

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL: DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis

**Influencia de la incorporación de acero recuperado de neumáticos en el
asentamiento, resistencia a compresión y flexión en un concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$**

Abancay- Apurímac, 2023

Asesor:

Ph.D Vásquez Ramírez, Abbon Alex

Autor:

Alvarez López, Angel Edmar

Para optar el título profesional de: Ingeniero Civil

Abancay - Apurímac - Perú

2025



Universidad Tecnológica de los Andes

Transformando vidas

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 092

En la ciudad de Abancay, a los veintitrés días del mes de diciembre del 2025, siendo las 11:00 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 1078-2025- EPIC-FI-UTEA-SA de fecha 18 de diciembre del 2025, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería:

Presidente	: Mag. Huanca Astoquillca, Luis
Dictaminante	: Mag. Roldan Juárez, Américo
Replicante	: Mag. Saavedra Ore, Danilo

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Influencia de la incorporación de acero recuperado de neumáticos en el asentamiento, resistencia a compresión y flexión en un concreto $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ Abancay, Apurímac, 2023

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br: Alvarez Lopez, Angel Edmar

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO (S):

Por: Unanimidad
(Unanimidad o Mayoría) (*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Alvarez Lopez, Angel Edmar	Aprobado

Siendo las 12:30pm horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mag. Huanca Astoquillca, Luis

Dictaminante: Mag. Roldan Juárez, Américo

Replicante: Mag. Saavedra Ore, Danilo

Abancay 06 de enero del 2026

Se expide, la presente conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, consignado en los folios N° 393

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
Ciudad Universitaria Av. Perú N° 700, Abancay, Central Telefónica 051 (083) 321559
Filial Cusco, Av. Grau N° 516, Teléfono (084) 251565
Filial Andahuaylas, Av. Juan Antonio Trelles N° 513 Teléfono (083) 421752
www.utea.edu.pe

(*): Mayoría: Dos integrantes del jurado aprueban o desaprueban; Unanimidad: Todos los integrantes del jurado aprueban o desaprueban, Art. 18 RGGAT.
(**): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.




23% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Fuentes principales

- 16%  Fuentes de Internet
- 6%  Publicaciones
- 19%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Metadatos

Datos del autor		
Nombres y Apellidos		Bach. Ángel Edmar Álvarez López
Tipo de Documento de identidad		DNI
Numero de Documento de identidad		47433322
URL ORCID		https://orcid.org/0009-0008-2000-6510
Datos del Asesor		
Nombres y apellidos		Ph.D Abbon Alex Vásquez Ramírez
Tipo de Documento de identidad		DNI
Numero de Documento de identidad		06532658
URL ORCID		https://orcid.org/0000-0001-7299-5367
Datos de la Investigación		
Facultad		Ingeniería
Escuela profesional		Ingeniería Civil
Línea de Investigación		Gestión de la infraestructura para el desarrollo sostenible
Rango de años que se realizó la investigación		2024
Fuente de financiamiento		Autofinanciado
Control de anti plagio (Turnitin)		23%
URL de OCDE		https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

A Dios, fuente de mi fortaleza, por darme la sabiduría y a la resiliencia para superar cada desafío en mi vida. Gracias por guiarme con tu amor y luz en cada paso de este camino.

A mi familia, por su amor incondicional y apoyo constante, que me ha dado la fuerza para para seguir adelante. Gracias por estar siempre a mi lado, creyendo en mí incluso en los momentos más difíciles.

Ángel Edmar Á. L.

Agradecimiento

Agradezco a Dios, fuente infinita de sabiduría y guía, por iluminar mi camino en cada paso de este viaje. Gracias por darme la fortaleza para enfrentar las adversidades, por mostrarme que el verdadero conocimiento comienza en la humildad de reconocer que siempre hay más por aprender.

Agradezco a mis padres, cuya generosidad y sacrificio no solo me ofrecieron las bases de mi educación sino también la resiliencia y la determinación necesarias para superar los obstáculos que se presentan en la vida.

A Edgar y Julio (†) y para mi abuela Laura (†). Este logro es, en gran parte, el fruto de su amor y enseñanza. Aunque ya no estén básicamente a mi lado, su legado vive en cada paso que doy, en cada decisión que tomo, y en la forma en que enfrento la vida con valentía y esperanza. Les debo más de lo que las palabras puedan expresar.

Agradezco a mi Universidad Tecnológica de los Andes, por proporcionarme las herramientas intelectuales y el espacio para cuestionar, crecer y desafiarme. Gracias por fomentar el pensamiento crítico, por ser el lugar donde la teoría se encuentra con la práctica y por ofrecerme un entorno que impulse la curiosidad y la búsqueda de la verdad. Este trabajo es el reflejo de una formación que va más allá de los libros, un proceso de crecimiento y transformación. Y a mí asesor de tesis Ph D. Ing. Abbon Alex Vásquez Ramírez, cuya presencia constante, crítica y exigente ha sido esencial en la construcción de este trabajo y en mi crecimiento intelectual.

A mis amigos, por ser ese refugio de la incertidumbre y el estrés. Gracias por las conversaciones estimulantes, las risas que aliviaron los momentos más difíciles y el apoyo constante que me dio fuerzas para seguir adelante, incluso cuando la fatiga dominaba.

“Nunca, pero nunca es tarde para empezar de nuevo y hacer las cosas bien”.

Ángel Edmar Á. L.

Resumen

El informe de tesis tuvo como propósito determinar la influencia de la incorporación de acero recuperado de neumáticos (ARN) en el asentamiento, resistencia a compresión y flexión de un concreto con resistencia característica $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, en la ciudad de Abancay, Apurímac, durante el año 2024. Para ello, se aplicó una metodología de tipo aplicada y nivel explicativo, utilizando un diseño experimental con enfoque cuantitativo. Se elaboraron 48 especímenes de concreto entre probetas cilíndricas y vigas prismáticas, con diferentes porcentajes de adición de acero reciclado: 0 %, 4 %, 6 % y 8 %. Los ensayos se realizaron a los 7, 14 y 28 días según las normas técnicas peruanas (NTP) y las especificaciones ASTM. Los resultados demostraron que el ARN disminuye el asentamiento del concreto fresco, indicando una reducción de trabajabilidad. En cuanto a la resistencia a compresión, se observó un aumento significativo con una dosificación óptima del 8 %, alcanzando un valor máximo de 324.72 kg/cm^2 , superando en 54.6 % la resistencia de diseño. En relación con la resistencia a flexión, la dosificación de 1.6 % reportó el mayor valor (40.92 kg/cm^2), reflejando un incremento relevante frente a la mezcla patrón. Se concluye que el ARN actúa como un refuerzo efectivo, mejorando las propiedades mecánicas del concreto, aunque compromete parcialmente su trabajabilidad. El estudio propone al ARN como una alternativa viable y sostenible en el diseño de mezclas de concreto estructural.

Palabras clave: concreto reforzado, acero reciclado, neumáticos, propiedades mecánicas.

Abstract

The purpose of this research was to determine the influence of incorporating recycled tire steel fibers (RTSF) on the slump, compressive strength, and flexural strength of concrete with a characteristic strength of $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, developed in the city of Abancay, Apurímac, in 2023. An applied, explanatory-level methodology was used, based on an experimental design with a quantitative approach. A total of 48 specimens were prepared, including cylindrical and prismatic samples, with different dosages of recycled steel: 0%, 4%, 6%, and 8%. Testing was performed at 7, 14, and 28 days in accordance with Peruvian Technical Standards (NTP) and ASTM specifications. The results showed that the addition of RTSF decreased the concrete slump, indicating reduced workability. Regarding compressive strength, a significant increase was observed with an optimal dosage of 8%, reaching a maximum value of 324.72 kg/cm^2 , which exceeded the design strength by 54.6%. In terms of flexural strength, the 1.6% dosage achieved the highest value (40.92 kg/cm^2), highlighting a substantial improvement compared to the control mix. It is concluded that recycled tire steel fibers serve as an effective reinforcement, enhancing the mechanical performance of concrete while slightly compromising its workability. The study supports the use of RTSF as a sustainable and technically viable additive for structural concrete mix design.

Keywords: reinforced concrete, recycled steel, tires, mechanical properties.

Índice

Portada.....	i
Acta de sustentación.....	ii
Reporte de similitud.....	iii
Metadatos.....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento.....	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
Índice.....	ix
Índice de tablas.....	x
Índice de figuras.....	xiii
Índice de anexos.....	xiii
I. Introducción.....	15
II. Planteamiento del problema.....	17
2.1 Descripción y formulación de la problemática.....	17
2.2 Objetivos.....	19
2.2.1 Objetivo general.....	19
2.2.2 Objetivo específico.....	19
2.3 Justificación e importancia.....	20
2.4 Hipótesis.....	21
2.5 Variable.....	21
III. Marco teórico.....	24
3.1 Antecedentes del problema.....	24
3.2 Bases teóricas.....	35
3.2.1 El concreto.....	43
3.2.2 Acero reciclado.....	52
3.3 Definición de términos.....	52
IV. Metodología.....	56
4.1 Tipo y nivel de investigación.....	56
4.2 Ámbito temporal y espacial.....	56
4.3 Población y muestra.....	56
4.4 Instrumentos.....	58
4.5 Procedimiento.....	59
4.6 Análisis de datos.....	59
4.7 Consideraciones éticas.....	61
V. Resultados y discusión.....	62
5.1 Resultados.....	62
5.2 Contrastación de hipótesis.....	166
5.3 Discusiones.....	169
VI. Conclusiones.....	173
VII. Recomendaciones.....	175
VIII. Referencias.....	176
IX. Anexos.....	187

Índice de tablas

Tabla 1	Agregado fino.....	44
Tabla 2	Porcentaje que pasa por los tamices normalizados	45
Tabla 3	Granulometría de agregado grueso	62
Tabla 4	Análisis granulométrico del agregado fino.....	64
Tabla 5	Peso unitario suelto y vacíos del agregado grueso.....	66
Tabla 6	Peso unitario varillado y vacíos del agregado grueso	68
Tabla 7	Peso unitario suelto y vacíos del agregado Fino.....	69
Tabla 8	Peso unitario varillado y vacíos del agregado fino	71
Tabla 9	Peso unitario suelto.....	72
Tabla 10	Peso específico y absorción del agregado grueso	73
Tabla 11	Gravedad específica y absorción del agregado fino	75
Tabla 12	Contenido de humedad del agregado grueso	76
Tabla 13	Contenido de humedad del agregado fino	78
Tabla 14	Diseño de mezcla para un concreto con resistencia a la compresión de 210 kg/cm ²	79
Tabla 15	Cemento portland	81
Tabla 16	Datos de diseño del agregado fino	81
Tabla 17	Diseño del agregado grueso	83
Tabla 18	Volumen Absolutos	84
Tabla 19	Contenido de agregado fino	85
Tabla 20	Valores de diseño	86
Tabla 21	Corrección por humedad.....	88
Tabla 22	Pesos corregidos por humedad.....	90
Tabla 23	Cantidad de materiales y proporción.....	91
Tabla 24	Dosificación en baldes	92
Tabla 25	Dosificación para briquetas y/o vigas	94
Tabla 26	Medición de Temperatura	95
Tabla 27	Medición de asentamiento concreto patrón	97
Tabla 28	Ensayo de peso unitario del concreto fresco	98
Tabla 29	Medición de contenido de aire	99
Tabla 30	Medición de temperatura	100
Tabla 31	Medición de asentamiento concreto con adición al 4% ARN.....	101

