente de variación (%) = 6.5	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

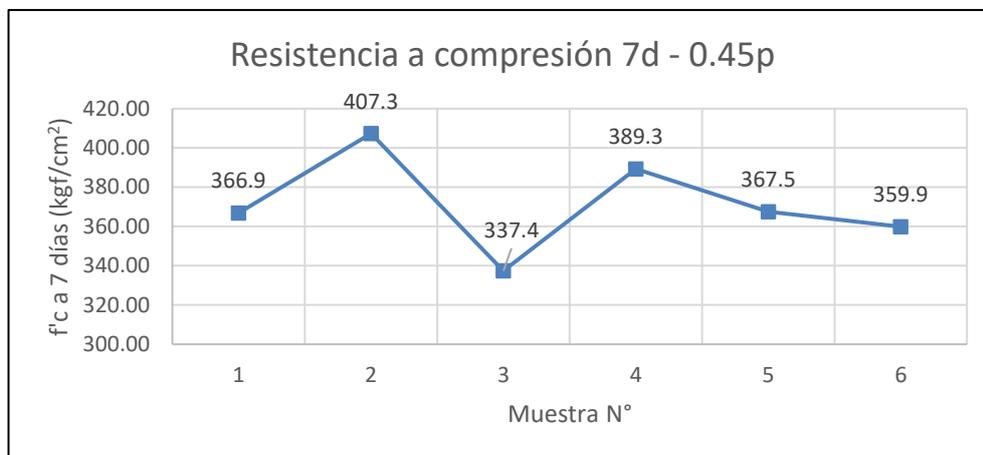


Figura 34 Resultados de resistencia a compresión a 7 días – 0.45p.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 34 muestra los resultados de resistencia a compresión del diseño patrón de a/c de 0.45 a una edad de 7 días en un diagrama de línea.

La Tabla 33 tiene los resultados de resistencia a compresión del diseño variante de a/c de 0.45 a una edad de 7 días.

Tabla 33

Resultados de resistencia a compresión a 7 días – 0.45v.

Variante	a/c = 0.45	Edad: 7 días	C.M.:	0.45v
Muestra N°	Diámetro (cm)		Fuerza (kgf)	f'c (kgf/cm ²)
1	9.92	9.95	23385	301.7
2	9.94	9.93	24776	319.6
3	9.98	9.94	26491	340.0
4	9.96	9.96	25260	324.2
5	9.95	9.93	24688	318.1
6	9.97	9.99	25007	319.7
			Promedio:	320.4

Desviación estándar (kgf/cm²) = 12.3 Coeficiente de variación (%) = 3.8

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 35 muestra los resultados de resistencia a compresión del diseño variante de a/c de 0.45 a una edad de 7 días en un diagrama de línea.

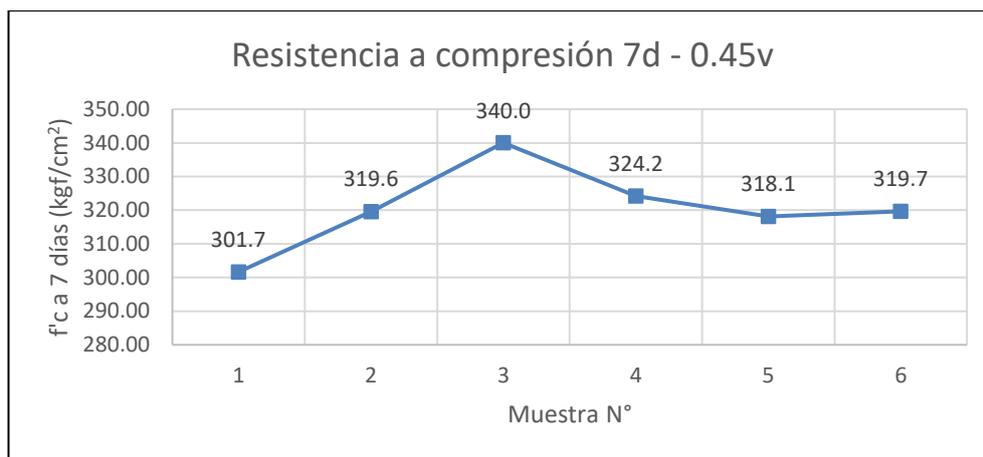


Figura 35 Resultados de resistencia a compresión a 7 días – 0.45v.

Fuente: Elaboración propia.

- Resistencias a compresión a 7 días – a/c =0.50.

La Tabla 34 tiene los resultados de resistencia a compresión del diseño patrón de a/c de 0.50 a una edad de 7 días.

Tabla 34

Resultados de resistencia a compresión a 7 días – 0.50p.

PATRÓN	a/c = 0.50	Edad: 7 días	C.M.:	0.50p
Muestra N°	Diámetro (cm)		Fuerza (kg)	f'c (kgf/cm²)
1	9.94	9.95	25641	330.1
2	9.90	9.94	23170	299.8
3	9.93	9.94	24912	321.4
4	9.92	9.95	23982	309.4
5	9.90	9.92	24457	317.1
6	9.95	9.93	24996	322.1
			Promedio:	316.6
Desviación estándar (kgf/cm²) = 10.7				Coeficiente de variación (%) = 3.4

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 36 muestra los resultados de resistencia a compresión del diseño patrón de a/c de 0.50 a una edad de 7 días en un diagrama de línea.

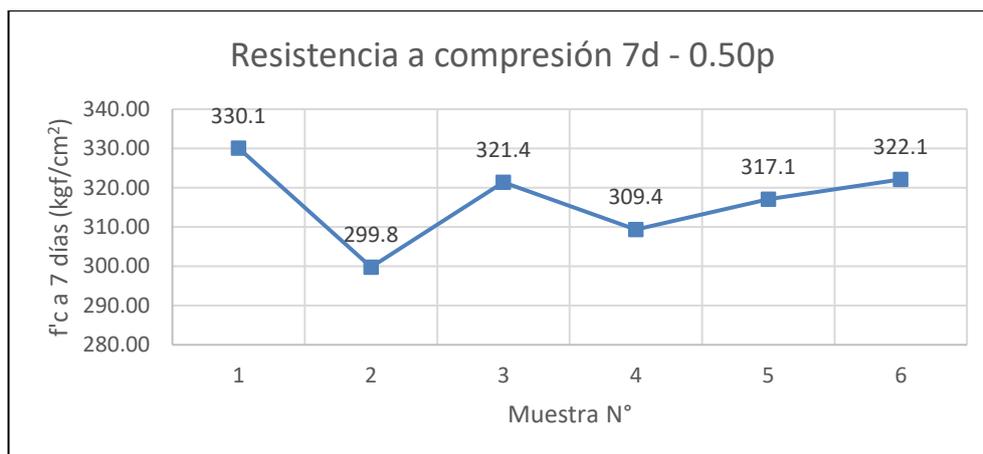


Figura 36 Resultados de resistencia a compresión a 7 días – 0.50p.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 35 tiene los resultados de resistencia a compresión del diseño variante de a/c de 0.50 a una edad de 7 días.

Tabla 35

Resultados de resistencia a compresión a 7 días – 0.50v.

Variante	a/c = 0.50	Edad: 7 días	C.M.:	0.50v
Muestra N°	Diámetro (cm)		Fuerza (kg)	f'c (kgf/cm²)
1	10.03	10.00	22364	283.9
2	9.95	10.02	23856	304.7
3	9.95	10.00	21081	269.8
4	9.98	10.01	23018	293.4
5	9.99	9.97	22374	286.0
6	10.00	9.96	22134	282.9
Promedio:				286.8
Desviación estándar (kgf/cm²) = 11.6				Coeficiente de variación (%) = 4.1

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 37 muestra los resultados de resistencia a compresión del diseño variante de a/c de 0.50 a una edad de 7 días en un diagrama de línea.

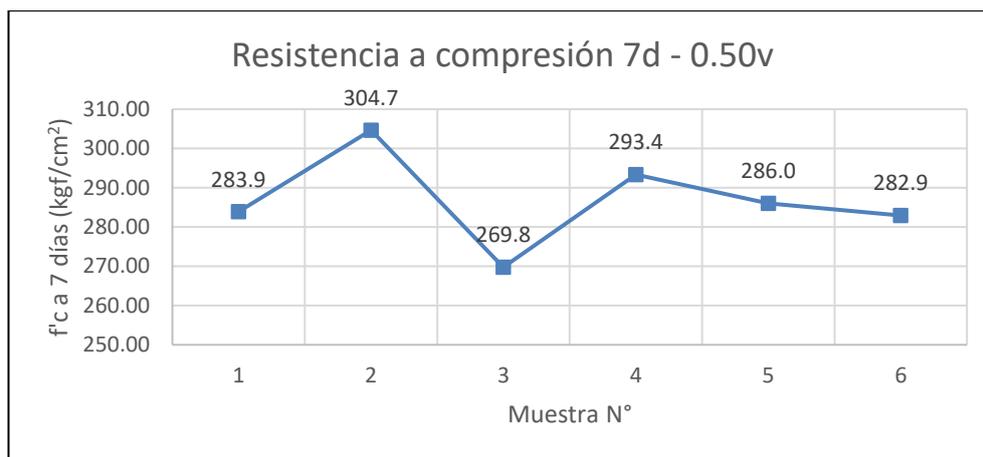


Figura 37 Resultados de resistencia a compresión a 7 días – 0.45v.

Fuente: Elaboración propia.

- Resistencias a compresión a 28 días – a/c =0.45.

La Tabla 36 tiene los resultados de resistencia a compresión del diseño patrón de a/c de 0.45 a una edad de 28 días.

Tabla 36

Resultados de resistencia a compresión a 28 días – 0.45p.

PATRÓN	a/c = 0.45	Edad: 28 días	C.M.:	0.45p
Muestra N°	Diámetro (cm)		Fuerza (kgf)	f'c (kgf/cm²)
1	9.96	9.98	34544	442.5
2	9.95	9.99	34616	443.4
3	10.00	9.98	34217	436.5
4	9.95	9.94	33995	437.6
5	9.97	10.00	34758	443.9
6	9.98	9.98	34700	443.6
7	9.94	9.92	33908	437.8
8	9.95	9.97	34750	446.0
9	9.90	10.00	33520	431.1
10	9.92	10.00	34888	447.8
11	9.92	9.98	34001	437.3
12	9.92	9.91	34200	442.9
13	9.97	10.00	34330	438.4
14	9.93	9.92	34235	442.5
15	9.90	9.95	34400	444.6
Promedio:				441.1

Desviación estándar (kgf/cm²) = 4.4 Coeficiente de variación (%) = 1.0

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 38 muestra los resultados de resistencia a compresión del diseño patrón de a/c de 0.45 a una edad de 28 días en un diagrama de línea.

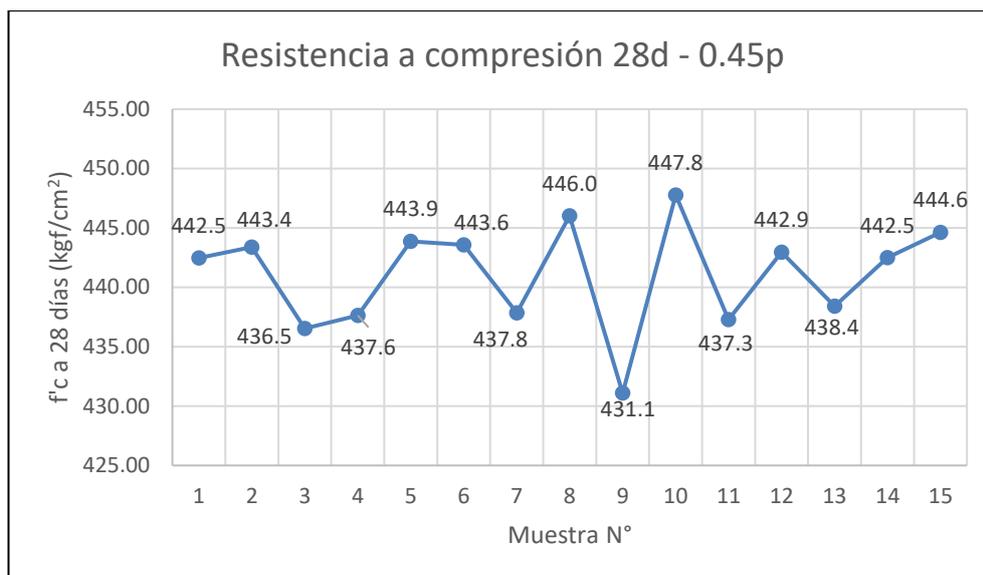


Figura 38 Resultados de resistencia a compresión a 28 días – 0.45p.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 37 tiene los resultados de resistencia a compresión del diseño variante de a/c de 0.45 a una edad de 28 días.

Tabla 37

Resultados de resistencia a compresión a 28 días – 0.45v.

Variante	a/c = 0.45	Edad: 28 días	C.M.:	0.45v
Muestra N°	Diámetro (cm)	Fuerza (kgf)	f'c (kgf/cm²)	
1	9.93	9.94	31022	400.2
2	9.95	9.96	29996	385.4
3	9.93	9.92	29680	383.6
4	9.92	9.91	29482	381.8
5	9.95	9.99	30059	385.0
6	9.92	9.92	31193	403.6
7	9.95	9.96	30267	388.9
8	9.94	9.98	30301	388.9
9	9.92	9.91	29024	375.9
10	9.99	9.97	29430	376.2
11	9.99	9.97	31584	403.8
12	9.96	9.92	29738	383.2
13	10.03	9.98	30199	384.1
14	9.94	9.97	29444	378.3
15	9.93	9.97	30895	397.3
		Promedio:		387.7
Desviación estándar (kgf/cm²) = 9.3				Coeficiente de variación (%) = 2.4

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 39 muestra los resultados de resistencia a compresión del diseño variante de a/c de 0.45 a una edad de 28 días en un diagrama de línea.

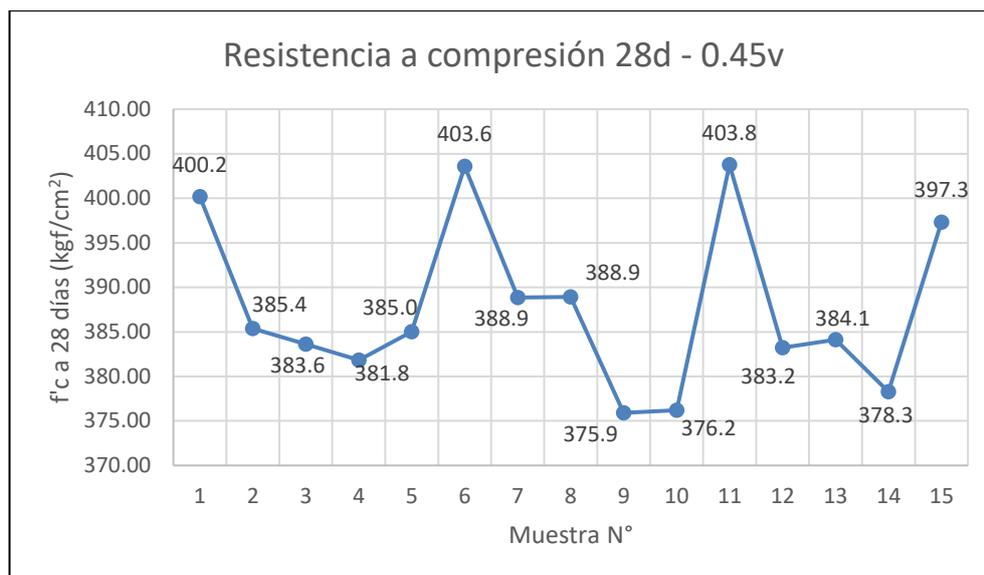


Figura 39 Resultados de resistencia a compresión a 28 días – 0.45v.

Fuente: Elaboración propia.

- Resistencias a compresión a 28 días – a/c = 0.50.

La Tabla 38 tiene los resultados de resistencia a compresión del diseño patrón de a/c de 0.50 a una edad de 28 días.

Tabla 38

Resultados de resistencia a compresión a 28 días – 0.50p.

PATRÓN	a/c = 0.50	Edad: 28 días	C.M.:	0.50p
Muestra N°	Diámetro (cm)	Fuerza (kgf)	f'c (kgf/cm²)	
1	9.95	10.00	32561	416.7
2	9.92	9.95	32426	418.3
3	9.92	9.98	32400	416.7
4	9.95	9.91	32702	422.3
5	9.97	10.00	32001	408.7
6	9.93	9.92	31996	413.6
7	9.94	9.95	32100	413.2
8	9.91	9.93	32224	416.9
9	9.90	9.90	31899	414.4
10	9.95	9.99	32005	410.0
11	9.90	9.94	32410	419.3
12	9.92	9.97	32102	413.3
13	9.93	9.95	31700	408.5
14	10.00	9.99	32500	414.2
15	9.89	10.00	32402	417.1
Promedio:				414.9
Desviación estándar (kgf/cm²) = 3.9				Coeficiente de variación (%) = 0.4

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 40 muestra los resultados de resistencia a compresión del diseño patrón de a/c de 0.50 a una edad de 28 días en un diagrama de línea.

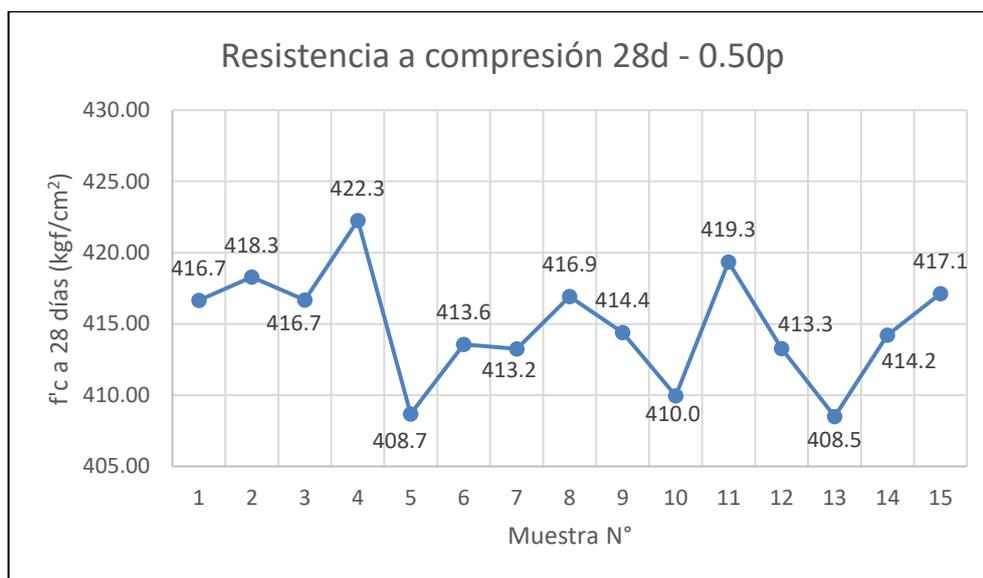


Figura 40 Resultados de resistencia a compresión a 28 días – 0.50p.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 39 tiene los resultados de resistencia a compresión del diseño variante de a/c de 0.50 a una edad de 28 días.

Tabla 39

Resultados de resistencia a compresión a 28 días – 0.50v.

Variante	a/c = 0.50	Edad: 28 días	C.M.:	0.50v
Muestra N°	Diámetro (cm)		Fuerza (kgf)	f'c (kgf/cm²)
1	9.95	9.98	29352	376.4
2	9.93	9.97	30616	393.7
3	9.96	9.99	27834	356.2
4	9.96	9.94	29254	376.2
5	10.00	9.98	28142	359.0
6	9.96	9.97	28210	361.7
7	9.94	9.90	29754	385.0
8	9.98	9.97	29250	374.3
9	10.00	9.95	28001	358.3
10	9.97	10.00	27992	357.5
11	9.92	9.96	29563	381.0
12	9.95	9.94	28500	366.9
13	9.93	9.95	30254	389.9
14	10.00	9.99	28613	364.7
15	9.94	9.94	27661	356.5
			Promedio:	370.5

Desviación estándar (kgf/cm²) = 12.8 Coeficiente de variación (%) = 3.5

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 41 muestra los resultados de resistencia a compresión del diseño variante de a/c de 0.50 a una edad de 28 días en un diagrama de línea.

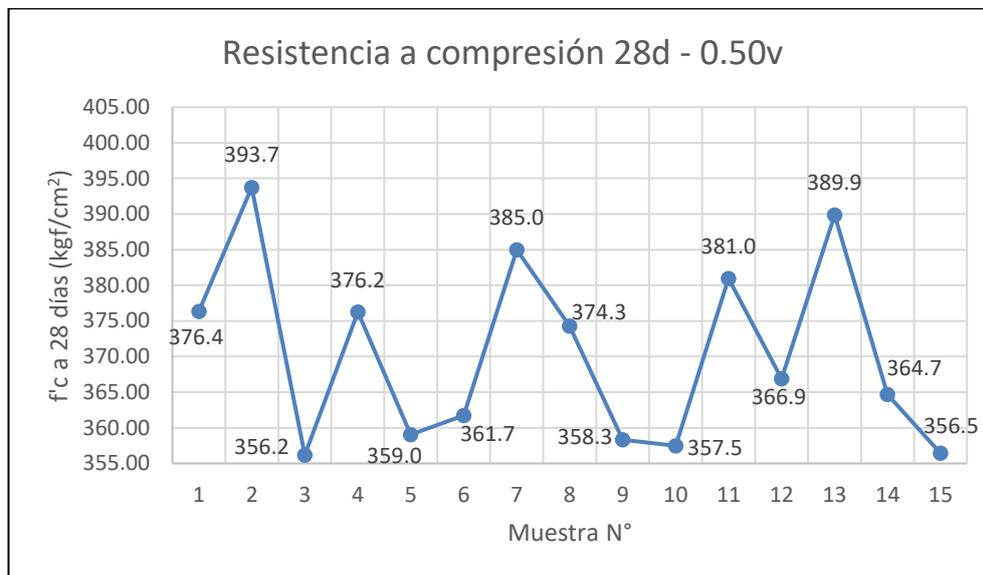


Figura 41 Resultados de resistencia a compresión a 7 días – 0.45v.

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2 Resistencia a Tracción

Norma usada: NTP 339.084:2012 “CONCRETO. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a tracción simple del concreto, por compresión diametral de una probeta cilíndrica. 3ª Edición”.

Para cada tipo de mezcla se ensayaron 3 probetas a una edad de 7 días y 3 probetas a una edad de 28 días. Al tener 4 diseños, se tuvieron un total de 24 ensayos de resistencia a tracción.



Figura 42 Ensayo a tracción del concreto.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 42 muestra como se prepara el equipo para colocar la probeta de forma horizontal para luego ser ensayada a tracción.

- Resistencias a tracción a 7 días – a/c = 0.45.

La Tabla 40 tiene los resultados de resistencia a tracción del diseño patrón de a/c de 0.45 a una edad de 7 días.

Tabla 40

Resultados de resistencia a tracción a 7 días – 0.45p.

PATRÓN	a/c = 0.45			Edad: 7 días		C.M.: 0.45p	
Muestra N°	Diámetro (cm)			Altura (cm)		Fuerza (kgf)	f't (kgf/cm ²)
1	9.89	9.92	9.98	20.75	20.80	8549	26.4
2	10.00	9.95	9.87	20.82	20.78	8024	24.7
3	9.87	9.94	9.98	20.70	20.74	8434	26.1
Promedio:							25.7
Desviación estándar (kgf/cm ²) = 0.9							Coeficiente de variación (%) = 3.5

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 43 muestra los resultados de resistencia a tracción del diseño patrón de a/c de 0.45 a una edad de 7 días en un diagrama de línea.

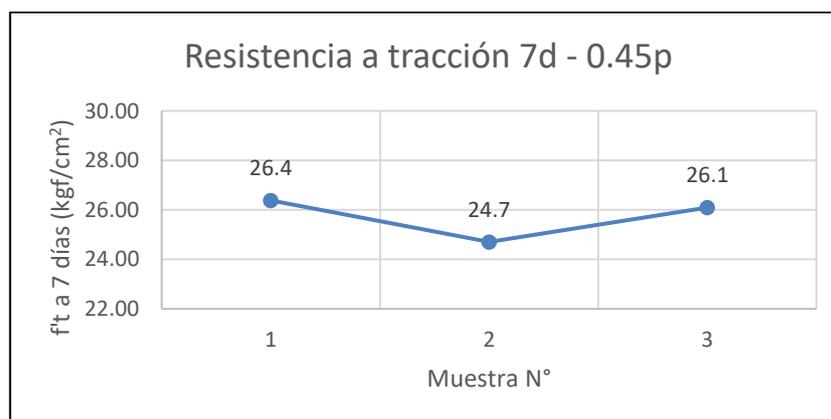


Figura 43 Resultados de resistencia a tracción a 7 días – 0.45p.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 41 tiene los resultados de resistencia a tracción del diseño variante de a/c de 0.45 a una edad de 7 días.

Tabla 41

Resultados de resistencia a tracción a 7 días – 0.45v.

Variante	a/c = 0.45			Edad: 7 días		C.M.: 0.45v	
Muestra N°	Diámetro (cm)			Altura (cm)		Fuerza (kgf)	f't (kgf/cm ²)
1	9.89	9.99	10.03	20.65	20.6	8534	26.4
2	9.88	9.96	10.1	20.67	20.65	8814	27.2
3	9.92	10.03	10.11	20.59	20.56	8967	27.7
Promedio:							27.1
Desviación estándar (kgf/cm ²) = 0.6							Coeficiente de variación (%) = 2.4

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 44 muestra los resultados de resistencia a tracción del diseño variante de a/c de 0.45 a una edad de 7 días en un diagrama de línea.

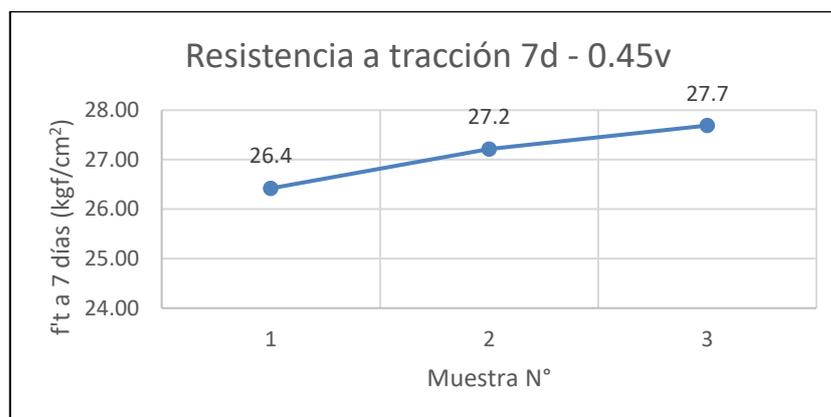


Figura 44 Resultados de resistencia a tracción a 7 días – 0.45v.

Fuente: Elaboración propia.

- Resistencias a tracción a 7 días – a/c = 0.50.

La Tabla 42 tiene los resultados de resistencia a tracción del diseño patrón de a/c de 0.50 a una edad de 7 días.

Tabla 42

Resultados de resistencia a tracción a 7 días – 0.50p.

PATRÓN	a/c = 0.50			Edad: 7 días		C.M.: 0.50p	
Muestra N°	Diámetro (cm)			Altura (cm)		Fuerza (kgf)	f't (kgf/cm²)
1	9.94	10	10.03	20.71	20.76	7631	23.5
2	9.94	9.93	9.93	20.84	20.82	7903	24.3
3	9.81	9.95	10.05	20.64	20.69	7727	24.0
Promedio:							23.9

Desviación estándar (kgf/cm²) = 0.4 Coeficiente de variación (%) = 1.8

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 45 muestra los resultados de resistencia a tracción del diseño patrón de a/c de 0.50 a una edad de 7 días en un diagrama de línea.