Tabla 32	Ensayo de peso unitario del concreto fresco	102
Tabla 33	Medición de contenido de aire	103
Tabla 34	Medición de temperatura	104
Tabla 35	Medición del asentamiento concreto con adición al 6% ARN.....	105
Tabla 36	Ensayo de peso unitario del concreto fresco	106
Tabla 37	Medición de contenido de aire	107
Tabla 38	Medición de temperatura	108
Tabla 39	Medición de asentamiento concreto con adición al 8% ARN.....	109
Tabla 40	Ensayo de peso unitario del concreto fresco	110
Tabla 41	Medición de contenido de aire	111
Tabla 42	% que pasa tamiz N°200 del agregado grueso.....	112
Tabla 43	% que pasa tamiz N°200 del agregado fino.....	113
Tabla 44	Resistencia a compresión a los 7 días concreto patrón	114
Tabla 45	Resistencia a compresión a los 7 días concreto al 4% ARN.....	115
Tabla 46	Resistencia a compresión a los 7 días concreto al 6 % ARN.....	116
Tabla 47	Resistencia a compresión a los 7 días concreto al 8 % ARN.....	117
Tabla 48	Resistencia a compresión a los 14 días concreto patrón	119
Tabla 49	Resistencia a compresión a los 14 días concreto al 4% ARN	120
Tabla 50	Resistencia a compresión a los 14 días concreto al 6 % ARN.....	121
Tabla 51	Resistencia a compresión a los 14 días concreto a 8% ARN.....	122
Tabla 52	Resistencia a compresión a los 28 días concreto patrón	124
Tabla 53	Resistencia a compresión a los 28 días concreto al 4% ARN.....	124
Tabla 54	Resistencia a compresión a los 28 días concreto al 6 % ARN.....	126
Tabla 55	Resistencia a compresión a los 28 días concreto al 8 % ARN.....	127
Tabla 56	Concreto patrón	129
Tabla 57	Concreto con adición al 4% ARN.....	129
Tabla 58	Concreto con adición al 6% ARN.....	132
Tabla 59	Concreto con adición al 8% ARN.....	134
Tabla 60	Resistencia a flexión a los 7 días concreto patrón	137
Tabla 61	Resistencia a flexión a los 7 días concreto al 4% ARN	138
Tabla 62	Resistencia a flexión a los 7 días concreto al 6 % ARN	139
Tabla 63	Resistencia a flexión a los 7 días concreto al 8 % ARN	140
Tabla 64	Resistencia a flexión a los 14 días concreto patrón	142
Tabla 65	Resistencia a flexión a los 14 días concreto al 4% ARN	143

Tabla 66	Resistencia a flexión a los 14 días concreto al 6 % ARN	144
Tabla 67	Resistencia a flexión a los 14 días concreto al 8 % ARN	145
Tabla 68	Resistencia a flexión a los 28 días concreto patrón	146
Tabla 69	Resistencia a flexión a los 28 días concreto al 4% ARN	147
Tabla 70	Resistencia a flexión a los 28 días concreto al 6 % ARN	148
Tabla 71	Resistencia a flexión a los 28 días concreto al 8% ARN	149
Tabla 72	Concreto patrón	151
Tabla 73	Concreto con adición al 4% ARN	151
Tabla 74	Concreto con adición al 6% ARN	154
Tabla 75	Concreto con adición al 8% ARN	156
Tabla 76	Resultados del objetivo específico 01 (Asentamiento)	158
Tabla 77	Resultado del objetivo específico 02 (Compresión)	160
Tabla 78	Resultado del objetivo específico 03 (Flexión)	162
Tabla 79	Resultado del objetivo general	164

Índice de figuras

Figura 1	Efecto de relación agua – Cemento.....	51
Figura 2	Estructura de la llanta o neumático	36
Figura 3	Composición de los neumáticos.....	36
Figura 4	Fibras de acero proveniente de los neumáticos	37
Figura 5	Análisis granulométrico grueso	64
Figura 6	Análisis granulométrico fino.....	66
Figura 7	Concreto patrón compresión	129
Figura 8	Concreto con adición al 4% ARN compresión.....	131
Figura 9	Concreto con adición al 6% ARN compresión.....	133
Figura 10	Concreto con adición al 8 % ARN compresión.....	135
Figura 11	Concreto patrón flexión	151
Figura 12	Concreto con adición al 4% ARN flexión	153
Figura 13	Concreto con adición al 6% ARN flexión	155
Figura 14	Concreto con adición al 8% ARN flexión	157
Figura 15	Resultado del objetivo específico 01 (Asentamiento).....	159
Figura 16	Resultado del objetivo específico 02 (Compresión)	161
Figura 17	Resultado del objetivo específico 03 (Flexión)	163

Índice de anexos

Anexo 1 Matriz de consistencia.....	187
Anexo 2 Operacionalización de variables.....	188
Anexo 3 Diseño de mezcla de concreto hidráulico	189
Anexo 4 Resultado de rotura de probetas	225
Anexo 5 Certificados de calibración.....	250
Anexo 6 Panel fotográfico.....	260

I. Introducción

El presente informe de tesis se centra en el examen de la incidencia de la inclusión de acero recuperado proveniente de llantas fuera de circulación (NFU) sobre las características del hormigón, específicamente en el asentamiento, capacidad de soporte a la compresión y tenacidad frente a la flexión de una mezcla con diseño estructural $f'c = 210$ kg/cm², ejecutada en la ciudad de Abancay, región Apurímac, a lo largo del año 2023. La utilización de insumos reutilizados en el rubro constructivo ha cobrado creciente relevancia ante la urgencia de aminorar la huella ecológica de los residuos sólidos, siendo uno de los más críticos el generado por los neumáticos desechados, los cuales no son biodegradables y ocupan un volumen considerable en los botaderos municipales. En este contexto, el aprovechamiento del acero presente en su interior como refuerzo alternativo en mezclas de concreto se presenta como una solución técnica viable y ambientalmente responsable.

El interés por desarrollar este informe de tesis radica en la búsqueda de alternativas sostenibles orientadas al perfeccionamiento de las propiedades físicas del hormigón convencional, al tiempo en que se mitiga la problemática vinculada a la acumulación de desechos peligrosos como los cauchos. Asimismo, se pretende generar conocimiento local sobre materiales innovadores y su aplicabilidad en las condiciones propias de la región andina, considerando las características climáticas, logísticas y constructivas de Abancay.

Para el desarrollo del estudio se optó por una metodología de tipo experimental aplicada. Se elaboraron diseños de compuestos cementicios integrando diferentes cuantías de acero recuperado proveniente de neumáticos, evaluando su efecto sobre el asentamiento en condición plástica, así como la capacidad resistente a la compresión y flexión a edades estándar. Las muestras fueron ensayadas conforme a lo estipulado en los estándares técnicos del Perú (NTP) y la normativa ASTM, permitiendo establecer comparaciones con una mezcla de referencia exenta de incorporación de fibras metálicas.

La finalidad esencial de este informe de trabajo de investigación fue determinar el desempeño fisicomecánico del hormigón $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con adición de varilla reciclada de NFU y analizar su factibilidad técnica como refuerzo secundario en elementos portantes. Entre los objetivos específicos destacan: cuantificar el cambio en la consistencia de la mezcla; evaluar la variación de la capacidad resistente a la compresión frente al concreto tradicional; y analizar el aporte del material férreo reutilizado en la tenacidad a la flexión del hormigón endurecido.

La estructura del trabajo está organizada de manera sistemática en seis capítulos. El Capítulo I desarrolla la introducción al tema, destacando su relevancia y justificación. El Capítulo II plantea el problema de investigación, los objetivos, la hipótesis y las limitaciones del estudio. En el Capítulo III se presenta el marco teórico, incluyendo los antecedentes, fundamentos del concreto reforzado con fibras, y propiedades del acero de neumáticos. El Capítulo IV expone la metodología empleada, describiendo el diseño experimental, las variables, y los procedimientos de ensayo. El Capítulo V contiene los resultados obtenidos y su análisis comparativo. Finalmente, el Capítulo VI resume las conclusiones principales del estudio y sugiere recomendaciones para futuras investigaciones o aplicaciones prácticas.

II. Planteamiento del problema

2.1 Descripción y formulación de la problemática

A escala global, el hormigón constituye uno de los insumos más utilizados en el sector constructivo; dicho hormigón tradicional presenta una aptitud restringida para resistir fuerzas de tracción y curvatura, lo cual provoca grietas en diversas estructuras civiles como pavimentos de concreto, suelos industriales, entre otros. Durante la ejecución de obras es común detectar fallos, ya que los materiales de construcción suelen presentar imperfecciones, influenciados por múltiples variables tales como la dosificación de agua y aglutinante, lo cual provoca una reducción en su resistencia (Muñoz et al., 2022).

En la actualidad, la gestión de residuos sólidos se ha convertido en un desafío ambiental de alcance global, especialmente en lo que respecta a los neumáticos fuera de uso (NFU), cuyo volumen, persistencia en el ambiente y potencial contaminante plantean graves problemas de salud pública y sostenibilidad. A nivel internacional, países como India, China y Tailandia enfrentan acumulaciones críticas de neumáticos desechados debido al crecimiento del parque automotor y a una infraestructura inadecuada de reciclaje, lo que ha motivado políticas urgentes de valorización de residuos mediante su uso en pavimentos y concretos estructurales (Ferdous et al., 2021).

En el contexto latinoamericano, el sector de la construcción representa una de las industrias de mayor consumo de materiales vírgenes, lo cual tiene un fuerte impacto ambiental, especialmente en países en vías de desarrollo, donde las tecnologías sostenibles aún tienen un alcance limitado (Jiménez y Domínguez, 2020). En ese sentido, la investigación de nuevos insumos para el concreto, especialmente aquellos provenientes de residuos sólidos como los NFU, se presenta como una necesidad técnica, ambiental y económica.

En Perú, la gestión de neumáticos usados no cuenta con una regulación precisa y adecuada, lo cual genera una seria situación ambiental que también representa un peligro

para la salud de las personas (Ramírez et al., 2023). No obstante, no contamos con una cifra aproximada sobre los neumáticos que han sido descartados. En los últimos años, se ha observado un incremento en la innovación tecnológica del concreto, con el objetivo de potenciar sus propiedades mecánicas mediante atributos específicos adaptados a distintos campos de uso. Una alternativa creativa es emplear fibra de acero en la elaboración de concreto para diversas estructuras, ya que ayuda a fortalecer y prevenir grietas tanto en situaciones de compresión como de flexión. (Gutiérrez et al., 2016).

Ante la problemática mencionada, resulta pertinente analizar las fibras de acero presentes en neumáticos desechados como una opción para potenciar las características físicas y mecánicas del concreto. De esta manera, se estaría reutilizando el acero contenido en los neumáticos usados, lo que no solo beneficiaría al medio ambiente, sino que también impulsaría el desarrollo tecnológico del concreto.

Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), la población de la provincia de Abancay en el año 2020 era de 89,025 habitantes, con una tendencia creciente en los últimos años (INEI, 2020). Este crecimiento poblacional implica una mayor demanda de viviendas y, por ende, un incremento en las actividades de construcción. Sin embargo, el sector construcción en Apurímac experimentó una disminución del 12.2% en 2023, atribuida a factores como la reducción del consumo interno de cemento y la desaceleración de proyectos privados (Instituto Peruano de Economía, 2024).

En este escenario, la reutilización del acero recuperado de NFU en la fabricación de hormigón podría representar una propuesta disruptiva y sostenible, al mermar la cantidad de desechos sólidos y mejorar las cualidades físico-mecánicas del material. El presente estudio se propone evaluar la repercusión de la incorporación de acero reciclado proveniente de neumáticos en el asentamiento, capacidad resistente a compresión y tenacidad a la flexión de una mezcla cementicia con una capacidad estructural característica de $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$,

en la urbe de Abancay, a lo largo del año 2023. Este estudio busca impulsar el progreso de materiales de construcción más perdurables y adaptados a los requerimientos territoriales, promoviendo la circularidad económica y el resguardo del entorno natural.

Formulación del problema de investigación

2.1.1. Problema general

¿Cómo es la Influencia de la incorporación de acero recuperado de neumáticos en el asentamiento, resistencia a compresión y flexión en un concreto $f^c=210$ kg/cm² Abancay- Apurímac, 2023?

2.1.2. Problemas específicos

P.E -01. ¿Cómo es la Influencia de la incorporación de acero recuperado de neumáticos en el asentamiento de un concreto $f^c=210$ kg/cm² Abancay- Apurímac, 2023?

P.E -02 ¿Cómo es la Influencia de la incorporación de acero recuperado de neumáticos en la resistencia a compresión de un concreto $f^c=210$ kg/cm² Abancay- Apurímac, 2023.?

P.E -03 ¿Cómo es la Influencia de la incorporación de acero recuperado de neumáticos en la resistencia a flexión de un concreto $f^c=210$ kg/cm² Abancay- Apurímac, 2023?

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo general

Determinar la Influencia de la incorporación de acero recuperado de neumáticos en el asentamiento, resistencia a compresión y flexión en un concreto $f^c=210$ kg/cm² Abancay- Apurímac, 2023.

2.2.2 Objetivo específico

O.E -01. Analizar la Influencia de la incorporación de acero recuperado de neumáticos en el asentamiento de un concreto $f^c=210$ kg/cm² Abancay- Apurímac, 2023.

O.E -02. Analizar la Influencia de la incorporación de acero recuperado de neumáticos en la resistencia a compresión de un concreto $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$ Abancay-Apurímac, 2023.

O.E -03. Analizar la Influencia de la incorporación de acero recuperado de neumáticos en la resistencia a flexión de un concreto $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$ Abancay-Apurímac, 2023.

2.3 Justificación e importancia

El presente estudio surge como una solución ante la urgencia de identificar soluciones ecoeficientes y de bajo costo en el sector construcción, proponiendo el uso de varilla reciclada proveniente de cubiertas en desuso (NFU) como refuerzo dentro de compuestos cementicios con una capacidad estructural característica de $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$. En un contexto donde el uso excesivo de aditivos eleva significativamente los costos y donde el manejo inadecuado de residuos, como los neumáticos, representa un grave problema ambiental, esta investigación plantea una alternativa viable y ecológica para la elaboración de concreto. Al prescindir de aditivos y aprovechar materiales reciclables, se busca no solo reducir los costos de construcción, sino también ofrecer una opción accesible para personas en zonas urbanas y rurales que requieran soluciones constructivas sostenibles.

Desde una perspectiva social y ambiental, el reciclaje del acero contenido en neumáticos permite valorizar un residuo altamente contaminante, cuya acumulación afecta gravemente a muchas ciudades, incluyendo Abancay. Esta propuesta está en sintonía con los fundamentos de la economía circular y en concordancia con los propósitos de desarrollo sostenible, específicamente con el ODS 12 (fomento de esquemas de producción y consumo sostenibles) y el ODS 13 (intervención climática), al disminuir la impronta ecológica y fomentar la reutilización de recursos.

Metodológicamente, El estudio se situó dentro de un enfoque experimental y cuantitativo. Se crearon propuestas de combinación con la inclusión de acero reutilizado,

llevando a cabo pruebas en el laboratorio para analizar sus características mecánicas tanto en su estado inicial como una vez fraguado. Estos resultados no solo permitieron verificar la viabilidad técnica de la propuesta, sino también sentarán las bases para investigaciones futuras en el campo de los materiales de construcción sostenibles.

En suma, la importancia de esta investigación radica en su capacidad para integrar el rigor científico con una propuesta innovadora de gran aplicabilidad práctica, contribuyendo a la ingeniería civil sostenible mediante la mejora del desempeño estructural del concreto y la mitigación del impacto ambiental generado por los residuos sólidos.

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis general

La incorporación de acero recuperado de neumáticos influye en el asentamiento, resistencia a compresión y flexión en un concreto $f^c=210$ kg/cm² Abancay-Apurímac, 2023.

2.4.2 Hipótesis específicas

La incorporación de acero recuperado de neumáticos influye en el asentamiento de un concreto $f^c=210$ kg/cm² Abancay- Apurímac, 2023.

La incorporación de acero recuperado de neumáticos influye en la resistencia a compresión de un concreto $f^c=210$ kg/cm² Abancay- Apurímac, 2023.

La incorporación de acero recuperado de neumáticos influye en la resistencia a flexión de un concreto $f^c=210$ kg/cm² Abancay- Apurímac, 2023.

2.5. Variable

Variable independiente

Acero recuperado de neumáticos

Definición conceptual

El acero recuperado de neumáticos se refiere al conjunto de fibras metálicas que se extraen de los neumáticos fuera de uso (NFU) mediante procesos mecánicos o térmicos

de reciclaje. Estas fibras, compuestas principalmente por acero al carbono, son utilizadas como refuerzo en materiales compuestos como el concreto, mejorando sus propiedades mecánicas, en especial la resistencia a la tracción y a la fisuración (Onuaguluchi, et al., 2017).

Variable dependiente

Asentamiento, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión

Asentamiento

El reflujo plástico es una propiedad del hormigón fresco que mide su trabajabilidad, o sea, la sencillez con la que se puede distribuir y comprimir la combinación sin que se separe. La determinación se realiza a través del ensayo de cono de Abrams, además, su medida está afectada por elementos tales como la relación agua/aglutinante, la composición intrínseca del material agregado junto con la presencia de aditivos (Neville, 2012).

Resistencia a la compresión

La aptitud para soportar cargas de compresión es una característica esencial del concreto una vez que ha endurecido, demostrando su habilidad para soportar presiones verticales sin sufrir daños. Es considerada una estimación directa del rendimiento estructural del hormigón, y se evalúa comúnmente mediante ensayos en cilindros normalizados (ASTM C39).

Resistencia a la flexión

La facultad del hormigón para oponerse a tensiones de tracción generadas por cargas de flexión se evalúa mediante la tenacidad a la flexión, también conocida como módulo de quiebre (Neville, 2012).

Tabla 1*Operacionalización de Variables*

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Variable Independiente: Acero recuperado de neumáticos	Machaca (2022), A medida que se incrementa la cantidad utilizada, la consistencia se vuelve más espesa y se añade un poco más de aire. En lo que respecta a las características mecánicas, la incorporación de la FANR tiene un impacto beneficioso en el hormigón al añadir un 1.2% de aditivo para resistencia a la compresión y tracción, logrando aumentar su fortaleza en un 21.00% y 17.18% respectivamente. En cuanto a la flexión, se observó que la mayor resistencia se logra con un 1.6% de adición, generando un incremento del 22.33%.	Un procedimiento que implica el uso de materias primas diferentes. En la fabricación de hormigón, se emplea material reciclado proveniente de neumáticos para el refuerzo, considerando distintas proporciones (4%, 6% y 8%) de acero recuperado.	Dosificación de acero recuperado de neumático	4%,6% y 8% de acero recuperado de neumático	-Ficha del laboratorio -Porcentajes -Dosificación optima
Variable Dependiente: Asentamiento, resistencia a compresión y flexión	El asentamiento mide la manejabilidad del concreto, evaluando la fluidez de la mezcla fresca. (NTP 339.035, 2022).	Indicador de trabajabilidad: se realiza en el concreto en estado fresco.	-Asentamiento	--Medición del asentamiento (pulg.) -Norma Técnica Peruana 339.035	-Ensayo de laboratorio asentamiento del concreto en estado fresco
	La capacidad de resistencia a la compresión del concreto se define como su aptitud para oponerse a una fuerza ejercida sobre cada una de sus caras. (NTP 339.034, 2015).	Indicador de calidad del concreto, se roturan en testigos cilíndricos de 6" x 12".	-Resistencia a la compresión	-Esfuerzo (Kg/cm ²) -Norma técnica peruana 339.034	-Ensayo de laboratorio compresión axial
	La resistencia a la flexión es la mayor resistencia que puede ofrecer una muestra de concreto sometida a flexión (NTP 339.078, 2022).	Indicador de calidad del concreto, se roturan testigos prismáticos de 6" x 6" x 18".	-Resistencia a la flexión	-Esfuerzo (Kg/cm ²) -Norma técnica peruana 339.078	-Ensayo de flexión

Nota. En la tabla se muestra los datos de la matriz de operacionalización de variables independientes y variables dependientes.

III. Marco teórico

3.1 Antecedentes del problema

Hameed et al. (2025) que lleva como Título “Transforming Waste into Strength with Recycled Tire Steel Fibers for Superior Concrete Performance”. El propósito de esta investigación fue analizar el potencial estructural de las fibras metálicas recicladas de neumáticos (ARN) como refuerzo en compuestos cementicios, enfocándose en las mejoras de capacidad resistente a compresión, tenacidad e impacto. En la Metodología se diseñaron mezclas experimentales con tres niveles de incorporación de ARN: 0.5 %, 1 % y 1.5 % en volumen, las cuales fueron evaluadas a través de ensayos mecánicos conforme a normativas ASTM. La población de estudio estuvo compuesta por unidades experimentales de briquetas, donde la muestra estuvo compuesta por 12 unidades. Los resultados demostraron que el uso de ARN produce mejoras significativas en la tenacidad frente a flexión e impactos, especialmente a una proporción del 1.5 %. En este nivel, la tenacidad a flexión se incrementó en aproximadamente un 16 % en comparación con el hormigón de referencia, mientras que la capacidad de absorción de energía ante impactos también mostró una mejora sustancial. No obstante, conforme se incrementaba el volumen de ARN, se evidenciaba una pérdida progresiva de trabajabilidad, dificultando el moldeo y compactación de las muestras. Como conclusión, el estudio valida la eficacia del ARN como un refuerzo estructural alternativo y sostenible para el concreto, destacando su aporte al comportamiento frente a cargas dinámicas. No obstante, también pone énfasis en la importancia de perfeccionar la formulación de la mezcla mediante el uso de aditivos plastificantes o ajustes en la proporción agua/aglutinante, con el objetivo de mantener cierto equilibrio entre resistencia estructural y manejabilidad durante el proceso constructivo.

Alabdulkarim et al. (2024) denominado “Behavior of Lightweight Self-Compacting Concrete with Recycled Tire Steel Fibers”. El presente estudio tuvo como objetivo examinar el comportamiento mecánico y reológico de un concreto autocompactante liviano reforzado

con fibras de acero recicladas de neumáticos (ARN), enfocándose en su aplicación en construcciones de alta eficiencia estructural. Para tal fin, metodología se diseñaron mezclas con proporciones de ARN del 0.5 %, 1 % y 1.5 %, y se evaluaron variables como la resistencia a compresión, tracción, flexión, trabajabilidad y autocompatibilidad, empleando ensayos normalizados para concreto autocompactante, la población estuvo compuesta por especímenes de concreto cuya muestra de estudio fue de 24 unidades experimentales. Los resultados evidenciaron una mejora significativa en la resistencia a flexión y en la capacidad post-falla del concreto, especialmente con contenidos del 1 % de ARN. La resistencia a compresión también mostró incrementos moderados, lo que sugiere un efecto de refuerzo general. No obstante, la inclusión de fibras generó una pérdida progresiva de fluidez en el concreto, afectando negativamente su capacidad de autocompactación. En particular, mezclas con 1.5 % de ARN presentaron bloqueos durante el ensayo de paso en anillos y pérdida de homogeneidad. Conclusión, el estudio demuestra que el ARN puede ser empleado con éxito en concreto autocompactante liviano siempre que su dosificación se mantenga controlada. Se recomienda limitar el contenido de ARN al 1 % y utilizar aditivos superplastificantes para garantizar el equilibrio entre resistencia estructural, trabajabilidad y fluidez. Esta investigación destaca el potencial del ARN no solo como refuerzo estructural, sino también como insumo ambientalmente sostenible para concretos avanzados.

También, Michalik et al. (2022), en su artículo denominado “Eficacia del refuerzo del hormigón con fibras de acero recicladas para neumáticos”. Se llevó a cabo un estudio con el propósito de evaluar la efectividad de fortalecer el concreto con RTSF en comparación con MSF. Se utilizó un enfoque experimental que abarcó pruebas de fluidez, resistencia restante a la tracción bajo flexión, análisis de fracturas, capacidad de absorción de energía, distribución de fibras en el material y observaciones SEM de las fracturas, empleando criterios de mecánica de fractura de materiales cementosos. Según los datos obtenidos, se

puede observar que la población de estudio fueron unidades prismáticas y cilíndricas con una muestra de 60 unides experimentales cuyas características reológicas de las combinaciones de cemento señalan que los RTSF presentan una disminución en la fluidez más pronunciada que los MSF, sobre todo cuando tienen una cantidad elevada de fibra. Las combinaciones de concreto, aun con cantidades significativas de RTSF y MSF, presentaron una distribución uniforme de la fibra, ya sea con o sin separación. El resultado de la tomografía computarizada reveló una disposición equilibrada y constante de las fibras en el concreto, sin concentraciones específicas. Según los datos obtenidos, la resistencia restante a la tracción por flexión en concretos con RTSF a densidades de 10 y 20 kg/m³ resultó inferior en comparación con los concretos con MSF. No obstante, con una densidad de 30 y 40 kg/m³ de RTSF, se observaron incrementos de alrededor del 20% y 15% en los valores, respectivamente. En el caso de un CMOD que varía entre 0.5 y 1.5 mm, se observó que la tenacidad residual del El concreto armado con inserciones de filamentos férricos retorcidos presentó un desempeño menor respecto al concreto con filamentos férricos de monofilamento. La eficacia en la optimización mecánica del concreto se evalúa a través de la tenacidad a la fractura, que representa la energía necesaria para fracturarlo, vinculada a las zonas integrales bajo la curva esfuerzo–deflexión. Este enfoque innovador contrasta con investigaciones previas. Durante las pruebas de fractura con densidades de 10 y 20 kg/m³ de filamentos metálicos, se observó que el concreto reforzado con filamentos férricos de elevada tenacidad tuvo una resistencia a la fractura inferior respecto al concreto modificado mediante filamentos metálicos. No obstante, en el rango de 30 a 40 kg/m³, la capacidad de oposición a la fisuración fue equiparable en ambas variedades de concreto. En el caso de densidades de 20, 30 y 40 kg/m³, el concreto con adición de filamentos férricos evidenció una superior capacidad frente a la fisuración en contraste con el concreto aditivado mediante filamentos metálicos. En el caso de densidades de 20, 30 y 40 kg/m³, el concreto reforzado

con fibras de acero revela una mayor resistencia a la fractura en comparación con el concreto con fibras de metal. En las conclusiones se observó que la estructura interna de las fracturas en el hormigón con MSF y RTSF era satisfactoria, presentando fibras aseguradas en el interior de la mezcla y restos de la reacción química del cemento claramente visibles en la superficie de las fibras. Tras las observaciones realizadas, se pudo constatar que las fibras se adhieren de manera efectiva al cemento, aunque se percibió una reducción en la consistencia al aumentar la proporción de RTSF. Se determina que el concreto fortalecido con RTSF limpio y mejorado en la medida correcta durante el proceso de reciclaje puede presentar características superiores en comparación con el concreto fortalecido con igual cantidad de MSF.