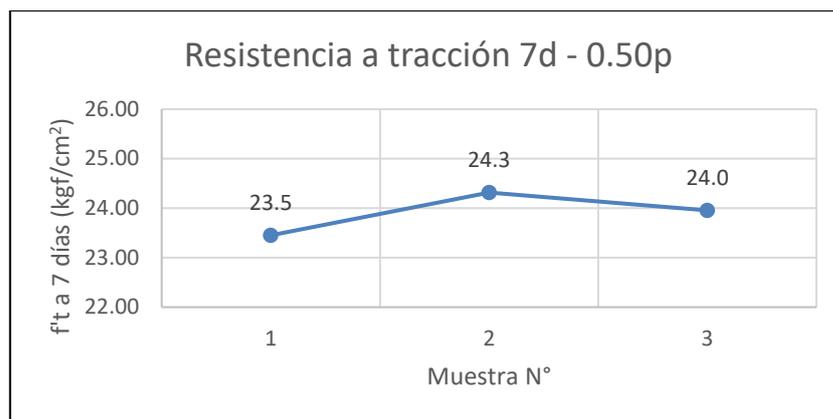


Figura 45 Resultados de resistencia a tracción a 7 días – 0.50p.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 43 tiene los resultados de resistencia a tracción del diseño variante de a/c de 0.50 a una edad de 7 días.

Tabla 43

Resultados de resistencia a tracción a 7 días – 0.50v.

Variante	a/c = 0.50			Edad: 7 días		C.M.: 0.50v	
Muestra N°	Diámetro (cm)			Altura (cm)		Fuerza (kgf)	ft (kgf/cm²)
1	9.89	9.94	10.05	20.71	20.76	8552	26.4
2	9.88	9.95	10.04	20.72	20.75	8129	25.1
3	9.86	9.93	10.01	20.61	20.67	8634	26.8
Promedio:							26.1
Desviación estándar (kgf/cm²) = 0.9 Coeficiente de variación (%) = 3.5							

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 46 muestra los resultados de resistencia a tracción del diseño variante de a/c de 0.50 a una edad de 7 días en un diagrama de línea.

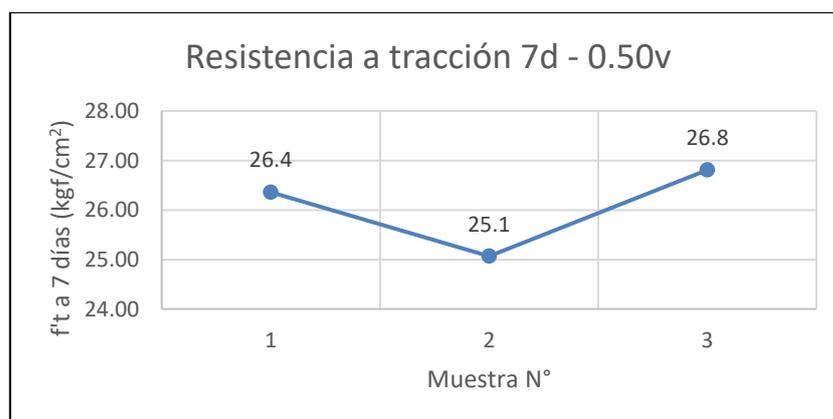


Figura 46 Resultados de resistencia a tracción a 7 días – 0.45v.

Fuente: Elaboración propia.

- Resistencias a tracción a 28 días – a/c = 0.45.

La Tabla 44 tiene los resultados de resistencia a tracción del diseño patrón de a/c de 0.45 a una edad de 28 días.

Tabla 44

Resultados de resistencia a tracción a 28 días – 0.45p.

PATRÓN	a/c = 0.45			Edad: 28 días		C.M.: 0.45p	
Muestra N°	Diámetro (cm)			Altura (cm)		Fuerza (kgf)	f't (kgf/cm ²)
1	9.79	9.9	9.97	20.65	20.69	12217	38.1
2	10.01	9.93	9.88	20.71	20.74	11204	34.6
3	9.91	9.95	10	20.81	20.83	11970	36.8
Promedio:							36.5
Desviación estándar (kgf/cm ²) = 1.7 Coeficiente de variación (%) = 4.8							

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 47 muestra los resultados de resistencia a tracción del diseño patrón de a/c de 0.45 a una edad de 28 días en un diagrama de línea.

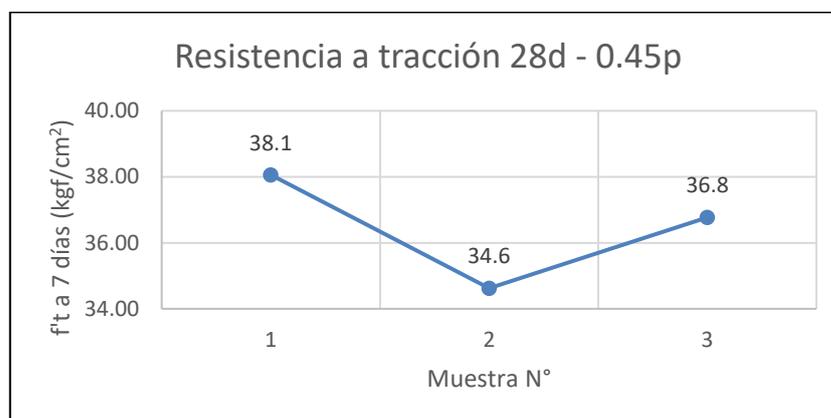


Figura 47 Resultados de resistencia a tracción a 28 días – 0.45p.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 45 tiene los resultados de resistencia a tracción del diseño variante de a/c de 0.45 a una edad de 28 días.

Tabla 45

Resultados de resistencia a tracción a 28 días – 0.45v.

Variante	a/c = 0.45			Edad: 28 días		C.M.: 0.45v	
Muestra N°	Diámetro (cm)			Altura (cm)		Fuerza (kgf)	f't (kgf/cm ²)
1	9.72	9.96	10.2	20.56	20.67	12570	39.0
2	9.75	9.95	10.25	20.62	20.7	12420	38.3
3	9.74	9.95	10.22	20.66	20.7	12602	38.9
Promedio:							38.7
Desviación estándar (kgf/cm ²) = 0.4 Coeficiente de variación (%) = 0.9							

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 48 muestra los resultados de resistencia a tracción del diseño variante de a/c de 0.45 a una edad de 28 días en un diagrama de línea.

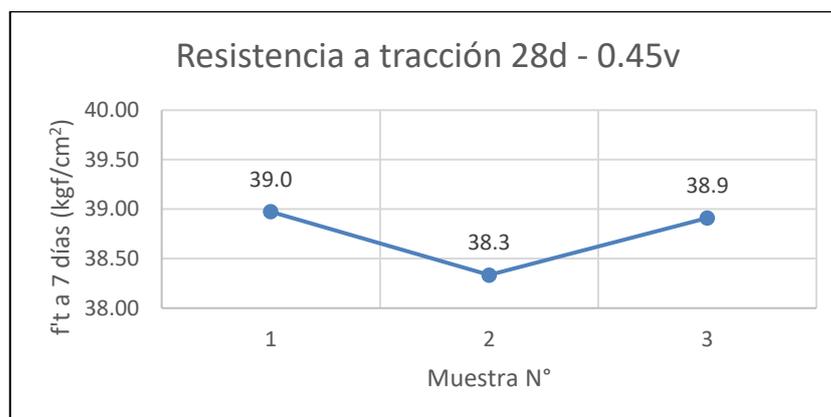


Figura 48 Resultados de resistencia a tracción a 28 días – 0.45v.

Fuente: Elaboración propia.

- Resistencias a tracción a 28 días – a/c = 0.50.

La Tabla 46 tiene los resultados de resistencia a tracción del diseño patrón de a/c de 0.50 a una edad de 28 días.

Tabla 46

Resultados de resistencia a tracción a 28 días – 0.50p.

PATRÓN	a/c = 0.50			Edad: 28 días		C.M.: 0.50p	
Muestra Nº	Diámetro (cm)			Altura (cm)		Fuerza (kgf)	f't (kgf/cm²)
1	9.7	9.9	10.18	20.6	20.66	11180	34.8
2	9.77	10	10.26	20.66	20.65	11089	34.1
3	9.75	9.96	10.22	20.59	20.6	11205	34.7
Promedio:							34.5

Desviación estándar (kgf/cm²) = 0.3 Coeficiente de variación (%) = 1.0

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 49 muestra los resultados de resistencia a tracción del diseño patrón de a/c de 0.50 a una edad de 28 días en un diagrama de línea.

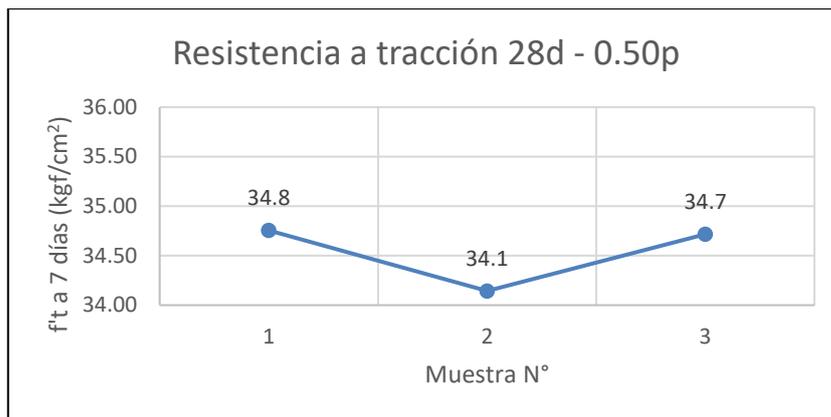


Figura 49 Resultados de resistencia a tracción a 28 días – 0.50p.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 47 tiene los resultados de resistencia a tracción del diseño variante de a/c de 0.50 a una edad de 28 días.

Tabla 47

Resultados de resistencia a tracción a 28 días – 0.50v.

Variante	a/c = 0.50			Edad: 28 días		C.M.: 0.50v	
Muestra N°	Diámetro (cm)			Altura (cm)		Fuerza (kgf)	f't (kgf/cm²)
1	9.74	9.99	10.2	20.55	20.59	11250	34.9
2	9.71	9.89	10.25	20.63	20.68	11349	35.2
3	9.8	9.95	10.22	20.59	20.6	11466	35.5
Promedio:							35.2
Desviación estándar (kgf/cm²) = 0.3 Coeficiente de variación (%) = 0.8							

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 50 muestra los resultados de resistencia a tracción del diseño variante de a/c de 0.50 a una edad de 28 días en un diagrama de línea.

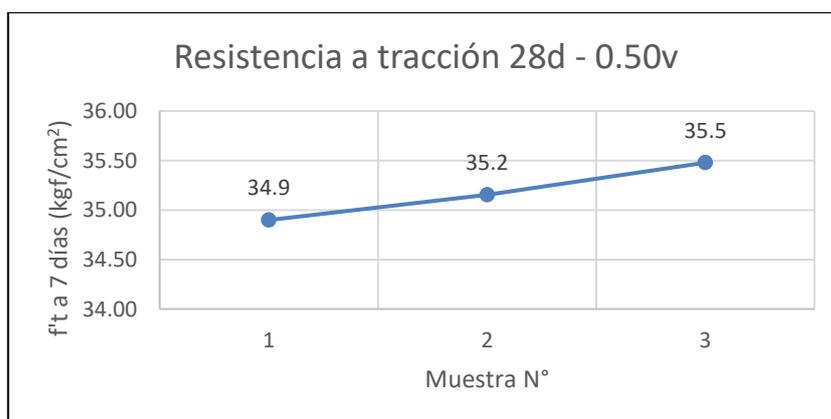


Figura 50 Resultados de resistencia a tracción a 7 días – 0.45v.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS A LOS AGREGADOS

4.1.1 Análisis Granulométrico

- Arena (natural y reciclada).

La Figura 51 contiene las curvas granulométricas de la arena natural (color azul) y la arena reciclada (color negro).

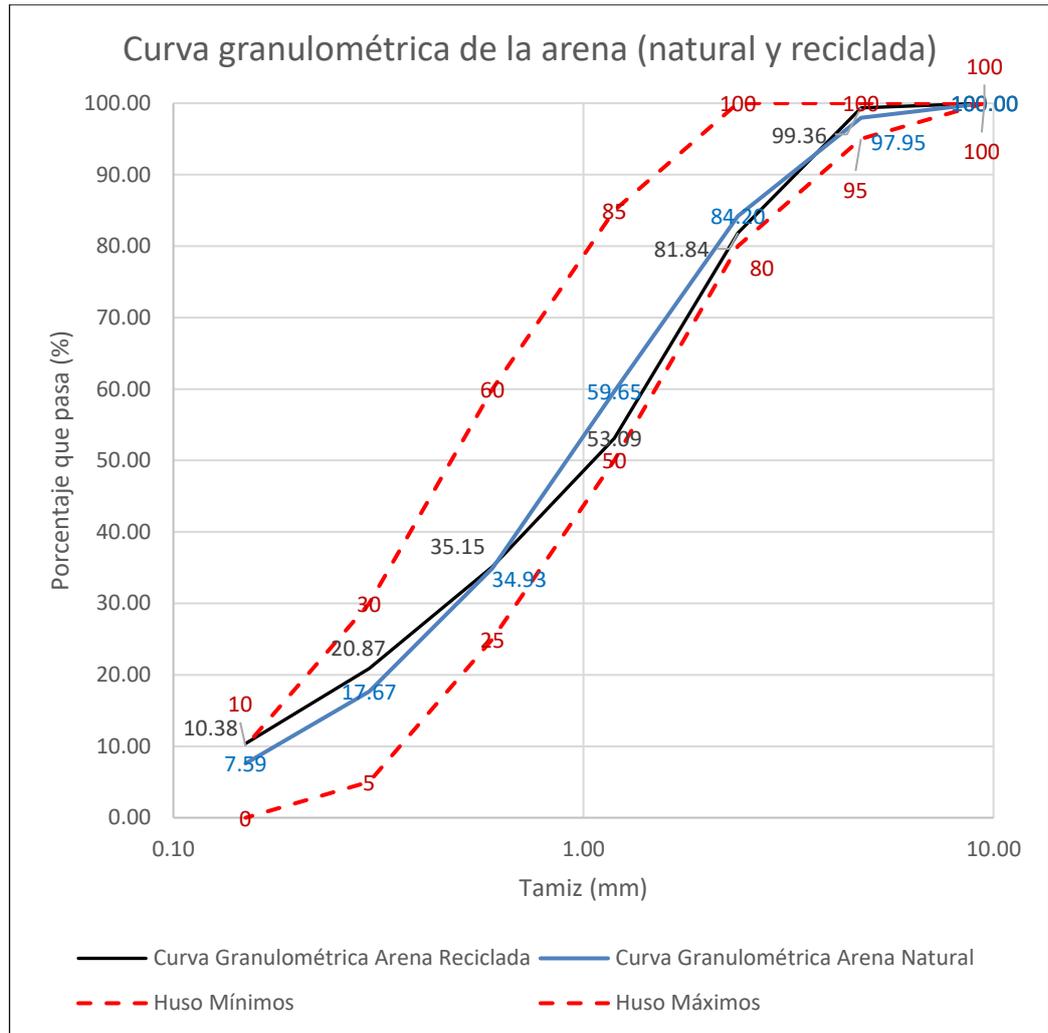


Figura 51 Curva granulométrica de la arena (natural y reciclada).