Sayahi et al. (2021), en su artículo científico titulado “Efecto de las fibras de acero extraídas de neumáticos reciclados sobre el agrietamiento por contracción plástica en hormigón autocompactante”. Se propusieron como meta realizar un análisis y cotejo de la integración de fibras de acero obtenidas a partir del reciclaje de neumáticos y de una fibra de acero adherida que se comercializa, en relación a la fisura causada por la retracción plástica en el hormigón autocompactante. Se añadieron cantidades de 2.5, 5, 7.5 y 10 kg/m³ de filamento reciclado, y 5 y 7.5 kg/m³ para la fibra virgen. El método descrito se caracterizó por ser de enfoque explicativo, de tipo aplicado y sustentado en un diseño empírico. De acuerdo a los datos obtenidos se determinó que la muestra de estudio estuvo conformada por unidades cilíndricas cuya muestra de estudio fueron 27 unidades, se pudo notar que la disminución en la fluidez fue más marcada en el concreto que incorporaba filamento férreo reutilizado procedente de neumáticos. Además, no se apreció ninguna influencia relevante del porcentaje de filamentos en la resistencia a la fisuración de las muestras tras 28 días, lo cual podría estar vinculado a la proporción relativamente baja de filamentos empleados. En cuanto a la contracción horizontal libre, se constató que las mayores deformaciones se

presentaron en la superficie del hormigón, las cuales fueron disminuyendo gradualmente conforme aumentaba la proporción de filamento añadido. En el proceso de diseño se empleó una metodología experimental, la cual se aplicó a los 12 especímenes. Se pudo apreciar que la contracción iniciaba aproximadamente entre los 45 y 60 minutos después de verter el concreto. Se notó que una mayor presencia de fibra no solo reducía la contracción total, sino también la velocidad de deformación horizontal del material. Se observó una gran distorsión en el hormigón estándar, mientras que el hormigón reforzado con nuevos filamentos de acero y una dosis de 7.5 kg/m³ presentó una disminución en el hundimiento, similar al del hormigón con filamentos de acero reciclados de neumáticos y una dosis de 10 kg/m³. Los resultados también evidencian que la eficiencia de ambos tipos de filamentos se incrementa con el transcurso del tiempo, dado que la pendiente de las curvas a los 180 minutos resulta ligeramente más pronunciada que a los 60 minutos. Como resumen, es importante destacar que, en las mezclas con mayor proporción de filamentos, se constató un retraso en el inicio de las fisuras y un aumento en su extensión. A medida que se incrementaba la proporción de filamento, la fluidez del concreto disminuía, lo que ocasionaba una menor exudación del material. Tanto los filamentos de acero nuevos como los reciclados mostraron un efecto similar en la mitigación de las grietas. Además, la presencia de filamentos redujo tanto el asentamiento como la contracción horizontal de las mezclas

Saba et al. (2021), en su artículo “Resistencia y comportamiento a la flexión del hormigón autocompactante incorporado de fibra de acero y humo de sílice”, teniendo como objetivo: Explorar las características frescas y endurecidas de una mezcla de hormigón autocompactante que contiene diferentes cantidades de fibra de acero (0.25%, 0.50%, 0.75% y 1.0%) y que sustituye un 20% de cemento por humo de sílice. Utilizando un enfoque experimental y aplicado, de carácter descriptivo, se obtuvo un resultado acorde con los estándares EFNARC para la especificación y la resistencia a la segregación según la norma

ASTM C 1611. La población de estudio estuvo compuesta por unidades cilíndricas y prismáticas cuya muestra de estudio fue 36 briquetas y 12 viguetas en un total de 48 unidades experimentales. Se realizaron tres pruebas para analizar la manejabilidad del hormigón: el ensayo de flujo de asentamiento T50, la evaluación con caja en forma de L, el embudo en forma de V y la prueba de asentamiento. Al añadir fibras, se redujo la comodidad en la manipulación, sin embargo, se consiguió realzar las propiedades durante el proceso de endurecimiento, como la fuerza. Se ha realizado una comparación entre la integración de diseños compuestos por cuatro láminas de 25mm de espesor y siete variantes de configuraciones de fibras, con el propósito de analizar el impacto en la muestra de prisma. Según la orientación de la fibra de acero, se puede deducir que los diseños en forma de cuadrícula demuestran ser eficaces en prever los efectos que sufrirán. Por lo tanto, se puede concluir que el empleo de fibras de acero y humo de silicio en vez de cemento es una alternativa más económica y duradera.

Según Machaca (2022), en su tesis titulada “Análisis de las propiedades físico-mecánicas del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con adición de filamentos férricos derivados de neumáticos reutilizados, Juliaca – 2022”. El propósito de este estudio de investigación fue analizar el impacto de la incorporación de filamentos de acero procedentes de neumáticos reciclados sobre las características físico-mecánicas del concreto con una capacidad resistente de 210 kg/cm^2 , en Juliaca en el año 2022. Se ha utilizado una metodología de tipo aplicada sustentada en un enfoque explicativo, con un esquema de investigación empírico o cuasi-empírico, y un enfoque cuantitativo. Se utilizó un enfoque experimental en el estudio, donde la población de estudio estuvo conformada por 90 probetas cilíndricas y 15 vigas de concreto elaboradas con diferentes porcentajes de fibras de acero de neumáticos reciclados. La muestra estuvo constituida por las mismas 105 unidades de concreto, ya que se trabajó con la totalidad de la población. Los datos revelan que en comparación con el diseño

estándar, las proporciones aumentaron la resistencia en las características mecánicas, tanto en compresión, tracción y flexión, logrando para P+0.0% (217.2kg/cm², 24.792kg/cm², 33.452kg/cm²), P+0.4% (234.232kg/cm², 26.412kg/cm², 35.652kg/cm²), P+0.8% (254.582kg/cm², 28.082kg/cm², 38.032kg/cm²), P+1.2% (262.862kg/cm², 29.052kg/cm², 39.662kg/cm²) y P+1.6% (215.132kg/cm², 23.262kg/cm², 40.922kg/cm²) respectivamente; en cuanto a las características físicas, se llevaron a cabo pruebas de asentamiento, contenido de aire y PUC, obteniendo P+0.0% (3", 1.5%, 2241.81kg/cm³), P+0.4% (3 ½", 1.6%, 2253.01kg/cm³), P+0.8% (2 ½", 1.8%, Se llevaron a cabo pruebas para verificar la segregación, exudación y permeabilidad, las cuales no se detectaron en el concreto estándar. En los resultados de este estudio se evidencia que a medida que se incrementa la proporción de los materiales, la facilidad de manipulación del hormigón disminuye, al mismo tiempo que aumenta su compacidad y se incrementa ligeramente la presencia de aire. En lo que respecta a las características mecánicas, la incorporación de FANR tiene un impacto favorable en el hormigón al agregar un 1.2% para resistencia a la compresión y tracción, logrando aumentar su resistencia en un 21.00% y 17.18% respectivamente. En cuanto a la flexión, se observó que la mayor resistencia se logra con un 1.6%, incrementando en un 22.33%. Es importante destacar que la resistencia no disminuye en ninguno de los porcentajes de adición mencionados.

Así mismo Aguilar y Dipaz (2021) en su tesis "Influencia de la adición de filamentos férricos reciclados de neumáticos y microsílíce en el concreto destinado a pavimentos rígidos de la av. Javier Pérez de Cuéllar, Ayacucho, 2021", tiene como objetivo: Examinar cómo la inclusión de filamentos de acero recuperados de neumáticos y microsílíce afecta al concreto con resistencia $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$, destinado a pavimentos rígidos. El estudio se fundamentó en un enfoque cuantitativo y de tipo aplicado, con un esquema cuasiexperimental, descriptivo y transversal. Donde la población de estudio estuvo conformada por unidades

prismáticas y cilíndricas cuya muestra de estudio fue de 140 probetas cilíndricas y 70 prismáticas. Al llegar a una conclusión, se llevó a cabo la creación de la composición del hormigón utilizando la técnica del total de los agregados. Para ello, se estableció el conjunto de referencia MDE y luego se añadieron filamentos de acero procedentes de neumáticos reutilizados y microsílíce en distintas proporciones, determinadas en función de la masa del cemento. Se obtuvieron nueve configuraciones de ensayo, los cuales se presentan de la siguiente manera: Se efectuaron pruebas de compresión, tracción y flexión en especímenes cilíndricos y vigas prismáticas correspondientes a las dosificaciones MD1 a MD9 a intervalos de 7, 14 y 28 días. Puede afirmarse que los filamentos de acero reciclado derivados de neumáticos, cortados a una longitud de 60 mm, y la microsílíce, evidenciaron un efecto favorable y significativo en el hormigón. Tras transcurrir 28 días, la resistencia a la compresión del conjunto MD9 alcanzó $f'c = 610.39 \text{ kg/cm}^2$, lo que representó un aumento del 170.66 % respecto al concreto convencional. Asimismo, la resistencia a la tracción de 44.99 kg/cm^2 experimentó un incremento del 144.63 % frente al concreto tradicional, mientras que la resistencia a la flexión $M'r = 68.49 \text{ kg/cm}^2$ se elevó en un 169.38 % en comparación con el material convencional. No obstante, al aumentar la cantidad de estos ingredientes en la combinación, se notó una disminución en la facilidad de manejo. Además, se ha comprobado que, al incrementar la cantidad de acero en la mezcla, se logra aumentar la resistencia a la flexión de las losas, lo que las hace más robustas y menos gruesas.

Berrospi y Inga (2022), en su tesis “Influencia en las Propiedades Físicas y Mecánicas del Concreto la Adición de Fibras Metálicas de Llantas Recicladas”. En este estudio se buscó analizar el impacto que tiene la inclusión de fibras metálicas provenientes de neumáticos reciclados en las características físicas y mecánicas del hormigón. La premisa general que la incorporación de estas fibras metálicas provenientes de neumáticos reciclados genera un efecto positivo en las propiedades físicas y mecánicas del concreto. Se aplicó un

enfoque metodológico científico para desarrollar la investigación, la cual correspondió a un estudio de tipo aplicado, con un nivel explicativo y un diseño empírico. El grupo comunitario se adecuó al material de construcción al incorporar fibra metálica obtenida de neumáticos reutilizados, la población estuvo conformada por el concreto con adición de fibra metálica proveniente de llantas recicladas, obteniéndose un total de 192 especímenes. La muestra correspondió a los mismos 192 especímenes descritos, coincidiendo totalmente con la población debido a que su tamaño es relativamente pequeño. Al obtener un resultado, la tabla previa exhibe las mediciones de la temperatura del concreto convencional y del concreto modificado mediante diferentes proporciones (5 %, 10 % y 15 %) de fibra metálica de llantas recicladas (FMLR). Se destaca que las desviaciones estándar no exceden 0.14 °C, lo que sugiere una proximidad significativa entre los valores obtenidos y el promedio de las muestras. En relación a los valores promedio, se puede notar que varían en comparación con el patrón de concreto, llegando hasta un 0.31 % cuando se añade un 15 % de FMLR. Como conclusión principal, se ha determinado que la inclusión de fibras metálicas de neumáticos reciclados tiene un impacto positivo en las propiedades mecánicas del concreto. A pesar de esto, las características físicas permanecen sin cambios, salvo el asentamiento, la densidad y la exudación, siempre y cuando se mantenga un porcentaje óptimo del 5 %.