Fuente: Elaboración propia.

La curva granulométrica de la arena natural estuvo dentro del huso dado por la norma. Mientras que la curva granulométrica de la arena reciclada no estuvo dentro del huso dado por la norma, aunque no cumplió con el huso por una cantidad pequeña, para el tamiz N°100 (0.15 mm) el huso va de 0.00% a 10.00%

y la arena reciclada tuvo como porcentaje retenido a 10.38%; para los demás tamices si cumplió con el huso.

Según NTP 400.010, para ambos tipos de arena (natural y reciclada) el TM y TMN obtenidos fueron de 4.75mm (tamiz N°4) y 2.38mm (tamiz N°8) respectivamente.

Los valores obtenidos del módulo de fineza para la arena reciclada y la arena natural fueron 2.99 y 2.98 respectivamente, lo que indica que la arena reciclada tuvo una mayor cantidad de partículas finas que la arena natural.

- Piedra.

Para la curva granulométrica de la piedra, se escogió como los límites que debía tener a los porcentajes establecidos por el Huso 57. La curva cumplió con estar contenida en la totalidad del huso.

El TM y TMN de la piedra fueron de 25.40mm (1") y 19.05mm (3/4") respectivamente.

Para la piedra no se calculó módulo de fineza.

4.1.2 Peso Específico y Absorción

- Arena (natural y reciclada).

El peso específico de la arena natural fue de 2.71 g/cm³, mientras que para la arena reciclada fue de 2.52 g/cm³. Esto indica que la arena reciclada estuvo compuesta de partículas más livianas (o de menor peso) que la arena natural.

La absorción de la arena natural fue de 2.05%, mientras que para la arena reciclada fue de 7.27%. Esto indica que la absorción de la arena reciclada fue casi 350% del valor para la arena natural.

- Piedra.

El peso específico de la piedra fue de 2.74 g/cm³, un valor mayor que los obtenidos para la arena (natural y reciclada).

La absorción de la piedra fue de 1.58%, un valor menor que los obtenidos para la arena (natural y reciclada).

4.1.3 Peso Unitario

- Arena (natural y reciclada).

El valor del PUS de la arena natural fue de 1705.95 kg/m³ y de la arena reciclada fue de 1404.76 kg/m³. La tendencia de estos valores fue la misma que del peso específico, para la arena reciclada fue menor que para la arena natural.

El valor del PUC de la arena natural fue de 1855.95 kg/m^3 y de la arena reciclada fue de 1473.81 kg/m^3 . La tendencia de estos valores fue la misma que del PUS y del peso específico, para la arena reciclada fue menor que para la arena natural.

- Piedra.

El valor del PUS de la piedra fue de 1379.57 kg/m^3 , menor que los obtenidos para la arena (natural y reciclada).

El valor del PUC de la piedra fue de 1527.96 kg/m^3 , menor que el obtenido para la arena natural y ligeramente mayor que el obtenido para la arena reciclada.

4.1.4 Contenido de Humedad

- Arena (natural y reciclada).

El contenido de humedad de la arena natural fue de 1.93% y de la arena reciclada fue de 7.70%. Lo cual indica que el contenido de humedad de la arena reciclada fue casi 400% el valor de la arena natural.

- Piedra.

El contenido de humedad de la piedra fue de 1.39%, menor que los obtenidos para la arena (natural y reciclada).

4.2 ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS AL AGUA RESIDUAL TRATADA

4.2.1 Cloruros

Norma usada para conocer el límite de cloruros para agua de mezcla: NTP 339.088:2021 "CONCRETO. Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento hidráulico. Especificaciones. 4ª Edición".

El límite químico de la cantidad de cloruros solubles (Cl^-) para el agua de mezcla según la NTP 339.088 fue de 500 mg/l o 500 ppm, mayor que lo obtenido para el agua residual tratada (105.14 mg/l o ppm).

Entonces, analizando la cantidad de cloruros (Cl^-), el agua residual tratada puede ser usada como agua de mezcla.

4.2.2 Sulfatos

Norma usada para conocer el límite de sulfatos para agua de mezcla: NTP 339.088:2021 "CONCRETO. Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento hidráulico. Especificaciones. 4ª Edición".

El límite químico de la cantidad de sulfatos solubles (SO_4^{2-}) para el agua de mezcla según la NTP 339.088 fue de 3000 mg/l o 3000 ppm, mayor que lo obtenido para el agua residual tratada (337.25 mg/l o ppm).

Entonces, analizando la cantidad de sulfatos (SO_4^{2-}), el agua residual tratada puede ser usada como agua de mezcla.

4.2.3 Sólidos Totales Por Masa

Norma usada para conocer el límite de sulfatos para agua de mezcla: NTP 339.088:2021 "CONCRETO. Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento hidráulico. Especificaciones. 4ª Edición".

El límite de la cantidad total de sólidos disueltos (TSD) para el agua de mezcla según la NTP 339.088 fue de 50000 mg/l o 50000 ppm, mayor que lo obtenido para el agua residual tratada (815.00 mg/l o ppm).

Entonces, analizando la cantidad total de sólidos disueltos (TSD), el agua residual tratada puede ser usada como agua de mezcla.

4.2.4 Álcalis

Norma usada para conocer el límite de álcalis para agua de mezcla: NTP 339.088:2021 "CONCRETO. Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento hidráulico. Especificaciones. 4ª Edición".

El límite químico de la cantidad de álcalis (Na_2O y K_2O) para el agua de mezcla según la NTP 339.088 fue de 600 mg/l o 600 ppm, mayor que lo obtenido para el agua residual tratada (157.90 mg/l o ppm).

Entonces, analizando la cantidad de álcalis (Na_2O y K_2O), el agua residual tratada puede ser usada como agua de mezcla.

4.3 ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS AL CONCRETO FRESCO

4.3.1 Asentamiento

El asentamiento sirve para tener una medida de la trabajabilidad de una mezcla. Si el valor de esta propiedad disminuye, indicaría que la mezcla estaría perdiendo trabajabilidad y viceversa.

En la Tabla 48 se muestra los valores promedio de asentamiento obtenidos para las mezclas, también se muestran los porcentajes que representan los valores de asentamiento de las mezclas variante respecto de las mezclas patrón.

Tabla 48

Variación del asentamiento - variante respecto a patrón.

C.M.	Asentamiento (")	Δ Asentamiento (%)
0.50p	3.3	100.00%
0.50v	3.7	112.12%
0.45p	3.3	100.00%
0.45v	3.6	109.09%

Nota 1. En el C.M., el número es el a/c y la letra indica si es patrón (p) o variante (v).

Nota 2. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 52 se muestra la variación de los valores de asentamiento de las mezclas variante respecto de las mezclas patrón de forma gráfica.

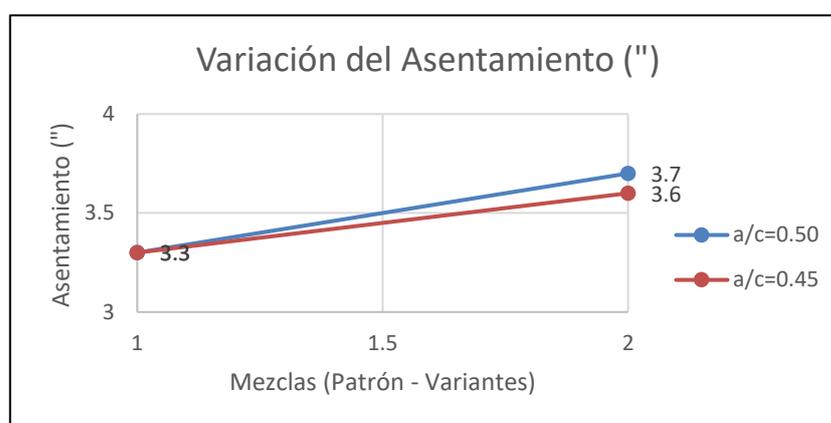


Figura 52 Variación de los valores de asentamiento.

Fuente: Elaboración propia.

Para ambas relaciones a/c se obtuvo que el asentamiento de las mezclas variante fue mayor que la de las mezclas patrón.

En la Figura 53 se muestra la variación porcentual de los valores de asentamiento de las mezclas variante respecto de las mezclas patrón de forma gráfica.

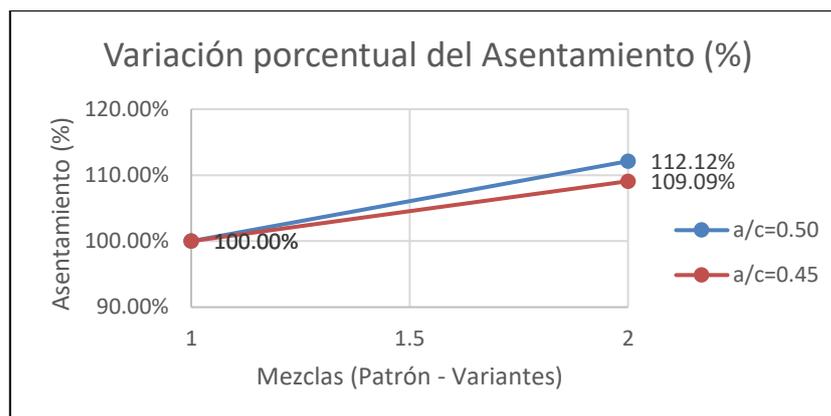


Figura 53 Variación de los valores de asentamiento.

Fuente: Elaboración propia.

Según la Figura, los valores de asentamiento de las mezclas variante aumentaron en 9.09% y 12.12% para las relaciones a/c de 0.45 y 0.50. Por lo tanto, el asentamiento aumentó un 10.61% en promedio.

Al registrarse un aumento del asentamiento se podría deducir que, al reemplazar arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada, la trabajabilidad de la mezcla aumentó.

4.3.2 Peso Unitario

El peso unitario sirve para tener una medida de la densidad de la mezcla. La disminución de su valor indica que la mezcla de concreto es más ligera, lo que podría indicar que hay un mayor contenido de aire o vacíos en la mezcla.

En la Tabla 49 se muestra los valores promedio de peso unitario obtenidos para las mezclas, también se muestran los porcentajes que representan los valores de peso unitario de las mezclas variante respecto de las mezclas patrón.

Tabla 49

Variación del peso unitario - variante respecto a patrón.

C.M.	P.U. (kg/m ³)	ΔP.U. (%)
0.50p	1761.29	100.00%
0.50v	1690.32	95.97%
0.45p	1755.91	100.00%
0.45v	1653.76	94.18%

Nota 1. En el C.M., el número es el a/c y la letra indica si es patrón (p) o variante (v).

Nota 2. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 54 se muestra la variación de los valores de peso unitario de las mezclas variante respecto de las mezclas patrón de forma gráfica.

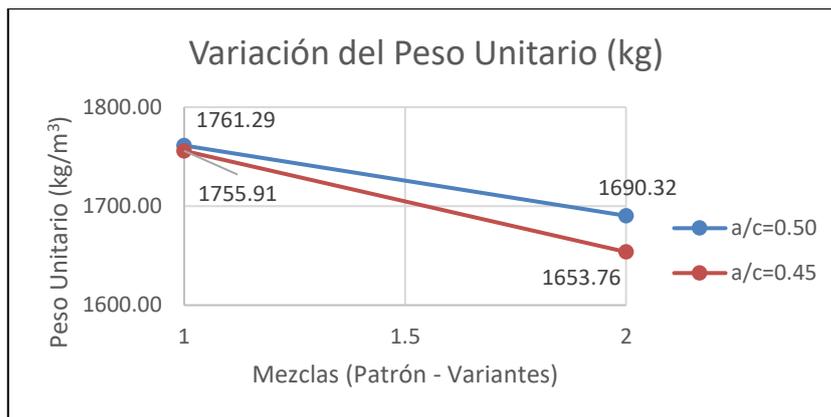


Figura 54 Variación de los valores de peso unitario.

Fuente: Elaboración propia.

Para ambas relaciones a/c se obtuvo que el peso unitario de las mezclas variante fue menor que el de las mezclas patrón.

En la Figura 55 se muestra la variación porcentual de los valores de peso unitario de las mezclas variante respecto de las mezclas patrón de forma gráfica.

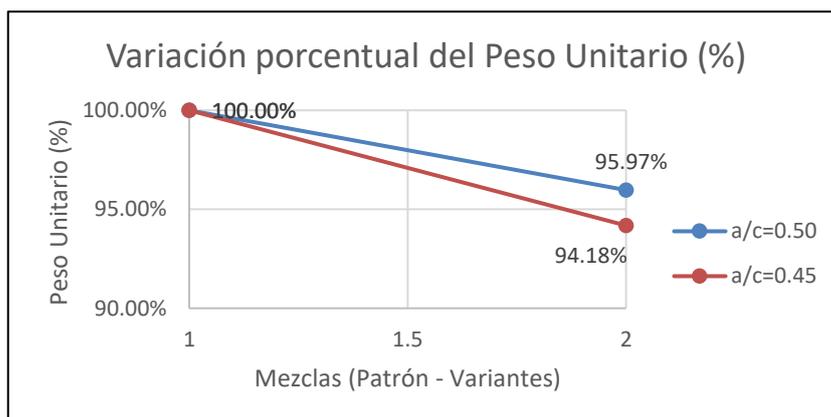


Figura 55 Variación de los valores de peso unitario.

Fuente: Elaboración propia.