Collanqui y Gamarra (2022), en su tesis titulada “Efecto de la incorporación de filamentos férricos reciclados provenientes de residuos de neumáticos en las propiedades físico-mecánicas del concreto con relación $A/C = 0.45$ y en el fisuramiento por contracción plástica en losas en la ciudad de Juliaca – 2022.” El estudio tuvo como objetivo analizar cómo la inclusión de filamentos de acero recuperados de neumáticos influye en las características físico-mecánicas del hormigón con una proporción $A/C = 0.45$, así como en su capacidad de resistencia frente al fisuramiento por contracción plástica en losas. Se utilizó una metodología que se centró en un enfoque numérico, un método de deducción, un nivel

de explicación, un diseño experimental y un estudio práctico donde la población de estudio estuvo compuesta por unidades cilíndricas y prismáticas cuya muestra estuvo constituida por 144 probetas cilíndricas y 36 vigas prismáticas de concreto con adición de fibras de acero reciclado . Se emplearon técnicas para recopilar información a través de la observación y la experimentación, utilizando fichas de observación como herramientas. Los datos de uniformidad revelan que la temperatura del hormigón recién preparado es de 13.8 grados Celsius, con una consistencia de 4 pulgadas y media, un volumen de aire del 4.8 % (alcanzando un 5.3 % con la inclusión de filamento) y una densidad de 2325.0 kg/m³ en el hormigón estándar, la cual se incrementa levemente al añadir fibra. A los 28 días, el hormigón muestra una capacidad a la compresión media de 309.15 kg/cm² con un 1 % de aditivo reductor de agua, una capacidad a la tracción media de 29.94 kg/cm² con un 1.5 % de aditivo reductor de agua y una capacidad frente a flexión media de 42.52 kg/cm² con un 2 % de aditivo reductor de agua. El agrietamiento debido a la contracción plástica reveló 13 grietas en el hormigón normal, 5 grietas con un 0.5 % de Factor de Adición de Refuerzo, y el resto de las muestras no evidencian ningún tipo de fisuras. El estudio demuestra que al incorporar filamentos metálicos reciclados se logra potenciar tanto las características físicas como mecánicas del hormigón en su estado fresco y una vez fraguado, satisfaciendo los parámetros exigidos para obras de pavimentación. Se detectó una mejora sustancial en la capacidad de carga de las losas de pavimento, con aumentos del 38 % en capacidad de carga, 16 % en resistencia a la tracción y 26 % en flexibilidad respecto al hormigón tradicional. Dicha aparición de grietas debido a la contracción plástica es más pronunciada en el hormigón convencional y se reduce a medida que aumenta el contenido de fibras de acero, llegando incluso a desaparecer.

Juárez et al. (2023), en su tesis titulada “Empleo de filamentos metálicos reciclados para optimizar el desempeño estructural del pavimento rígido”. El presente estudio tiene

como objetivo determinar la aplicación de fibras de acero reutilizado para el perfeccionamiento estructural del pavimento rígido. Empleando una estrategia metodológica de tipo aplicada con enfoque experimental y carácter descriptivo cuya población estuvo conformada por el concreto destinado al diseño del pavimento rígido, tanto el concreto patrón como el concreto con adición de fibras de acero reciclado. La muestra estuvo constituida por 24 probetas de concreto, de las cuales 6 correspondieron al concreto sin fibra y 18 al concreto con adición de fibras metálicas recicladas en porcentajes de 2 %, 4 % y 6 %. Los datos del estudio revelan que, al añadir filamentos metálicos de origen reciclado, el hormigón mejoró su capacidad de resistencia ante cargas de compresión. Se observaron incrementos del 9.25 %, 11.38 % y 14.28 % al usar proporciones del 2 %, 4 % y 6 % respectivamente, en comparación con la resistencia de un concreto estándar de 221.43 kg/cm². Al aplicar el método AASHTO 93, se determinó un grosor de losa de 19.00 cm y una sub base de 20.00 cm. Al finalizar, al integrar filamentos de acero reciclado al hormigón, se logra incrementar su capacidad de soportar esfuerzos de compresión, lo cual representa una mejora sustancial en el desempeño estructural del pavimento rígido.

Ramos (2020), en su tesis titulada “Incorporación de limaduras férreas con fines de optimizar la placa de concreto en la av. Díaz Bárcenas - Abancay 2020”, teniendo como propósito identificar o conocer la repercusión de la incorporación de residuos metálicos para mejorar la placa de concreto. Empleando una estrategia aplicada con enfoque experimental, donde la población de estudio estuvo conformada por unidades prismáticas cuya muestra de estudio fue de 45 unidades cilíndricas. Arribando a las conclusiones que los ensayos de capacidad mecánica a compresión y esfuerzo indirecto, teniendo como referencia estándar una dosificación de $f^c=280.5$ kg/cm², ya que en los mencionados resultados no brindaron respuestas óptimas respecto al diseño con áridos de residuo metálico al 10 % llegando a

114.5 kg/cm² y 5 % llegando a 84.2 kg/cm²; es así que estos nuevos diseños no brindan resultados positivos.

3.2 Bases teóricas

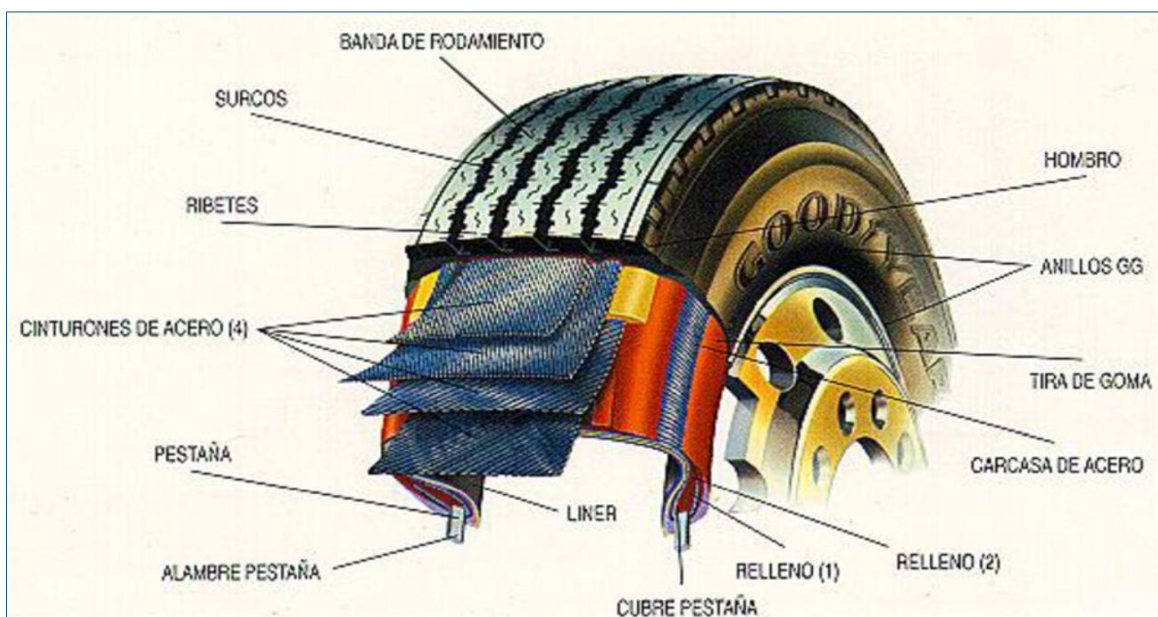
3.2.1. Acero recuperado de neumáticos

El acero recuperado de neumáticos se refiere al conjunto de fibras metálicas que se extraen de los neumáticos fuera de uso (NFU) mediante procesos mecánicos o térmicos de reciclaje. Estas fibras, compuestas principalmente por acero al carbono, son utilizadas como refuerzo en materiales compuestos como el concreto, mejorando sus propiedades mecánicas, en especial la resistencia a la tracción y a la fisuración. (Onuaguluchi, et al., 2017)

El acero recuperado de neumáticos es un material metálico reciclado obtenido a partir de los refuerzos internos de acero presentes en los neumáticos fuera de uso. Este tipo de acero conserva propiedades mecánicas relevantes, como alta resistencia a la tracción y adecuada ductilidad, lo que permite su utilización como refuerzo en materiales cementicios. Su incorporación en el concreto contribuye a mejorar el comportamiento mecánico del material y responde a principios de sostenibilidad, al promover la reutilización de residuos industriales bajo un enfoque de economía circular (Li et al., 2023).

3.2.1.1. Dosificación de acero recuperado de neumáticos

La dosificación del acero recuperado de neumáticos se define como la cantidad controlada de fibras metálicas recicladas incorporadas en una mezcla de concreto, expresada generalmente como porcentaje en volumen o peso. Esta dosificación influye directamente en la trabajabilidad y en las propiedades mecánicas del concreto endurecido. Una proporción adecuada de acero recuperado permite mejorar la resistencia a la tracción y la tenacidad del material sin afectar negativamente su cohesión ni su manejabilidad (Hassan & de Brito, 2021).

Figura 1*Estructura de la llanta o neumático*

Nota. La figura muestra la estructura interna de un neumático radial de Goodyear (2005).

Figura 2*Composición de los neumáticos*

Nota. La figura muestra la composición de neumáticos, Signus (2015).

Figura 3

Fibras de acero proveniente de los neumáticos



Nota. La figura muestra las fibras de acero de las llantas, Según el autor Aiello (2009).

- Propiedades mecánicas de las fibras de acero

En líneas generales, las fibras de acero se dividen en dos categorías: las de tipo industrial, fabricadas para usos específicos, y las recicladas, obtenidas de materiales industriales en desuso que contienen fibras de acero, como las provenientes de neumáticos de vehículos. La estructura de las fibras de acero influye en sus características mecánicas, las cuales pueden diferir de un grupo a otro por razones relacionadas con su forma y composición. Las fibras de acero que se compran y las fibras de acero recicladas pueden variar en su resistencia a la tracción y módulo de elasticidad, dependiendo de la forma y material de las fibras. En el caso de las fibras comerciales que no han sido dobladas repetidamente, la resistencia a la tracción puede llegar a alrededor de 600 MPa. Igualmente, las fibras que han experimentado dobleces ven reducida su resistencia a la tracción conforme aumenta la cantidad de dobleces a los que han sido sometidas (Domski, et al., 2017).

- Reciclaje de acero de neumáticos

El neumático de un automóvil está compuesto por una variedad de materiales, siendo la fibra de acero uno de los elementos más sobresalientes en su estructura. Los componentes de estos materiales se encuentran dispuestos en los límites internos perimetrales de los neumáticos, formando así una circunferencia concéntrica con un diámetro específico. Por eso, el reciclaje de estos neumáticos implica en primer lugar quitar los márgenes internos del neumático. Por lo general, se puede llevar a cabo este proceso empleando una cuchilla. Una vez desaparecen los márgenes internos de los neumáticos, se procede a retirar las fibras que los conforman. Estos neumáticos contienen aproximadamente un 12 a 15 % de acero, convirtiéndolos en un recurso rentable para la fabricación de la fibra reciclada (Collanqui y Gamarra, 2023).

3.2.2. Asentamiento, resistencia a compresión y flexión

3.2.2.1 Asentamiento

El reflujo plástico es una propiedad del hormigón fresco que mide su trabajabilidad, o sea, la sencillez con la que se puede distribuir y comprimir la combinación sin que se separe. La determinación se realiza a través del ensayo de cono de Abrams, además, su medida está afectada por elementos tales como la relación agua/aglutinante, la composición intrínseca del material agregado junto con la presencia de aditivos (Neville, 2012).

La consistencia del concreto es una propiedad del concreto en estado fresco que describe su grado de fluidez, deformabilidad y facilidad de colocación. Esta propiedad se evalúa comúnmente mediante el ensayo de asentamiento (slump), el cual permite clasificar el concreto en función del desplazamiento vertical que experimenta al retirarse el cono de Abrams. Según Abanto, la consistencia del concreto se clasifica en seca, plástica y fluida, en función del rango de asentamiento obtenido, siendo esta clasificación fundamental para

seleccionar el tipo de concreto adecuado según el elemento estructural y el método de colocación (Abanto, 2009).

Consistencia seca (0" a 2")

La consistencia seca corresponde a concretos con asentamientos muy bajos, entre 0 y 2 pulgadas, caracterizados por una escasa fluidez y limitada trabajabilidad. Este tipo de concreto presenta dificultad para su colocación y compactación, requiriendo generalmente equipos de vibración intensa. Se utiliza principalmente en elementos donde se requiere alta estabilidad dimensional y mínima deformación, como pavimentos rígidos o capas de base (Abanto, 2009).

Consistencia plástica (3" a 4")

La consistencia plástica se presenta cuando el concreto registra un asentamiento intermedio, generalmente entre 3 y 4 pulgadas. Este tipo de concreto posee una adecuada trabajabilidad, permitiendo su fácil colocación y compactación sin riesgo significativo de segregación. Por estas características, es la consistencia más empleada en elementos estructurales como vigas, losas y columnas, ya que equilibra fluidez y cohesión interna (Abanto, 2009).

Consistencia fluida (> 5")

La consistencia fluida corresponde a concretos con asentamientos superiores a 5 pulgadas, caracterizados por una elevada fluidez. Este tipo de concreto facilita el llenado de moldes complejos y zonas densamente armadas; sin embargo, un exceso de fluidez puede provocar segregación y exudación si no se controla adecuadamente la dosificación de agua o el uso de aditivos. Su aplicación debe ser cuidadosamente evaluada para no comprometer la resistencia mecánica del concreto endurecido (Abanto, 2009).

3.2.2.2 Resistencia a compresión

La aptitud para soportar cargas de compresión es una característica esencial del concreto una vez que ha endurecido, demostrando su habilidad para soportar presiones verticales sin sufrir daños. Es considerada una estimación directa del rendimiento estructural del hormigón, y se evalúa comúnmente mediante ensayos en cilindros normalizados (ASTM C39)

Falla por cortante diagonal

La falla por cortante diagonal se manifiesta mediante la formación de grietas inclinadas que cruzan el espécimen en forma de “X”, como resultado de la combinación de esfuerzos de compresión axial y tensiones cortantes internas. Este tipo de fractura es característico de concretos que presentan un comportamiento frágil y ocurre cuando las tensiones de corte superan la resistencia interna del material (Neville & Brooks, 2010; ASTM International, 2023).

Falla por cortante simple

La falla por cortante simple se caracteriza por la aparición de una única fisura inclinada dominante, que evidencia un deslizamiento interno del material a lo largo de un plano de debilidad. Este modo de fractura suele asociarse a una distribución no uniforme de tensiones o a deficiencias en la compactación del concreto (Mindess et al., 2014).

Falla por división vertical

La falla por división vertical ocurre cuando el espécimen se separa en dos o más partes mediante grietas longitudinales paralelas al eje de carga. Este tipo de fractura se produce debido a las tensiones de tracción transversal originadas por la expansión lateral del concreto bajo compresión, reflejando la baja resistencia del material frente a esfuerzos tensiles (Neville & Brooks, 2010).

Falla por aplastamiento en los extremos

La falla por aplastamiento en los extremos se presenta cuando el daño se concentra en las superficies de contacto entre el espécimen y las placas de carga de la máquina de ensayo. Este modo de falla es consecuencia de una distribución irregular de esfuerzos o de superficies de apoyo inadecuadas, lo que provoca trituración localizada del concreto antes de la falla global (ASTM International, 2023).

Falla por exfoliación o desprendimiento superficial

La falla por exfoliación se manifiesta por el desprendimiento progresivo de capas superficiales del espécimen sin una fisura principal claramente definida. Este comportamiento indica una deficiente cohesión interna del concreto y suele relacionarse con problemas de curado, segregación o baja calidad de la pasta cementicia (Mindess et al., 2014).

Falla en forma de “Y”

La falla en forma de “Y” se caracteriza por la aparición de fisuras que se bifurcan desde la base del espécimen hacia la parte superior, adoptando una geometría similar a la letra “Y”. Este tipo de fractura refleja la interacción entre esfuerzos de compresión axial y tracción lateral, y evidencia una distribución no homogénea de las tensiones durante el ensayo (Quizzes, 2016; Neville & Brooks, 2010).

Falla por cortante múltiple

La falla por cortante múltiple ocurre cuando se desarrollan varias grietas inclinadas en distintas direcciones de manera simultánea. Este modo de fractura indica una respuesta heterogénea del material ante la carga aplicada y suele observarse en concretos con variabilidad en su composición, presencia de discontinuidades internas o distribución irregular de agregados (Mindess et al., 2014).

3.2.2.3. Resistencia a flexión

La facultad del hormigón para oponerse a tensiones de tracción generadas por cargas de flexión se evalúa mediante la tenacidad a la flexión, también conocida como módulo de quiebre (Neville, 2012).

El ensayo de resistencia a la flexión tiene como finalidad determinar la capacidad del concreto para resistir esfuerzos de tracción indirecta, generados cuando un elemento prismático es sometido a cargas transversales. Durante el ensayo, la probeta se apoya sobre dos soportes inferiores y recibe una carga aplicada mediante uno o dos puntos superiores, produciendo un estado de esfuerzos característico de flexión pura en la zona central del elemento (INVÍAS, 2017).

Bajo la acción de la carga aplicada, el elemento experimenta una distribución no uniforme de tensiones, donde las fibras superiores del concreto se encuentran sometidas a esfuerzos de compresión, mientras que las fibras inferiores experimentan esfuerzos de tracción. Dado que el concreto posee una resistencia limitada a la tracción, la falla se inicia generalmente en la zona inferior del espécimen, donde se concentra la máxima tensión tensil (Neville & Brooks, 2010).

En el sistema mostrado en la figura, la carga se transmite a través de bloques de carga y elementos de contacto metálicos, los cuales aseguran una distribución uniforme de los esfuerzos sobre la superficie de la probeta. La separación entre apoyos, conocida como luz de ensayo (L), y la ubicación de los puntos de carga determinan el diagrama de momentos flectores, generando un momento máximo constante en el tercio central del elemento cuando se aplica el método de carga en dos puntos (ASTM International, 2022).

Durante el incremento progresivo de la carga, el concreto responde inicialmente de manera elástica; sin embargo, al alcanzarse la resistencia última a la tracción, se produce la aparición de fisuras perpendiculares al eje longitudinal del elemento. Estas fisuras se

propagan desde la fibra inferior hacia la superior hasta provocar la falla del espécimen, la cual se manifiesta como una fractura típica por flexión (INVÍAS, 2017).

Por tanto, el ensayo de flexión permite evaluar indirectamente la resistencia a la tracción del concreto, también conocida como módulo de ruptura, parámetro fundamental para el diseño de pavimentos rígidos y elementos sometidos a esfuerzos flectores, donde el comportamiento tensil del concreto resulta determinante para su desempeño estructural (Mindess et al., 2014).

3.2.1 El concreto

De acuerdo con lo estipulado en la normativa NTP E.060 de Estructuras de Concreto, la capacidad a compresión del hormigón, identificada como f'_c . Una resistencia típica en edificaciones es $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$. Especificación: ASTM C94 / NTP 339.074.

Componentes del concreto

El cemento

El cemento Portland se convierte en un elemento hidráulico al mezclarse con agua, creando una mezcla que se solidifica y se vuelve resistente, desarrollando resistencia con el tiempo. **Norma:** ASTM C150 / NTP 334.009, se utilizó cemento tipo I.

Agregados

Se trata de elementos granulados como arena, grava o roca triturada, los cuales representan entre el 60 % y el 75 % del espacio dentro del concreto, aportando solidez y firmeza en sus dimensiones.

Norma: ASTM C33 / NTP 400.037

Agregados fino a arena

Es esencial que las partículas sean de un tamaño inferior a 1/4 de pulgada y que la distribución cumpla con los estándares establecidos en la normativa ASTM C-33-99 (Harmsen, 2002, pág. 12).

Tabla 2*Agregado fino*

Tamiz Estándar	% en peso del material que pasa el tamiz
3/8"	100
#4	95 a 100
#8	80 a 100
#16	50 a 85
#30	25 a 60
#50	10 a 30
#100	2 a 10

Nota. En la tabla se muestran los porcentajes en peso del material que pasa por cada tamiz estándar para el agregado fino, los cuales se encuentran dentro de los rangos establecidos por la Norma Técnica Peruana NTP 400.037, asegurando una granulometría adecuada para su uso en mezclas de concreto.

Agregado grueso o piedra

Al igual que sucede con la arena, la norma ASTM-C-33-99a también fija una serie de requisitos en cuanto a su distribución granulométrica. Estas figuran en la Tabla número 02. El nombre de la piedra se determina según el tamaño más grande de los fragmentos (Harmsen, 2002, pág. 1).

Granulometría

El procedimiento de granulometría resulta esencial la capacidad de identificar la variedad de dimensiones de partículas presentes en un terreno o material. Existen dos métodos principales: por tamizado (para partículas mayores a 75 micras) y hidrometría o sedimentación (para partículas más finas). según normas como ASTM C136 y AASHTO T27:

Distribución del tamaño de partículas en un agregado. Afecta la trabajabilidad, resistencia y durabilidad del concreto. **Norma:** ASTM C136 / NTP 400.012

Figura 4

Porcentaje que pasa por los tamices normalizados

Huso	Tamaño máximo nominal	Porcentaje que pasa por los tamices normalizados													
		100 mm (4 Pulg)	90 mm (3 1/2 Pulg)	75 mm (3 Pulg)	63 mm (2 1/2 Pulg)	50 mm (2 Pulg)	37,5 mm (1 1/2 Pulg)	25,0 mm (1 Pulg)	19,0 mm (3/4 Pulg)	12,5 mm (1/2 Pulg)	9,5 mm (3/8 Pulg)	4,75 mm (N°. 4)	2,36 mm (N°. 8)	1,18 mm (N°. 16)	300um (N°. 50)
1	90 mm a 37,5mm (3 1/2 pulg a 1 1/2 pulg)	100	90 a 100	....	25 a 60	....	0 a 15	....	0 a 5	....	....	....	....	....	....
2	63 mm a 37,5mm (2 1/2 pulg a 1 1/2 pulg)	....	....	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	....	0 a 5	....	....	....	....	....	....
3	50 mm a 25,0 mm (2 pulg a 1 pulg)	....	....	....	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	....	0 a 5	....	....	....	....	....
357	50 mm a 4,75mm (2 pulg a N°. 4)	....	....	....	100	95 a 100	....	35 a 70	....	10 a 30	....	0 a 5	....	....	....
4	37,5 mm a 19,0 mm (1 1/2 pulg a 3/4 pulg)	....	....	....	....	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	....	0 a 5	....	....	....	....
467	37,5 mm a 4,75 mm (1 1/2 pulg a N°. 4)	....	....	....	....	100	95 a 100	....	35 a 70	....	10 a 30	0 a 5	....	....	....
5	25,0 mm a 12,5 mm (1 pulg a 1/2 pulg)	....	....	....	....	....	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	....	....	....	....
56	25,0 mm a 9,5mm (1 pulg a 3/8 pulg)	....	....	....	....	....	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	....	....	....
57	25,0 mm a 4,75mm (1 pulg a N°. 4)	....	....	....	....	....	100	95 a 100	....	25 a 60	....	0 a 10	0 a 5	....	....
6	19,0 mm a 9,5 mm (3/4 pulg 3/8 pulg)	....	....	....	....	....	....	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	....	....	....
67	19,0 mm a 4mm (3/4 pulg a N°. 4)	....	....	....	....	....	....	100	90 a 100	....	20 a 55	0 a 10	0 a 5	....	....
7	12,5 mm a 4,75mm (1/2 pulg a N°. 4)	....	....	....	....	....	....	....	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	....	....
8	9,5 mm a 2,36 mm (3/8 pulg a N°. 8)	....	....	....	....	....	....	....	....	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5	....
89	12,5 mm a 9,5mm (1/2 pulg a 3/8 pulg)	....	....	....	....	....	....	....	....	100	90 a 100	20 a 55	5 a 30	0 a 10	0 a 5
9	4,75 mm a 1,18mm (N°. 4 a N°. 16)	....	....	....	....	....	....	....	....	....	100	85 a 100	10 a 40	0 a 10	0 a 5

Nota. En la figura se muestra el tamaño máximo nominal del agregado y porcentaje que pasa por los tamices normalizados, conforme a los rangos establecidos en la NTP 400.037 – 2018. Los datos presentados permiten identificar la gradación granulométrica del material, asegurando su adecuada distribución de tamaños para cumplir con las especificaciones técnicas exigidas en mezclas de concreto estructural y garantizar su resistencia, trabajabilidad y durabilidad.

A asimismo se exponen lo hallado.

- Artificialmente añadido. Se les conoce como residuos sólidos y rocas metamórficas expandidas que se emplean comúnmente en la elaboración de hormigones livianos, provienen de otras etapas de producción.
- Incorporación de elementos de gran peso. Estos fragmentos metálicos, baritinas, minerales ferrosos y limonitas se emplean en la elaboración de concretos especiales que brindan barreras frente a la radiación X y emisiones gamma, entre otros.

Características

- Peso Unitario.