Según la Figura, los valores de peso unitario de las mezclas variante disminuyeron en 5.82% y 4.03% para las relaciones a/c de 0.45 y 0.50. Por lo tanto, el peso unitario disminuyó un 4.93% en promedio.

Al registrarse una disminución del peso unitario se podría deducir que, al reemplazar arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada, la cantidad de aire en la mezcla aumentó. Entonces, al tener una mezcla con mayor cantidad de vacíos sería de esperar que las resistencias disminuyan.

4.3.3 Contenido de Aire

Esta propiedad, tal como su nombre indica, sirve para tener una medida del aire atrapado dentro de una mezcla. Si bien un mayor contenido de aire genera una disminución de las resistencias, mejora la durabilidad del concreto frente a ciclos constantes de hielo y deshielo.

En la Tabla 50 se muestra los valores de contenido de aire obtenidos para las mezclas, también se muestran los porcentajes que representan los valores de contenido de aire de las mezclas variante respecto de las mezclas patrón.

Tabla 50

Variación del contenido de aire - variante respecto a patrón.

C.M.	C.A. (%)	Δ C.A. (%)
0.50p	1.45	100.00%
0.50v	2.20	151.72%
0.45p	1.80	100.00%
0.45v	2.50	138.89%

Nota 1. En el C.M., el número es el a/c y la letra indica si es patrón (p) o variante (v).

Nota 2. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 56 se muestra la variación de los valores de contenido de aire de las mezclas variante respecto de las mezclas patrón de forma gráfica.

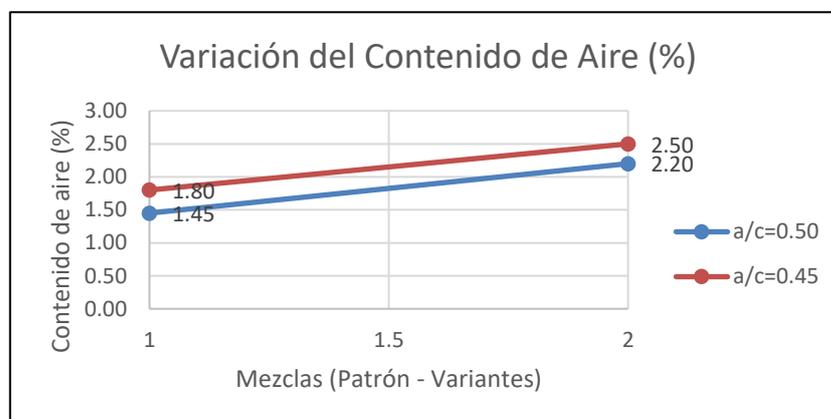


Figura 56 Variación de los valores de contenido de aire.

Fuente: Elaboración propia.

Para ambas relaciones a/c se obtuvo que el contenido de aire de las mezclas variante fue mayor que el de las mezclas patrón.

En la Figura 57 se muestra la variación porcentual de los valores de contenido de aire de las mezclas variante respecto de las mezclas patrón de forma gráfica.

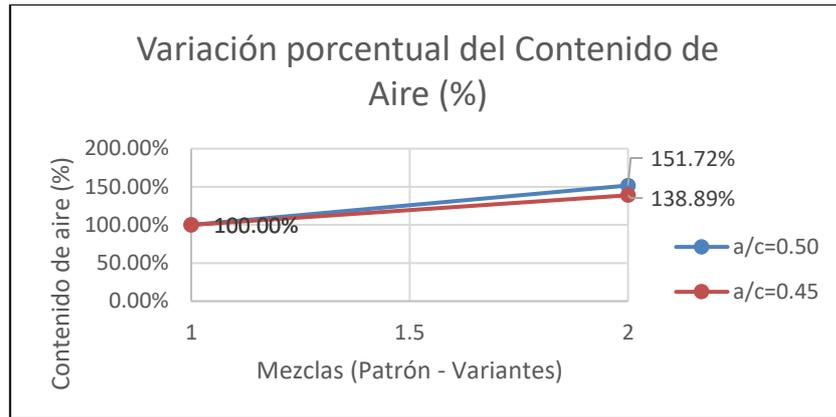


Figura 57 Variación de los valores de contenido de aire.

Fuente: Elaboración propia.

Según la Figura, los valores de contenido de aire de las mezclas variante aumentaron en 38.89% y 51.72% para las relaciones a/c de 0.45 y 0.50. Por lo tanto, el contenido de aire disminuyó un 45.31% en promedio.

Al registrarse un aumento del contenido de aire se podría deducir que, al reemplazar arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada, la resistencia del concreto disminuirá; sin embargo, su durabilidad frente a ciclos de hielo y deshielo aumentará.

4.3.4 Tiempo de Fraguado

Un aumento de esta propiedad indicaría que la mezcla fragua más rápido; es decir, la mezcla gana resistencia con mayor rapidez.

La Figura 58 muestra en un diagrama el tiempo de fraguado de las mezclas (patrón y variante) con a/c de 0.45.

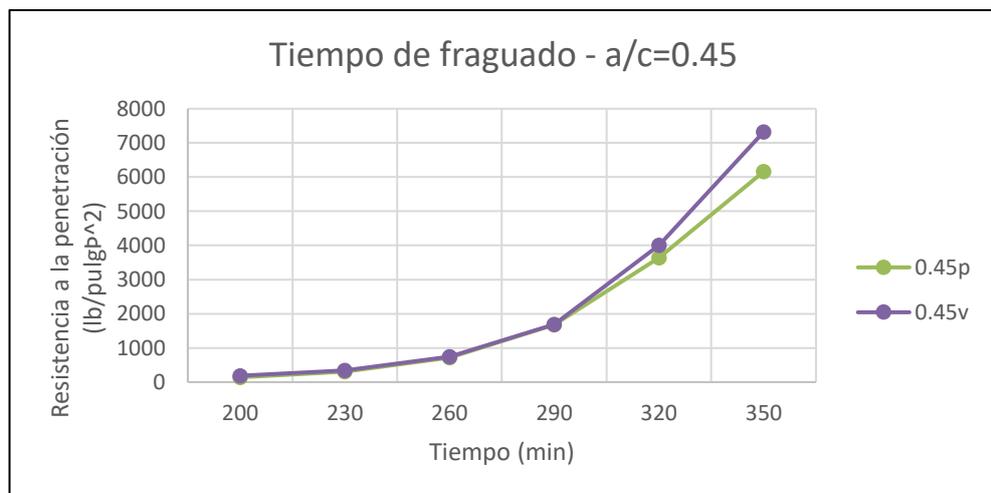


Figura 58 Tiempo de fraguado de mezclas con a/c de 0.45.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 59 muestra en un diagrama el tiempo de fraguado de las mezclas (patrón y variante) con a/c de 0.50.

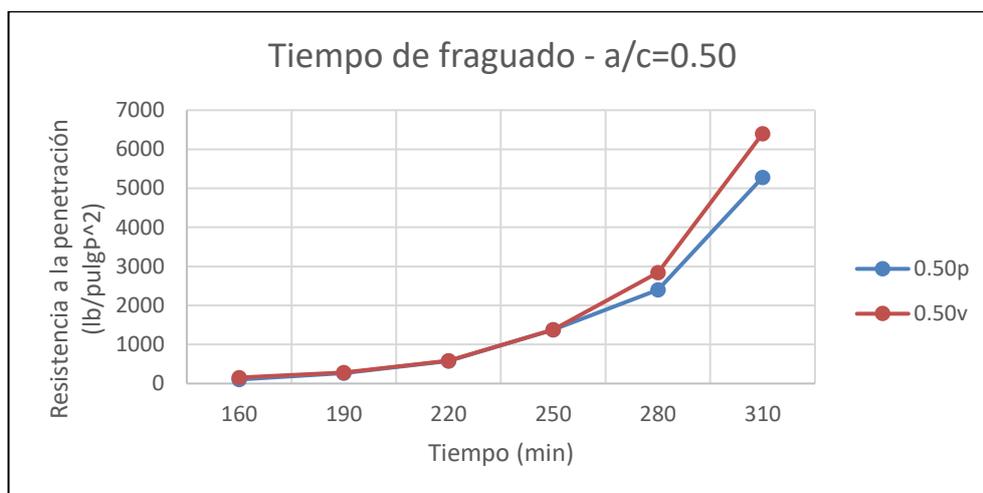


Figura 59 Tiempo de fraguado de mezclas con a/c de 0.50.

Fuente: Elaboración propia.

Según las dos figuras anteriores, se puede ver que las curvas del tiempo de fraguado de las mezclas variante están a la izquierda de las curvas de las mezclas patrón. Por lo tanto, el tiempo de fraguado de las mezclas variante disminuye respecto al tiempo de fraguado de las mezclas patrón.

En la Tabla 51 se muestran los valores de tiempo de fraguado obtenidos para las mezclas, también se muestran los porcentajes que representan los valores de tiempo de fraguado de las mezclas variante respecto de las mezclas patrón.

Tabla 51

Variación del tiempo de fraguado - variante respecto a patrón.

C.M.	T.F. inicial (min)	Δ T.F. inicial (%)	T.F. final (min)	Δ T.F. final (%)
0.45p	247	100.00%	328	100.00%
0.45v	235	95.14%	318	96.95%
0.50p	217	100.00%	297	100.00%
0.50v	209	96.31%	292	98.32%

Nota 1. En el C.M., el número es el a/c y la letra indica si es patrón (p) o variante (v).

Nota 2. Fuente: Elaboración propia.

Los valores presentados en la tabla anterior indican que los tiempos de fraguado de las mezclas variante fueron menores que los de las mezclas patrón. El tiempo de fraguado inicial disminuyó un 4.27% en promedio, mientras que el tiempo de fraguado final disminuyó un 2.37% en promedio.

Si se comparan los valores de tiempos de fraguado en minutos, se obtuvo que los tiempos de fraguado inicial y final disminuyeron 10 minutos y 7.5 minutos respectivamente en promedio.

Al registrarse una disminución del tiempo de fraguado se podría deducir que, al reemplazar arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada, la mezcla gana resistencia más rápido. Cabe mencionar que esto no quiere decir que la resistencia de la mezcla variante aumente, solo que alcanzará su resistencia final en un menor tiempo.

4.3.5 Exudación

Esta propiedad sirve para medir la cantidad de agua que asciende hacia la superficie de la mezcla tras la sedimentación de los sólidos. Un aumento de la exudación es perjudicial porque en el lugar donde el concreto exuda, se incrementa la cantidad de agua y el a/c de la mezcla, reduciendo su resistencia.

En la Tabla 52 se muestran los valores de exudación obtenidos para las mezclas, también se muestran los porcentajes que representan los valores de exudación de las mezclas variante respecto de las mezclas patrón.

Tabla 52

Variación de la exudación - variante respecto a patrón.

C.M.	Exudación (%)	Δ Exudación (%)
0.45p	0.66	100.00%
0.45v	0.43	65.15%
0.50p	0.34	100.00%
0.50v	0.45	132.35%

Nota 1. En el C.M., el número es el a/c y la letra indica si es patrón (p) o variante (v).

Nota 2. Fuente: Elaboración propia.

Para la exudación de las mezclas de a/c de 0.45, la exudación de la mezcla variante fue menor que la de la mezcla patrón; mientras que para las mezclas de 0.50 se obtuvo que la exudación de la mezcla patrón fue menor que la de la mezcla variante. Por lo tanto, con las pruebas realizadas no se encontró un patrón definido.

En la Figura 60 se muestra la variación de los valores de exudación de las mezclas variante respecto de las mezclas patrón de forma gráfica.

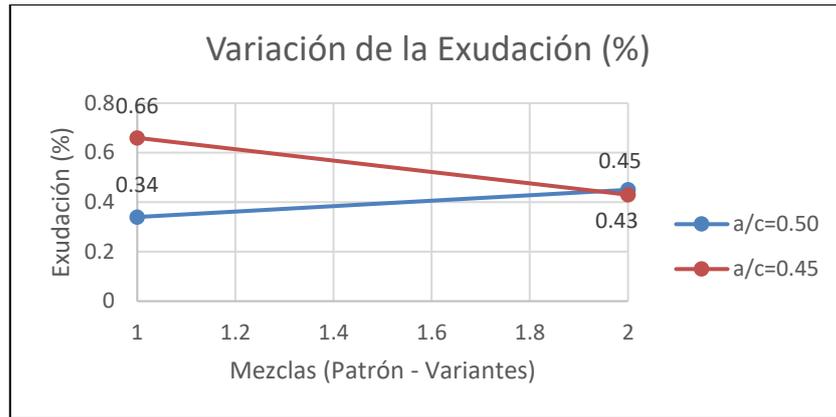


Figura 60 Variación de los valores de exudación.

Fuente: Elaboración propia.

No se encontró una tendencia clara para los valores de la exudación de mezclas de a/c de 0.45 y 0.50.

En la Figura 61 se muestra la variación porcentual de los valores de contenido de aire de las mezclas variante respecto de las mezclas patrón de forma gráfica.

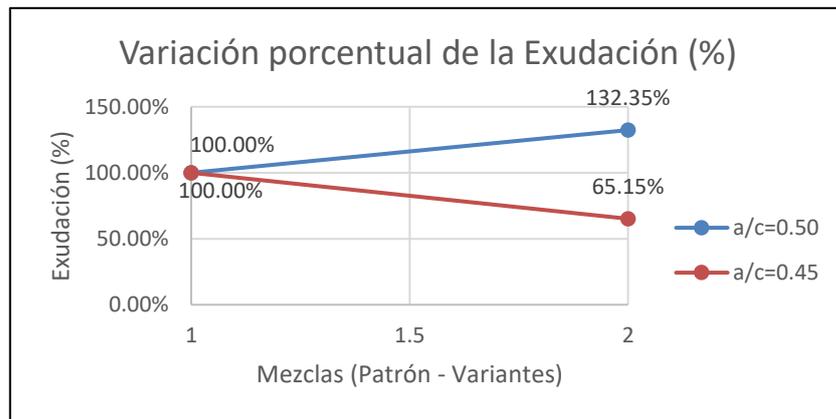


Figura 61 Variación de los valores de exudación.

Fuente: Elaboración propia.

Para la mezcla de a/c de 0.45, la exudación de la mezcla variante disminuyó en 34.85% respecto a la mezcla patrón. Mientras que para la mezcla de a/c de 0.50, la exudación de la mezcla variante aumentó en 32.35% respecto a la mezcla patrón.

No se pudo determinar si, al reemplazar arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada, la exudación tiende a disminuir o aumentar. Sin embargo, los valores de exudación de todas las mezclas estuvieron en un rango que indica que la exudación fue casi nula (no llegó ni a 0.7%).

4.4 ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS AL CONCRETO ENDURECIDO

4.4.1 Resistencia a Compresión

Esta propiedad del concreto endurecido indica cuánta carga, aplicada axialmente, puede soportar el concreto por unidad de área.

Al reemplazar arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada, se obtuvo una disminución del peso unitario y un aumento del contenido de aire. Ambos resultados pueden generar la pérdida de las resistencias, por lo que era de esperarse una disminución de la resistencia a compresión.

- **Resistencia a compresión a 7 días**

En la Figura 62 se muestra los valores promedio de resistencia a compresión a 7 días obtenidos para el patrón y la variante de la mezcla con a/c de 0.45.

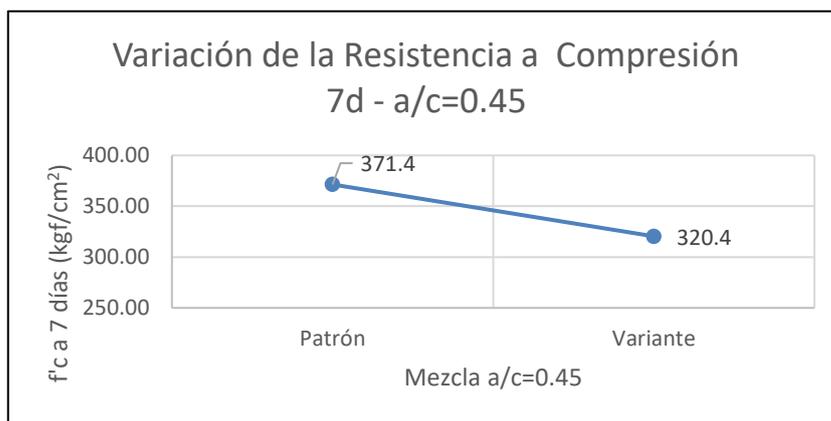


Figura 62 Variación de resistencia a compresión 7 días – a/c=0.45.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 53 se muestran los valores promedio de resistencia a compresión a 7 días de las mezclas con a/c de 0.45, también se muestra el porcentaje que representa la resistencia de la mezcla variante respecto de la mezcla patrón.

Tabla 53

Variación de la resistencia a compresión 7 días – a/c=0.45.

a/c=0.45	f'c promedio (kgf/cm²)	$\Delta f'c$ (%)
Patrón	371.4	100.00%
Variante	320.4	86.27%

Nota. Fuente: Elaboración propia.

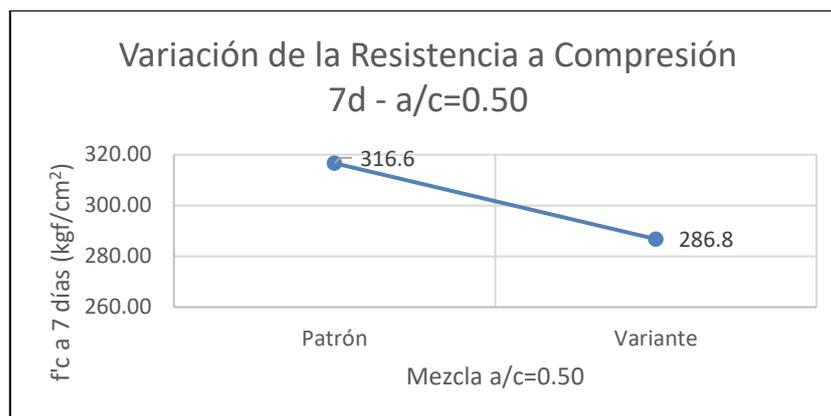


Figura 63 Variación de resistencia a compresión 7 días – a/c=0.50.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 63 se muestra los valores promedio de resistencia a compresión a 7 días obtenidos para el patrón y la variante de la mezcla con a/c de 0.50.

En la Tabla 54 se muestran los valores promedio de resistencia a compresión a 7 días de las mezclas con a/c de 0.50, también se muestra el porcentaje que representa la resistencia de la mezcla variante respecto de la mezcla patrón.

Tabla 54

Variación de la resistencia a compresión 7 días – a/c=0.50.

a/c=0.50	f'c promedio (kgf/cm²)	$\Delta f'c$ (%)
Patrón	316.6	100.00%
Variante	286.8	90.57%

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Entonces, el reemplazo de arena natural por arena reciclada y agua potable por agua residual tratada hizo que la resistencia a compresión a 7 días de las mezclas con a/c de 0.45 y 0.50 disminuyeran un 13.73% y 9.43%.

▪ **Resistencia a compresión a 28 días**

En la Figura 64 se muestra los valores promedio de resistencia a compresión a 28 días obtenidos para el patrón y la variante de la mezcla con a/c de 0.45.

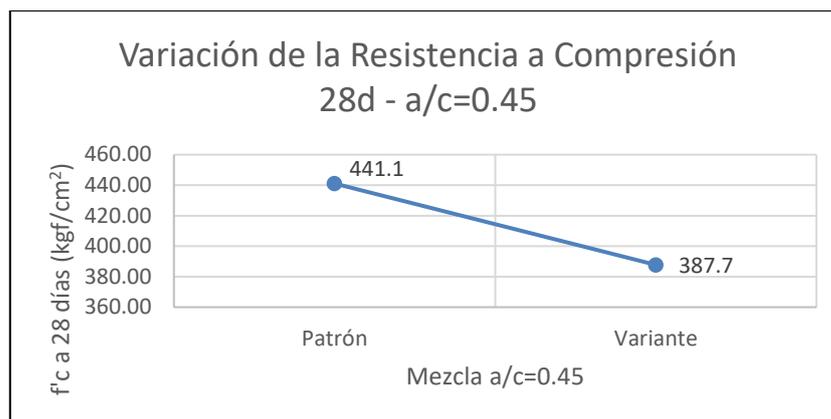


Figura 64 Variación de resistencia a compresión 28 días – a/c=0.45.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 55 se muestran los valores promedio de resistencia a compresión a 28 días de las mezclas con a/c de 0.45, también se muestra el porcentaje que representa la resistencia de la mezcla variante respecto de la mezcla patrón.

Tabla 55

Variación de la resistencia a compresión 7 días – a/c=0.45.

a/c=0.45	f'c promedio (kgf/cm²)	Δf'c (%)
Patrón	441.1	100.00%
Variante	387.8	87.91%

Nota. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 65 se muestra los valores promedio de resistencia a compresión a 28 días obtenidos para el patrón y la variante de la mezcla con a/c de 0.50.

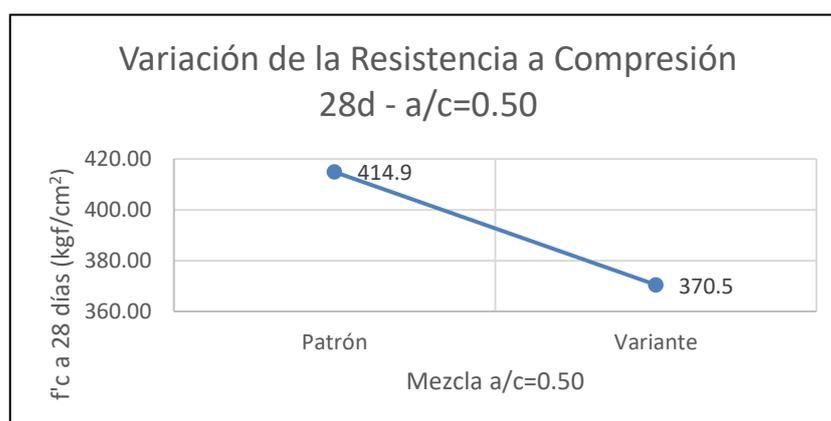


Figura 65 Variación de resistencia a compresión 28 días – a/c=0.50.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 56 se muestran los valores promedio de resistencia a compresión a 28 días de las mezclas con a/c de 0.50, también se muestra el porcentaje que representa la resistencia de la mezcla variante respecto de la mezcla patrón.

Tabla 56

Variación de la resistencia a compresión 28 días – a/c=0.50.

a/c=0.50	f'c promedio (kgf/cm ²)	Δf'c (%)
Patrón	414.9	100.00%
Variante	370.5	89.30%

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Entonces, el reemplazo de arena natural por arena reciclada y agua potable por agua residual tratada hizo que la resistencia a compresión a 28 días de las mezclas con a/c de 0.45 y 0.50 disminuyeran un 12.09% y 10.70%.

▪ **Resistencia a compresión por edades**

En la Figura 66 se muestra los valores promedio de resistencias a compresión a edades de 7 y 28 días obtenidos para el patrón y la variante de la mezcla con a/c de 0.45.

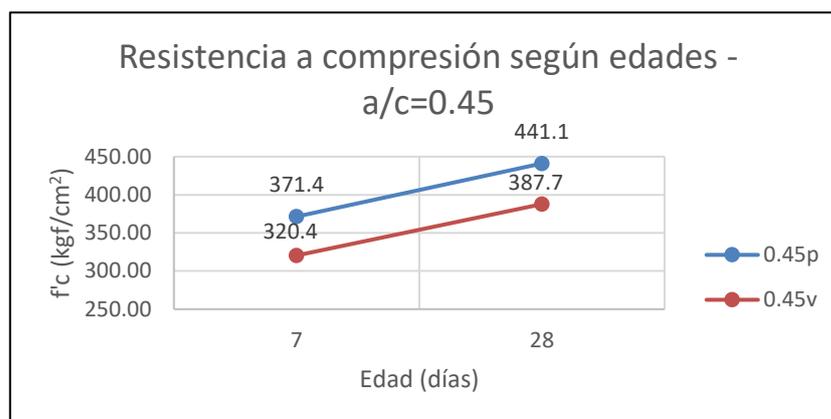


Figura 66 Variación de resistencia a compresión según edades – a/c=0.45.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 57 se muestra los valores promedio de resistencias a compresión a edades de 7 y 28 días de las mezclas con a/c de 0.45, también se muestran los porcentajes que representan las resistencias a 7 días respecto de las de 28 días.

Tabla 57

Variación de la resistencia a compresión según edades – a/c=0.45.

Mezcla:		0.45p		0.45v	
a/c	Edad (días)	f'c (kgf/cm ²)	f'c (%)	f'c (kgf/cm ²)	f'c (%)
	7	371.4	100.00%	320.4	86.27%
	28	441.1	100.00%	387.7	87.89%

0.45	7	371.4	84.21%	320.4	82.64%
	28	441.1	100.00%	387.8	100.00%

Nota 1. En el C.M., el número es el a/c y la letra indica si es patrón (p) o variante (v).

Nota 2. Fuente: Elaboración propia.

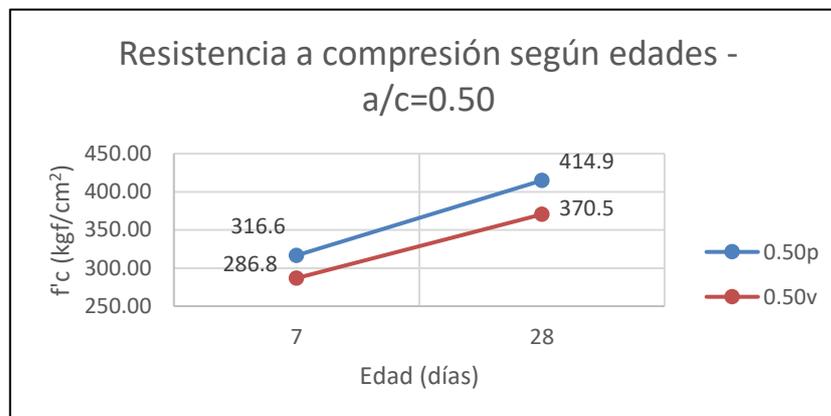


Figura 67 Variación de resistencia a compresión según edades – a/c=0.50.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 67 se muestra los valores promedio de resistencias a compresión a edades de 7 y 28 días obtenidos para el patrón y la variante de la mezcla con a/c de 0.50.

En la Tabla 58 se muestra los valores promedio de resistencias a compresión a edades de 7 y 28 días de las mezclas con a/c de 0.50, también se muestran los porcentajes que representan las resistencias a 7 días respecto de las de 28 días.

Tabla 58

Variación de la resistencia a compresión según edades – a/c=0.50.

Mezcla:		0.50p		0.50v	
a/c	Edad (días)	f'c (kgf/cm²)	f'c (%)	f'c (kgf/cm²)	f'c (%)
0.50	7	316.6	76.32%	286.8	77.41%
	28	414.9	100.00%	370.5	100.00%

Nota 1. En el C.M., el número es el a/c y la letra indica si es patrón (p) o variante (v).

Nota 2. Fuente: Elaboración propia.

Si bien los resultados de tiempo de fraguado indicaron que, tras el reemplazo arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada, la rapidez con la que el concreto gana resistencia aumentó. Con los valores obtenidos de las resistencias según edades, se puede deducir que, la rapidez con la que el concreto ganó resistencia no tuvo una variación significativa.

4.4.2 Resistencia a Tracción

Esta propiedad del concreto endurecido nos indica cuánta carga, aplicada diametralmente a lo largo de la longitud de las probetas, razón por la que también se le denomina compresión diametral, puede soportar el concreto por unidad de área.

Si bien, tras la disminución del peso unitario y el aumento del contenido de aire, se esperaba una disminución de la resistencia a tracción, se obtuvo lo contrario.