Se define como la proporción resultante de la distribución del peso de las partículas en relación con el volumen total, considerando también los espacios vacíos. Cuando se añaden los espacios entre las partículas, su disposición influye en ello, convirtiéndolo en un factor relativamente variable. (Pasquel, 1998)

Es la proporción entre la masa de un material y la masa de un volumen equivalente de agua **Norma:** ASTM C29 / NTP 400.017

Formula:

$$\text{Peso Unitario} = \frac{\text{Peso del agregado seco}}{\text{Volumen ocupado}}$$

El peso unitario está influenciado por (Pasquel, 1998):

- Su densidad relativa
- Su distribución granulométrica
- Su morfología y textura superficial
- Su estado higrométrico
- Su nivel de compactación por volumen

- **Peso Específico.**

La densidad relativa de los componentes pétreos, conocida igualmente como densidad aparente. Se define como el cociente entre la masa de las partículas y el volumen, sin considerar los espacios vacíos que puedan existir entre ellas. El rango de valores típicos para áridos estándar va desde 2.5 hasta 2.7 kg/m³. (Pasquel, 1998)

Relación entre la masa de un material y la masa de un volumen igual de agua.

Norma: ASTM C127 / C128 / NTP 400.018

Formula:

$$G_s = \frac{\text{Peso en seco}}{\text{Peso del volumen igual de agua}}$$

- **Absorción**

La capacidad de los agregados para ocupar los espacios vacíos dentro de las partículas se conoce como absorción. La capilaridad provoca este efecto, los poros mencionados nunca se llenan por completo ya que siempre queda atrapado aire. (Pasquel, 1998)

El porcentaje de humedad que un material puede retener en relación a su peso sin humedad.

Norma: ASTM C127 / C128 / NTP 400.018

Formula:

$$\text{Absorción (\%)} = \left(\frac{\text{Peso saturado} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \right) \times 100$$

- **Humedad**

Se define como la cantidad de líquido que queda atrapado en un instante específico por las partículas del material compuesto.

Dado que favorece el aumento del contenido de agua en la mezcla de concreto, esta cualidad cobra relevancia y debe considerarse junto con la capacidad de absorción. Esto

permitirá realizar los ajustes necesarios en las proporciones de las mezclas para garantizar el cumplimiento de las premisas establecidas. (Pasquel, 1998)

Cantidad de agua presente en el agregado al momento de su uso.

Norma: ASTM C566 / NTP 400.019

Fórmula:

$$\text{Humedad (\%)} = \left(\frac{\text{Peso humedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \right) \times 100$$

Agua

Es esencial que el agua utilizada en la combinación esté pura, sin presencia de grasas, sustancias alcalinas, sales ni compuestos orgánicos. En líneas generales. El agua apta es la indicada para mezclar con el cemento. Se encarga principalmente de mantener el cemento con la humedad necesaria. Sin embargo, su aplicación también se extiende para potenciar la manejabilidad de la combinación. (Harmsen, 2002)

Esencial para mantener la humedad del cemento y facilitar la manipulación del hormigón. Tiene que ser apto para el consumo o satisfacer requisitos particulares.

Norma: ASTM C1602 / NTP 339.127

Es factible utilizar agua no apta para el consumo en la creación de hormigón, siempre y cuando se compruebe su adecuación. Con este propósito, se crearán bloques de cemento hechos con esta sustancia y se someterán a pruebas siguiendo la especificación ASTM-C-109/109M-99. En caso de que las resistencias logradas a los 7 y 28 días alcancen al menos el 90% de las previstas en mezclas similares hechas con agua potable, el fluido es considerado adecuado según el ACI-3.4.3. Es recomendable comprobar también que no incluya elementos que puedan generar una reacción desfavorable con el material de refuerzo. (Harmsen, 2002)

Propiedades del concreto

- Concreto fresco.

- Trabajabilidad

La trabajabilidad se describe como la sencillez con la que se pueden combinar ciertos materiales para crear el hormigón, y posteriormente este puede ser manejado, movido y puesto en su lugar con la menor dificultad y la mayor uniformidad posible, según las circunstancias de la construcción (Rivva, 2000).

La destreza con la que se puede manipular una combinación de concreto, desde su mezcla hasta su colocación, compactación y acabado, sin que se produzca separación.

Norma: ASTM C143

- Segregación

La segregación se produce al descomponerse mecánicamente el concreto fresco en sus componentes individuales, cuando el material pétreo grueso tiende a separarse de la pasta (Rivva, 2000).

Si se tiene en cuenta que el hormigón es una combinación de distintos tamaños y densidades de materiales, se pueden observar fuerzas internas que tienden a separar los componentes antes de que la mezcla se haya solidificado. La consecuencia de la interacción de estas fuerzas se caracteriza por su separación (Rivva, 2000).

En ciertas circunstancias, las partículas de mayor tamaño tienden a separarse del mortero, ya sea por su capacidad de desplazarse con mayor rapidez o por su tendencia a sedimentar más velozmente que las partículas más pequeñas (Rivva, 2000).

La utilización de un tipo de material grueso con una densidad diferente al material fino puede ser un factor que contribuye a la separación. Otra opción sería utilizar un agregado de gran tamaño que sea proporcional a las dimensiones del componente estructural (Rivva, 2000).

Los hormigones de alta densidad, elaborados con áridos gruesos de alta masa, pueden llegar a tener una densidad en torno a los $4,500 \text{ kg/m}^3$. En estas situaciones específicas, la posibilidad de separación es más elevada (Rivva, 2000).

- Exudación

La exudación se describe como el movimiento hacia arriba de una porción del agua en la combinación hasta llegar a la superficie, comúnmente causado por la acumulación de los materiales sólidos. Una vez el hormigón ha sido vertido y compactado en los moldes, comienza el procedimiento y se extiende hasta el inicio del fraguado de la mezcla, logrando la mayor densificación de los componentes sólidos o la cohesión entre partículas (Rivva, 2000).

La separación del compuesto cementante se ve influida por las proporciones de la dosificación y las características de los componentes, contenido de aire, tipo de aditivos, y, en particular, por la forma y tamaño de las fracciones del árido fino. (Rivva, 2000) Ante una excesiva exudación, es fundamental considerar la textura y forma de los materiales finos utilizados (Rivva, 2000).

Fenómeno en el que el agua libre de una mezcla de concreto sube a la superficie, indicando exceso de agua o mezcla mal proporcionada. **Norma:** ASTM C232

- Concreto endurecido

- Resistencia

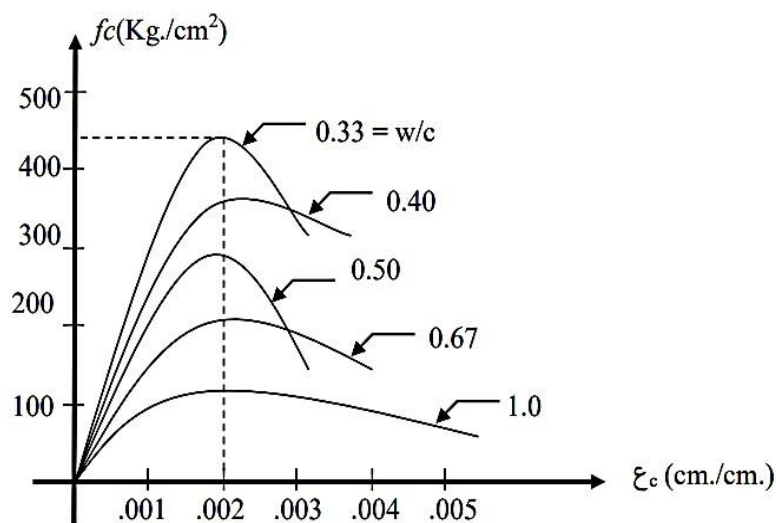
Amado (2019), El hormigón se emplea principalmente en situaciones de compresión, por lo que resulta crucial analizar la conexión entre la fuerza aplicada y la deformación unitaria. Esta cualidad se determina mediante pruebas de laboratorio utilizando muestras cilíndricas estándar de 6 pulgadas (15 cm) de diámetro y 12 pulgadas (30 cm) de altura. Es necesario dejar el ejemplar en el molde durante un día completo después de verterlo y luego proceder a su curación sumergiéndolo en agua hasta el momento de la prueba. Para realizar

el análisis en la prensa hidráulica, es necesario que la muestra haya alcanzado una edad de 28 días de fraguado según el protocolo establecido. La resistencia a compresión (f_c) se determina como el promedio de la capacidad resistente de al menos dos muestras provenientes del mismo lote, evaluadas después de 28 días. La relación entre agua y ligante es el factor clave en la capacidad estructural del concreto, y se calcula como el cociente entre el volumen de agua y la masa de cemento incorporados en la mezcla. Al disminuir la proporción de agua, la permeabilidad se ve reducida, lo que resulta en un hormigón compacto, de excelente calidad y resistencia superior. El vínculo debe superar el umbral de 0.25, ya que es la cantidad mínima de líquido requerida para que el cemento se hidrate por completo. A medida que la proporción agua/ligante se incrementa, la capacidad resistente del concreto se ve reducida. En la imagen se aprecia el efecto de la interacción entre el agua y el cemento.

La fortaleza estructural del concreto, una vez ha fraguado, resiste fuerzas sin sufrir daños. La resistencia a compresión es la más frecuente. **Norma:** ASTM C39 / NTP 339.034

Figura 5

Efecto de relación agua – Cemento



Nota. La figura muestra el efecto de la relación agua–cemento sobre la resistencia del concreto, según la norma ASTM C39 y lo señalado por Uribe. Se observa que al aumentar la relación agua–cemento, disminuye la resistencia mecánica, evidenciando la importancia de un control adecuado en el diseño de mezclas.3.2.2. Acero reciclado

Las hebras de acero reutilizadas son diminutos hilos presentes en distintos componentes de la manufactura industrial, como en los aros o ruedas de vehículos. Estos artículos altamente solicitados a nivel global incluyen una cantidad significativa de fibras de acero que pueden ser extraídas y utilizadas en la fabricación de otros productos. El porcentaje del peso total de los neumáticos de vehículos de carga de pasajeros varía entre un 14% y un 15%, lo cual representa una valiosa fuente para producir fibras de acero, según Siddique y Naik en 2017. Además, es importante destacar que los camiones utilizan neumáticos que contienen aproximadamente un 25% de acero en relación al peso total de la rueda. (Pilakoutas et al., 2023)

Acero reutilizado, como el recuperado de neumáticos fuera de uso o desechos industriales, empleado como refuerzo en concreto para reducir impacto ambiental y costos.

Norma relacionada: No existe una norma ASTM específica, pero puede evaluarse bajo ASTM A615 (acero para refuerzo).

3.3 Definición de términos

- **Peso Unitario.** Constituye una característica física del concreto; se define como la proporción entre la masa del hormigón recién densificado y la capacidad volumétrica del contenedor (Camargo e Higuera, 2017).
- **Peso Específico.** Se trata de comparar la cantidad de materia o peso en el aire de una medida de volumen de un material con el peso de la misma cantidad de agua, dependiendo del tipo de material (Neville et al., 2010).
- **Resistencia a la Comprensión**

La resistencia del hormigón es una característica mecánica que refleja la excelencia de este componente. Se refiere a la habilidad de un material para resistir una fuerza por cada unidad de superficie en un área específica (Mindess et al., 2003).

- **Resistencia a la Flexión.** La capacidad flexional evalúa la resistencia a tracción indirecta del concreto, correspondiente al punto de fractura de las vigas no armadas (Pillaca, 2019).
- **Análisis Granulométrico.** Consiste en la evaluación y calibración de los granos presentes en una capa de sedimento, en los componentes sedimentarios y en los terrenos, con el propósito de examinar su procedencia y características físicas, además de determinar la cantidad de cada tamaño establecido en una escala de granulometría (Zhang et al., 2020).
- **Agregado grueso.** Se trata de la fracción que queda atrapada en la malla número cuatro. Está conformado por rocas de granito y diorita. También es posible dividirlo en piedra triturada y arena (Luo et al., 2020).
- **Agregado fino.** Es aquel que deriva de la fragmentación natural o artificial y que atraviesa el tamiz N.º 4, es decir, un tamiz con aberturas cuadradas pequeñas. El más común es la arena, producto de la trituración de rocas (Wang et al., 2021).
- **Asentamiento.** El procedimiento más habitual utilizado para examinar la cohesión del concreto, aunque no abarque todos los elementos que inciden en su trabajabilidad, se usa de manera efectiva como una prueba de campo bajo supervisión, ya que proporciona información sobre la homogeneidad de la mezcla (Kumar et al., 2020).
- **Cemento.** El concreto es un compuesto de origen mineral, producido con tecnología avanzada, que se utiliza para ligar de manera sólida distintos elementos de construcción, posibilitando la creación de estructuras fuertes y perdurables. Se muestra como una sustancia en polvo. Al mezclar con agua, se convierte en una masa

maleable que se endurece tanto al secarse al aire como al sumergirse en agua (Scrivener et al., 2019).