- **Resistencia a tracción a 7 días**

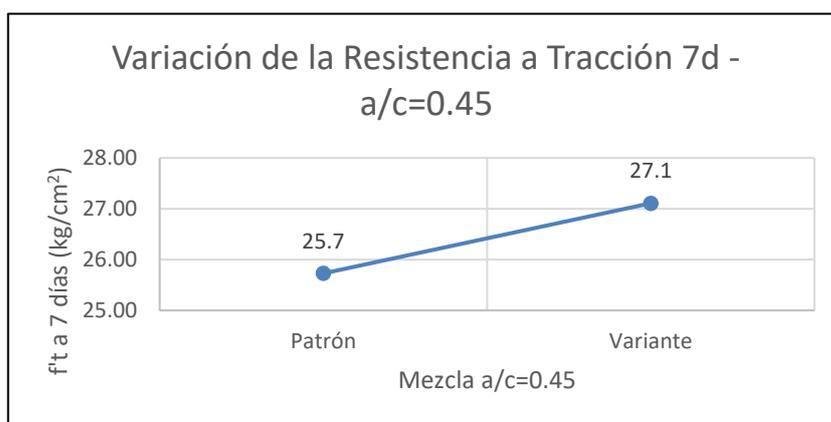


Figura 68 Variación de resistencia a tracción 7 días – a/c=0.45.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 68 se muestra los valores promedio de resistencia a tracción a 7 días obtenidos para el patrón y la variante de la mezcla con a/c de 0.45.

Tabla 59

Variación de la resistencia a tracción 7 días – a/c=0.45.

a/c=0.45	f't promedio (kgf/cm ²)	Δf't (%)
Patrón	25.7	100.00%
Variante	27.1	105.36%

Nota. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 59 se muestra los valores promedio de resistencia a tracción a 7 días de las mezclas con a/c de 0.45, también se muestra el porcentaje que representa la resistencia de la mezcla variante respecto de la mezcla patrón.

En la Figura 69 se muestra los valores promedio de resistencia a tracción a 7 días obtenidos para el patrón y la variante de la mezcla con a/c de 0.50.

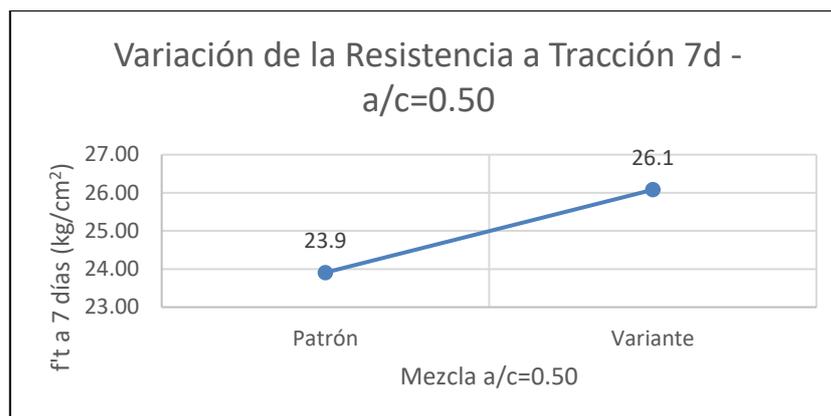


Figura 69 Variación de resistencia a tracción 7 días – a/c=0.50.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 60 se muestra los valores promedio de resistencia a tracción a 7 días de las mezclas con a/c de 0.50, también se muestra el porcentaje que representa la resistencia de la mezcla variante respecto de la mezcla patrón.

Tabla 60

Variación de la resistencia a tracción 7 días – a/c=0.50.

a/c=0.50	f't promedio (kgf/cm ²)	Δf't (%)
Patrón	23.9	100.00%
Variante	26.1	109.08%

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Entonces, el reemplazo de arena natural por arena reciclada y agua potable por agua residual tratada hizo que la resistencia a tracción a 7 días de las mezclas con a/c de 0.45 y 0.50 aumentaran un 5.36% y 9.08%.

Si bien las resistencias a tracción a 7 días aumentaron, este aumento no fue significativo porque no llegó ni al 10%.

▪ **Resistencia a tracción a 28 días**

En la Figura 70, se muestra los valores promedio de resistencia a tracción a 28 días obtenidos para el patrón y la variante de la mezcla con a/c de 0.45.

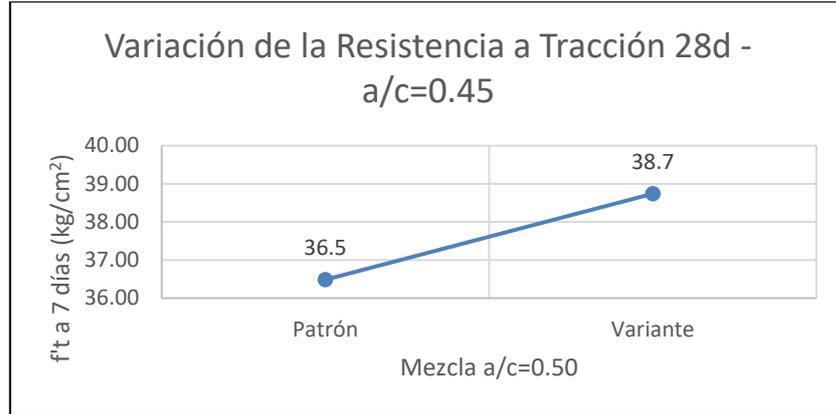


Figura 70 Variación de resistencia a tracción 28 días – a/c=0.45.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 61 se muestra los valores promedio de resistencia a tracción a 28 días de las mezclas con a/c de 0.45, también se muestra el porcentaje que representa la resistencia de la mezcla variante respecto de la mezcla patrón.

Tabla 61

Variación de la resistencia a tracción 28 días – a/c=0.45.

a/c=0.45	f't promedio (kgf/cm ²)	Δf't (%)
Patrón	36.5	100.00%
Variante	38.7	106.18%

Nota. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 71 se muestra los valores promedio de resistencia a tracción a 28 días obtenidos para el patrón y la variante de la mezcla con a/c de 0.50.

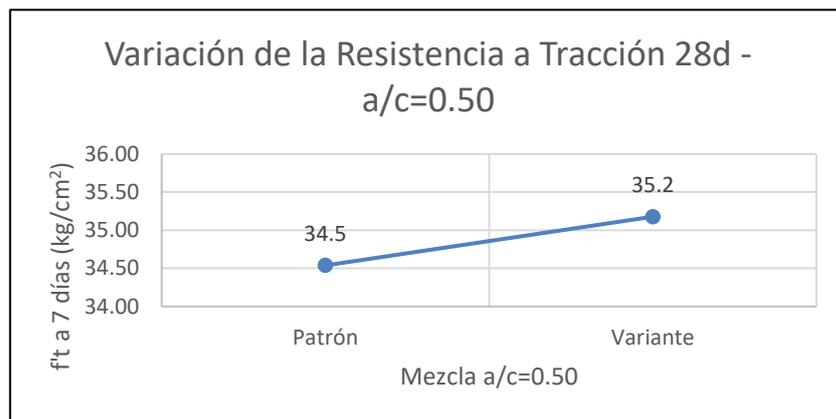


Figura 71 Variación de resistencia a tracción 28 días – a/c=0.50.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 62 se muestra los valores promedio de resistencia a tracción a 28 días de las mezclas con a/c de 0.50, también se muestra el porcentaje que representa la resistencia de la mezcla variante respecto de la mezcla patrón.

Tabla 62

Variación de la resistencia a tracción 28 días – a/c=0.50.

a/c=0.50	f't promedio (kgf/cm ²)	Δf't (%)
Patrón	34.5	100.00%
Variante	35.2	101.85%

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Entonces, el reemplazo de arena natural por arena reciclada y agua potable por agua residual tratada hizo que la resistencia a tracción a 28 días de las mezclas con a/c de 0.45 y 0.50 aumentaran un 6.18% y 1.85%.

Si bien las resistencias a tracción a 28 días aumentaron, este aumento no fue significativo porque no llegó ni al 7%.

▪ **Resistencia a tracción por edades**

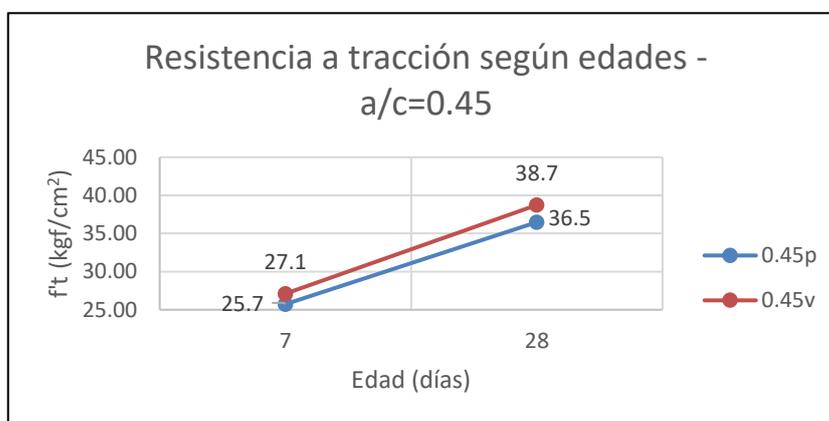


Figura 72 Variación de resistencia a tracción según edades – a/c=0.45.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 72 se muestra los valores promedio de resistencias a tracción a edades de 7 y 28 días obtenidos para el patrón y la variante de la mezcla con a/c de 0.45.

En la Tabla 63 se muestra los valores promedio de resistencias a tracción a edades de 7 y 28 días de las mezclas con a/c de 0.45, también se muestran los porcentajes que representan las resistencias a 7 días respecto de las de 28 días.

Tabla 63

Variación de la resistencia a tracción según edades – a/c=0.45.

Mezcla:		0.45p			
a/c	Edad (días)	f't (kgf/cm ²)	f't (%)	f't (kgf/cm ²)	f't (%)
0.45	7	25.7	70.52%	27.1	69.97%
	28	36.5	100.00%	38.7	100.00%

Nota 1. En el C.M., el número es el a/c y la letra indica si es patrón (p) o variante (v).

Nota 2. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 73 se muestra los valores promedio de resistencias a tracción a edades de 7 y 28 días obtenidos para el patrón y la variante de la mezcla con a/c de 0.50.

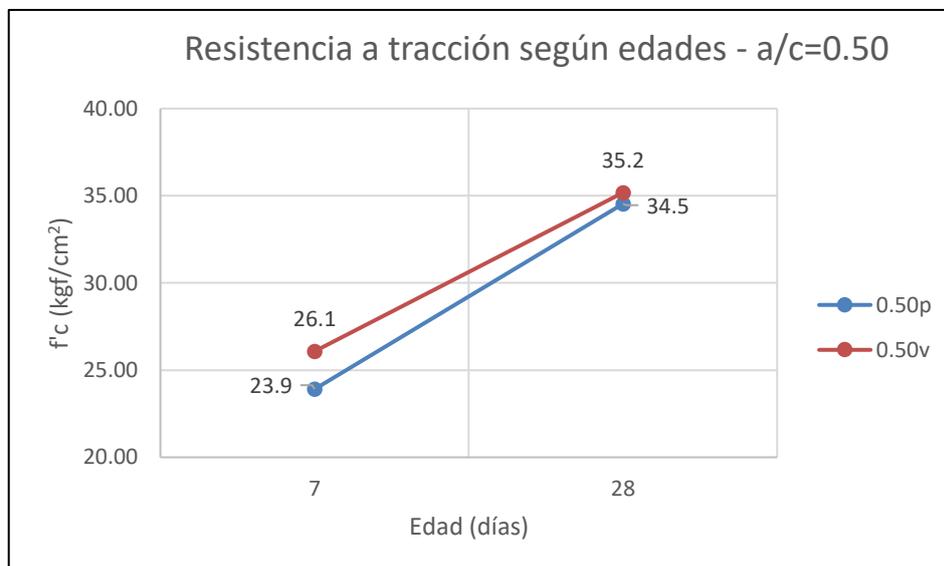


Figura 73 Variación de resistencia a tracción según edades – a/c=0.50.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 64 se muestra los valores promedio de resistencias a tracción a edades de 7 y 28 días de las mezclas con a/c de 0.50, también se muestran los porcentajes que representan las resistencias a 7 días respecto de las de 28 días.

Tabla 64

Variación de la resistencia a tracción según edades – a/c=0.50.

Mezcla:		0.50p			
a/c	Edad (días)	f't (kgf/cm²)	f't (%)	f't (kgf/cm²)	f't (%)
0.50	7	23.9	69.22%	26.1	74.14%
	28	34.5	100.00%	35.2	100.00%

Nota 1. En el C.M., el número es el a/c y la letra indica si es patrón (p) o variante (v).

Nota 2. Fuente: Elaboración propia.

Con los valores obtenidos de las resistencias según edades, se puede deducir que, la rapidez con la que el concreto ganó resistencia no tuvo una variación significativa.

CONCLUSIONES

La tesis analizó si las características del agua residual tratada cumplían los requisitos para que sea usada como agua de mezcla para concreto. También analizó como variaban las propiedades del concreto al reemplazar arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada.

Cabe recordar que las mezclas patrón estuvieron conformadas (aparte del cemento) por arena natural, piedra y agua potable. Mientras que las mezclas variantes estuvieron conformadas por arena reciclada (reemplazo total de arena natural), piedra y agua residual tratada (reemplazo total de agua potable). Además, las relaciones a/c usadas en las mezclas de concreto fueron 0.45 y 0.50. Finalizado el estudio se puede indicar que se cumplieron los objetivos previstos, demostrándose las hipótesis planteadas como se indica a continuación.

Se demostraron las hipótesis:

- Tras los ensayos realizados en laboratorio, se obtuvo que el agua residual tratada cumplió con los límites establecidos en la NTP 214.023:2016, que trata sobre la cantidad de cloruros, sulfatos, sólidos totales por masa y álcalis en agua para mezcla de concreto.
- Tras los ensayos realizados al concreto fresco, se obtuvo que las propiedades físicas del concreto variaron. Los resultados de estas variaciones se presentan en las conclusiones.
- Tras los ensayos realizados al concreto, se obtuvo que las propiedades mecánicas del concreto variaron. Los resultados de estas variaciones se presentan en las conclusiones.

CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL TRATADA:

Los resultados obtenidos mostraron que es posible usar el agua residual tratada como agua de mezcla para concreto.

- La cantidad de cloruros fue de 105.14 mg/l, cumplió con el límite según la NTP 214.023:2016 (500 mg/l).
- La cantidad de sulfatos fue de 337.25 mg/l, cumplió con el límite según la NTP 214.023:2016 (3000 mg/l).
- La cantidad de sólidos totales por masa fue de 815.00 mg/l, cumplió con el límite según la NTP 214.023:2016 (50000 mg/l).

- La cantidad de álcalis fue de 157.90 mg/l, cumplió con el límite según la NTP 214.023:2016 (600 mg/l).

PROPIEDADES FÍSICAS DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO:

Los resultados obtenidos tras los reemplazos de arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada indicaron que la trabajabilidad del concreto aumentó, además de que se obtuvo un concreto más ligero, resultado que concuerda con un mayor contenido de aire en la mezcla de concreto.

- El asentamiento aumentó en 9.09% y 12.12% respecto a las mezclas patrón, para a/c de 0.45 y 0.50.
- El peso unitario disminuyó en 5.82% y 4.03% respecto a las mezclas patrón, para a/c de 0.45 y 0.50.
- El contenido de aire aumentó en 38.89% y 51.72% respecto a las mezclas patrón, para a/c de 0.45 y 0.50.
- El tiempo de fraguado fue menor respecto al de las mezclas patrón. Los tiempos de fraguado inicial y final de las mezclas variantes disminuyeron en 4.27% y 2.37% respecto a las mezclas patrón.
- La exudación disminuyó en 34.85% para a/c de 0.45 y aumentó en 32.35% para a/c de 0.50. Para esta propiedad no se encontró una tendencia definida.

PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO:

Los resultados obtenidos tras los reemplazos de arena natural y agua potable por arena reciclada y agua residual tratada indicaron que la resistencia a compresión disminuyó hasta en 13.73%, mientras que la resistencia a tracción aumentó hasta en 9.08%.

- Las resistencias a compresión a 7 días disminuyeron en 13.73% y 9.43% para a/c de 0.45 y 0.50.
- Las resistencias a compresión a 28 días disminuyeron en 12.09% y 10.70% para a/c de 0.45 y 0.50.
- Las resistencias a tracción a 7 días aumentaron en 5.36% y 9.08% para a/c de 0.45 y 0.50.
- Las resistencias a tracción a 28 días aumentaron en 6.18% y 1.85% para a/c de 0.45 y 0.50.

GENERALES:

De forma general, los resultados obtenidos de los ensayos realizados en la tesis fueron los siguientes.

- El asentamiento y el contenido de aire aumentaron en promedio un 10.61% y 45.31% respecto de las mezclas patrón.
- El peso unitario y los tiempos de fraguado disminuyeron en promedio un 4.93% y 7.36% respecto de las mezclas patrón.
- La exudación no tuvo una tendencia definida comparando valores entre mezclas variantes y mezclas patrón de las mezclas de a/c de 0.45 y 0.50.
- La resistencia a compresión a 7 días disminuyó un 11.58% respecto de las mezclas patrón.
- La resistencia a compresión a 28 días disminuyó un 11.40% respecto de las mezclas patrón.
- La resistencia a tracción a 7 días disminuyó un 6.71% respecto de las mezclas patrón.
- La resistencia a tracción a 28 días disminuyó un 3.82% respecto de las mezclas patrón.
- Las características analizadas del agua residual tratada (contenido de cloruros, sulfatos, sólidos totales por masa y álcalis) cumplieron la normativa nacional.

RECOMENDACIONES

A continuación, se brinda unas recomendaciones respecto al tema tratado. Estas podrán ser de utilidad para investigadores que vayan a usar materiales reciclados (sea agua residual tratada o agregados reciclados) en mezclas de concreto.

- Se recomienda continuar con los estudios del uso de materiales reciclados en las mezclas de concreto puesto que, si se llegara a masificar el reuso de materiales que conforman al concreto, se podría reducir el impacto negativo que causa la industria de la construcción en la explotación de los recursos naturales usados como materia prima.
- Se recomienda realizar investigaciones que estudien las propiedades de durabilidad de concretos que usen agregados reciclados y aguas residuales tratadas. Puesto que es importante conocer como es el desempeño del concreto frente a procesos propios del medio ambiente (como congelamiento, ataques químicos, entre otros).
- Se recomienda realizar investigaciones donde todos los componentes del concreto (aparte del cemento) sean reciclados; es decir, concretos donde se usen agregados reciclados, agua reciclada y ciertos aditivos que se pueden obtener de reciclaje, como las fibras de polipropileno.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2021). *Agua y Población*.
<https://www.ana.gob.pe/portal/gestion-del-conocimiento-girh/agua-y-poblacion>
- Bardales, E. y Jara, J. (2021). *Efecto en las propiedades físicas y mecánicas del concreto f'c 175 kg/cm² y f'c 210 kg/cm² elaborado con aguas residuales tratadas, Chimbote - 2021* [Tesis de grado para optar por el Título de Ingeniero Civil]. Repositorio Digital Institucional de la Universidad César Vallejo
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/100292>
- Burgos, A., Guzmán, Á. y Torres, N. (2017). *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquía (Revista EIA): Desempeño mecánico y durable de concretos que incorporan agregado reciclado fino comercial*, 16, 32, 167-179.
<https://doi.org/10.24050/reia.v16i32.1210>
- Calderón, A., y Burbano, M. (2016). Efectos en la resistencia del hormigón simple elaborados con agua residual tratada proveniente de la PTAR Cañaveralejo. *Ingeniería y Región*, 16(2), 35-48.
<https://doi.org/10.25054/22161325.1297>
- Catanzaro, G. y Zapana, O. (2019). *Diseño y evaluación de concreto estructural de f'c 280 kg/cm² elaborado con aguas residuales domésticas tratadas mediante procesos biológicos como alternativa al uso de agua potable en Lima Metropolitana* [Tesis para optar por el Título Profesional de Ingeniero Civil]. Repositorio Académico de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas
<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/626354>
- CSI (Consejo Mundial Empresarial Para El Desarrollo Sostenible. Iniciativa Para La Sostenibilidad Del Cemento). (2009). *Reciclando Concreto*.
http://ficem.org/publicaciones-CSI/DOCUMENTO-CSI-RECICLAJE-DEL-CONCRETO/RECICLAJE-D-CONCRETO_1.pdf
- Diario El Ágora. (9 de febrero de 2021). *Crecen hasta el 50% las aguas residuales en el mundo*. <https://www.elagoradiario.com/agua/crecen-50-aguas-residuales-tratadas/>
- Eguchi, K., Teranishi, K., Nakagome, A., Kishimoto, H., Shinozaki, K. y Narikawa, M. (2007). Application of recycled coarse aggregate by

- mixture to concrete construction. *Construction and Building Materials*, 21, 1542-1551.
- Gallardo, E. (2017). *Metodología de la Investigación* (1ª ed.). Universidad Continental. <http://repositorio.continental.edu.pe/>
- GCCA (Asociación Global de Cemento y Concreto). (s.f.). *Consumo y Producción Responsables*. <https://gccassociation.org/sustainability-innovation/the-un-sustainable-development-goals/sdg-12-responsible-consumption-and-production/>
- INDECOPI. (2021). *AGREGADOS. Agregados para concreto. Especificaciones*. 5ª Edición, NTP 400.037.
- INDECOPI. (2021). *AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino y grueso. Método de ensayo*. 4ª Edición (NTP 400.012).
- INDECOPI. (2020). *AGREGADOS. Densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado grueso. Método de ensayo*. 4ª Edición (NTP 400.021).
- INDECOPI. (2021). *AGREGADOS. Determinación de la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino. Método de ensayo*. 4ª Edición (NTP 400.022).
- INDECOPI. (2021). *AGREGADOS. Determinación del contenido de humedad total evaporable de agregados por secado. Método de ensayo*. 3ª Edición (NTP 339.185).
- INDECOPI. (2020). *AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar la masa por unidad de volumen o densidad ("Peso Unitario") y los vacíos en los agregados*. 4ª Edición (NTP 400.017).
- INDECOPI. (2021). *CONCRETO. Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento hidráulico. Especificaciones*. 4ª Edición (NTP 339.088).
- INDECOPI. (2020). *CONCRETO. Determinación de la exudación del concreto. Método de ensayo*. 4ª Edición (NTP 339.077).
- INDECOPI. (2021). *CONCRETO. Determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas. Método de ensayo*. 5ª Edición (NTP 339.034).
- INDECOPI. (2022). *CONCRETO. Medición del asentamiento del concreto de cemento hidráulico. Método de Ensayo*. 5ª Edición (NTP 339.035).
- INDECOPI. (2012). *CONCRETO. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a tracción simple del concreto, por*

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO ELABORADO CON AGUA RESIDUAL TRATADA Y AGREGADO FINO RECICLADO, PARA A/C 0.45 y 0.50

- compresión diametral de una probeta cilíndrica. 3ª Edición* (NTP 339.084).
- INDECOPI. (2019). *CONCRETO. Método de ensayo para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico) del concreto. 3ª Edición* (NTP 339.046).
- INDECOPI. (2017). *CONCRETO. Método de ensayo para la determinación del tiempo de fraguado de mezclas por medio de la resistencia a la penetración. 4ª Edición* (NTP 339.082).
- INDECOPI. (1999). *MANEJO DE RESIDUOS DE LA ACTIVIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN. Reciclaje* (NTP 400.053).
- Kou, S., Poon, C. y Wan, H. (2012). Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 36, 881-889.
- Medina, A. (2022). *Influencia de la incorporación de agregado grueso de concreto reciclado, en las propiedades mecánicas a compresión y flexión del concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ – Abancay 2021* [Tesis de grado para optar por el Título de Ingeniero Civil]. Repositorio Digital Institucional de la Universidad Tecnológica de los Andes <https://repositorio.utea.edu.pe/handle/utea/342>
- Naik, T., Dhir, R., Dyer, T. y Newlands, M. (2005). *Sustainability of the cement and concrete industries: Sustainable construction materials and Technologies*, 141-150. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1680/asic.34044.0017>
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). (2014). *Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales*. <http://www.oefa.gob.pe/wp-content/uploads/2016/10/1.-Fiscalizaci%C3%B3n-ambiental-vinculada-a-las-aguas-residuales.pdf>
- Ponce, C. (2014). *Estudio del concreto reciclado de mediana a baja resistencia, utilizando cemento portland tipo I* [Tesis de grado para optar por el Título de Ingeniero Civil]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ingeniería <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/3643>
- Sáenz, E. (2021). *Análisis de las propiedades del concreto de mediana a baja resistencia elaborado con agua residual tratada* [Tesis de grado para optar por el Título de Ingeniero Civil]. Repositorio Institucional de la

Universidad Nacional de Ingeniería

<https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/22081>

Sánchez, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero* (5ª ed.). Bhandar Editores Ltda.

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México y Comité de Normalización Ambiental del Distrito Federal. (2020). *Proyecto de Norma Ambiental para la Ciudad de México* (PROY-NADF-007-RNAT-2019).

Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS). (8 de junio de 2022). *El tratamiento de aguas residuales en el Perú aumentó en 11 %, entre el 2016 y el 2020*. <https://www.sunass.gob.pe/lima/el-tratamiento-de-aguas-residuales-en-el-peru-aumento-en-11-entre-el-2016-y-el-2020/>

Urbina, E. (2019). *Efecto del agregado fino reciclado en las propiedades del concreto $f'c$ 210 kg/cm²* [Tesis de grado para optar por el Título de Ingeniero Civil]. Repositorio institucional de la Universidad Ricardo Palma <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/2086>

ANEXOS

ANEXO N°01: FICHA TÉCNICA DEL CEMENTO TIPO I SOL.

CEMENTO SOL



UNACEM
CONSTRUYENDO OPORTUNIDADES

Ficha Técnica

CEMENTO SOL

Descripción:

- Es un Cemento Pórtland Tipo I, obtenido de la molienda conjunta de Clinker y yeso.

Beneficios:

- El acelerado desarrollo de resistencias iniciales permite un menor tiempo en el desencofrado.
- Excelente desarrollo de resistencias en Shotcrete.
- Excelente desarrollo en resistencias a la compresión.
- Buena trabajabilidad.

Usos:

- Construcciones en general y de gran envergadura cuando no se requieren características especiales o no especifique otro tipo de cemento.
- Fabricación de concretos de mediana y alta resistencia a la compresión.
- Preparación de concretos para cimientos, sobrecimientos, zapatas, vigas, columnas y techado.
- Producción de prefabricados de concreto.
- Fabricación de bloques, tubos para acueducto y alcantarillado, terrazos y adoquines.
- Fabricación de morteros para el desarrollo de ladrillos, tarrajeos, enchapes de mayólicas y otros materiales.
- Shotcrete y grout.

Características Técnicas:

- Cumple con la Norma Técnica Peruana NTP-334.009 y la Norma Técnica Americana ASTM C-150.

Formato de Distribución:

- Bolsas de 42.5 Kg: 04 pliegos (03 de papel + 01 film plástico).
- Granel: A despacharse en camiones bombonas y Big Bags.



Recomendaciones

Dosificación:

- Se debe dosificar según la resistencia deseada.
- Respetar la relación agua/cemento (a/c) a fin de obtener un buen desarrollo de resistencias, trabajabilidad y performance del cemento.
- Realizar el curado con agua a fin de lograr un buen desarrollo de resistencia y acabado final.

Manipulación:

- Se debe manipular el cemento en ambientes ventilados.
- Se recomienda utilizar equipos de protección personal.
- Se debe evitar el contacto del cemento con la piel, los ojos y su inhalación.

Almacenamiento:

- Almacenar las bolsas bajo techo, separadas de paredes y pisos. Protegerlas de las corrientes de aire húmedo.
- No apilar más de 10 bolsas para evitar su compactación.
- En caso de un almacenamiento prolongado, se recomienda cubrir los sacos con un cobertor de polietileno.

ANEXO N°03: FICHA TÉCNICA DE LA ARENA RECICLADA.





PRODUCTO	Agregado G / Arena gruesa
CARACTERÍSTICAS	Agregado Ecológico Grueso. Obtenido por la trituración artificial de material reciclado (gravas, concreto). Muy importante para la elaboración del concreto. Ideal para la construcción
PESO	Saco de 33Kg / A pedido por metro cúbico (m ³)
COLOR	Marrón
USO Y APLICACIONES	Ideal como agregado para solados, falsas zapatas, sobrecimientos, falso piso, entresijos, veredas, muros de contención, mejoramiento de sub base, mejoramiento de base y pavimentos, entre otros
TIPO	Áridos a granel