- **Concreto.** La combinación de cemento, materiales, líquido y sustancias adicionales, al principio muestra una forma maleable y adaptable, para luego adquirir una firmeza sólida con características aislantes y duraderas (Lee et al., 2020).
- **Curado de concreto.** El procedimiento implica supervisar el entorno (especialmente la temperatura y la humedad) mientras el concreto o mortero fragua y/o se endurece (Zhang et al., 2022).
- **Fraguado:** El desarrollo de una combinación de concreto o mortero con agua como componentes esenciales de un hormigón, desencadena un proceso calorífico de fraguado gradual de la mezcla, con el fin de lograr de manera progresiva la resistencia deseada (Zhang et al., 2021).
- **Fibras de acero.** Las fibras de diferentes tamaños, secciones, rugosidad superficial y formas. Pueden ser trefiladas en frío, cortadas o maquinadas. Normalmente tienen deformaciones a lo largo de la fibra o en sus extremos. Esta última modalidad es más eficaz para aumentar la adherencia en el concreto. Para comparar una fibra con otra se utilizan tres conceptos: relación de esbeltez, anclaje y resistencia a la tracción del alambre. Una forma fácil de comparar el desempeño de dos fibras es revisando la relación de esbeltez longitud/diámetro (Muñoz, 2018).
- **Reciclaje.** Se trata de crear un nuevo material o producto a partir de productos y materiales que ya no se utilizan, utilizando un proceso físico-químico o mecánico. De este modo, logramos extender la duración de un artículo, reduciendo el uso de recursos y contribuyendo al entorno al producir menos desechos (Behera et al., 2020).

- **Resistencia.** La característica del hormigón que suele generar inquietud es su propiedad creativa. Normalmente, se establece según la resistencia final que presente una muestra al ser sometida a compresión. Dado que el hormigón tiende a fortalecerse con el tiempo, la resistencia a la compresión a los 28 días se convierte en el parámetro más extendido para evaluar esta característica (Wu et al., 2020).
- **Trabajabilidad.** Resulta ser una característica fundamental en numerosos usos del hormigón. Básicamente, se trata de lo sencillo que es combinar los componentes y cómo la mezcla final se puede manipular, transportar y aplicar sin perder su uniformidad (Chen et al., 2021).
- **Gravedad específica.** La gravedad específica es la razón entre la masa de un volumen determinado de una sustancia y la masa de un volumen equivalente de agua a una temperatura estándar (generalmente 4 °C). En ingeniería civil, se utiliza para establecer la densidad relativa de los componentes, tales como suelos, agregados o cemento, y es esencial en el cálculo de proporciones para dosificaciones de hormigón (Mindess et al. 2016).
- **Contenido de humedad.** El grado de humedad es la cantidad de agua contenida en un material, indicada como un porcentaje respecto a la masa seca del mismo. Este parámetro es clave para caracterizar suelos, agregados y mezclas frescas de hormigón, dado que impacta directamente en su trabajabilidad y capacidad resistente (Das y Sobhan, 2018).
- **Temperatura.** La temperatura es una medida de la energía cinética promedio de las moléculas en un cuerpo o sistema. En el ámbito de los materiales de construcción, la temperatura afecta el proceso de hidratación del aglomerante, el fraguado del concreto y la resistencia final alcanzada (Neville, 2011).

IV. Metodología

4.1 Tipo y nivel de investigación

Tipo

Es una investigación aplicada por que fue basado en función de los conocimientos científicos y teorías solucionando problemas prácticos. Por ello la presente tesis es aplicada (Hernández Sampieri et al., 2022, p. 45).

Nivel

Explicativo: Se trata de conceptos científicos que conectan ideas y explican los sucesos ocasionales. Al centrarse en la explicación de la conexión entre dos o más variables, es importante hacer referencia a lo expuesto por Sabino (2014, p. 102). El informe se enfoca en la explicación de cómo la adición de acero reciclado de neumáticos desechados impacta en las propiedades del concreto, específicamente en su comportamiento durante el asentamiento y su resistencia a esfuerzos de flexo-compresión en concretos con una resistencia de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$.

4.2 Ámbito temporal y espacial

4.2.1. Temporal

- El tiempo de la ejecución del informe de tesis se realizó en el año 2023 - 2024 con una duración de 5 meses.

4.2.2 Espacial

- La presente tesis se elaboró en la ciudad de Abancay 2023 – 2024.

4.3 Población y muestra

4.3.1. Población

Sampieri, (2018) menciona “Una población es el conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones” (p. 198), La población para esta investigación es el concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

4.3.2. Muestra

(Bunge, 2000); menciona “La muestra no probabilística, denominadas muestras dirigidas, suponen un procedimiento de selección orientada a las características y contexto de la investigación

La muestra de estudio es de 72 especímenes.

- Para 7 días

Resistencia a la Comprensión de probetas 30cmx15cm

- T1: patrón: 3 especímenes
- T2: 4%: 3 especímenes
- T3: 6%: 3 especímenes
- T4: 8%: 3 especímenes

Resistencia a la flexión de vigas 15cmx15cmx55cm

- T1: patrón: 3 especímenes
- T2: 4%: 3 especímenes
- T3: 6%: 3 especímenes
- T4: 8%: 3 especímenes

TOTAL 24 especímenes

- Para 14 días

Resistencia a la Comprensión de probetas 30cmx15cm

- T1: patrón: 3 especímenes
- T2: 4%: 3 especímenes
- T3: 6%: 3 especímenes
- T4: 8%: 3 especímenes

Resistencia a la flexión de vigas 15cmx15cmx55cm

- T1: patrón: 3 especímenes

- T2: 4%: 3 especímenes

- T3: 6%: 3 especímenes

- T4: 8%: 3 especímenes

TOTAL 24 especímenes

- Para 28 días

Resistencia a la Comprensión de probetas 30cmx15cm

- T1: patrón:3 especímenes

- T2: 4%: 3 especímenes

- T3:6%: 3 especímenes

- T4: 8%: 3 especímenes

Resistencia a la flexión de vigas 15cmx15cmx55cm

- T1: patrón:3 especímenes

- T2: 4%: 3 especímenes

- T3: 6%: 3 especímenes

- T4: 8%: 3 especímenes

TOTAL 72 especímenes

Tomando un total de muestreo por conveniencia de 72 especímenes.

4.4 Instrumentos

En la presente tesis se emplearon métodos como la evaluación de la consolidación del hormigón (según la Norma Técnica Peruana 339.035) y la fractura de muestras en compresión axial de hormigón NTP339.034/ASTM C39M), así como la prueba de resistencia a la flexión de vigas de hormigón con cargas distribuidas en tercios del tramo NTP339.078/ASTM C78/AASHTO T 97.

Instrumentos de recolección de datos

- El instrumento para la ejecución de la investigación “Ficha de laboratorio”.

4.5 Procedimiento

- La etapa de análisis del informe de tesis implica la evaluación de una variable que está sujeta a cambios, respaldada por un experimento y utilizando el programa Excel como herramienta (Sampieri, 2018, p. 353). En este estudio se utilizó la técnica de pruebas de fractura de muestras de concreto bajo carga axial (NTP 339.034/ASTM C39M) y pruebas de resistencia a la flexión del concreto con cargas distribuidas en tercios del claro (NTP 339.078/ASTM C78). A continuación, se describen los ensayos llevados a cabo para obtener los resultados correspondientes: Ensayos de resistencia estructural bajo cargas de compresión y flexión.

Para esta investigación se tuvo en cuenta la hipótesis nula y alterna se utilizó la distribución t de Student para comparar dos promedios de muestras, ya que no se sabe si la adición de acero recuperado de neumáticos reciclados tiene un impacto beneficioso o perjudicial.

4.6. Análisis de datos

Con respecto al procesamiento de los datos recopilados en el desarrollo experimental, se aplicó un enfoque cuantitativo, dado que se buscó medir de manera objetiva las consecuencias de la incorporación de acero recuperado de neumáticos sobre tres características clave del hormigón: resistencia a compresión y resistencia en flexión. Las probetas de hormigón se confeccionaron bajo una dosificación base de $f'c = 210$ kg/cm², y se prepararon con distintos niveles de adición de acero recuperado: 0% (grupo control), 4%, 6% y 8% del volumen total de la mezcla.

En primer lugar, la capacidad a compresión fue determinada a los 7, 14 y 28 días mediante ensayos en cilindros de hormigón, conforme a la norma ASTM C39/C39M.

Los resultados obtenidos fueron registrados en megapascales (MPa) y se organizó la información en tablas y gráficos comparativos. Se aplicó una prueba de análisis de varianza (ANOVA) de un factor para determinar si existen discrepancias entre los grupos con diferentes proporciones de acero eran estadísticamente significativas ($p < 0.05$). Además, se calcularon intervalos de confianza del 95% para los valores medios de capacidad resistente.

En cuanto a la resistencia en flexión, se emplearon vigas prismáticas sometidas al ensayo de flexión conforme a la norma ASTM C78/C78M. Se analizaron los resultados utilizando estadística descriptiva, y posteriormente se aplicaron pruebas t para comparar los grupos experimentales con el grupo control. Este análisis permitió determinar si la adición de acero de neumáticos contribuía de forma significativa a mejorar la aptitud estructural del hormigón ante solicitaciones de tracción indirecta.

Adicionalmente, se aplicaron correlaciones bivariadas de Pearson para explorar relaciones lineales entre el porcentaje de acero y los valores de resistencia a compresión y flexión. Se identificaron patrones de mejora o deterioro según la dosis empleada, permitiendo establecer cuál fue la proporción óptima de adición de acero reutilizado, que aportó mejores resultados sin afectar la docilidad ni la cohesión interna del hormigón.

Finalmente, todos los resultados fueron representados en gráficos de barras y de líneas para facilitar la interpretación visual de los efectos del acero reciclado sobre cada una de las propiedades evaluadas. Esta etapa del análisis permitió no solo validar las hipótesis planteadas, sino también ofrecer recomendaciones prácticas para la dosificación adecuada de fibras de acero recuperadas de neumáticos en concretos de resistencia media.

4.7.Consideraciones éticas

En nuestra ética de investigación el principal objetivo es velar por la integridad y el bienestar de los investigadores, a fin de proteger y no vulnerar su derecho de autor de este estudio.

V. Resultados y discusión

5.1 Resultados

Tabla 3

Granulometría de agregado grueso

Análisis granulométrico por lavado y tamizado									
Muestra inicial	2100.0 gr	Muestra lavada y secada			2079.5	Peso Recipiente	0.0 gr	HUSO	6
tamiz	tamiz	peso ret.	peso corr.	%ret.	%retenido acumulado	%pasa	límite inferior	límite superior	
(Pulg.)	(mm)	(gr.)	(gr.)						
2	50.000	0	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	100%	100%	
1 1/2	37.500	0.0	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	100%	100%	
1	25.000	0.0	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	100%	100%	
3/4	19.000	107.3	107.30	5.11%	5.11%	94.89%	90%	100%	
1/2	12.500	970.2	970.21	46.20%	51.31%	48.69%	20%	55%	
3/8	9.500	935.3	935.30	44.54%	95.85%	4.15%	0%	15%	
Nº 4	4.750	44.2	44.20	2.10%	97.95%	2.05%	0%	5%	
Nº 8	2.360	22.5	22.45	1.07%	99.02%	0.98%			
Nº 16	1.180	0.0	0.00	0.00%	99.02%	0.98%			
Nº 50	0.300	0.0	0.00	0.00%	99.02%	0.98%			
Nº200	0.075	0.0	0.00	0.00%	99.02%	0.98%			
Fondo		0.0	20.54	0.98%	100.00%				
TOTAL		2079.5	2100.0	100%					
Módulo de Fineza			6.94						
=									

Nota. En la tabla se presenta la granulometría del agregado grueso obtenida mediante ensayo de lavado y tamizado, procedimiento que permite determinar la distribución de tamaños de partículas y verificar su conformidad con las especificaciones técnicas.

El análisis granulométrico por lavado y tamizado de una muestra de agregado grueso con masa inicial de 2100 gramos fue ejecutado con el objetivo de determinar la distribución de los tamaños de partícula, evaluando su conformidad con el Huso Nº 6, según los rangos establecidos por normas técnicas.

Los resultados obtenidos muestran que la fracción predominante del material se retuvo en los tamices de mayor apertura. El tamiz de 3/8" (9.5 mm) retuvo 44.54% del total

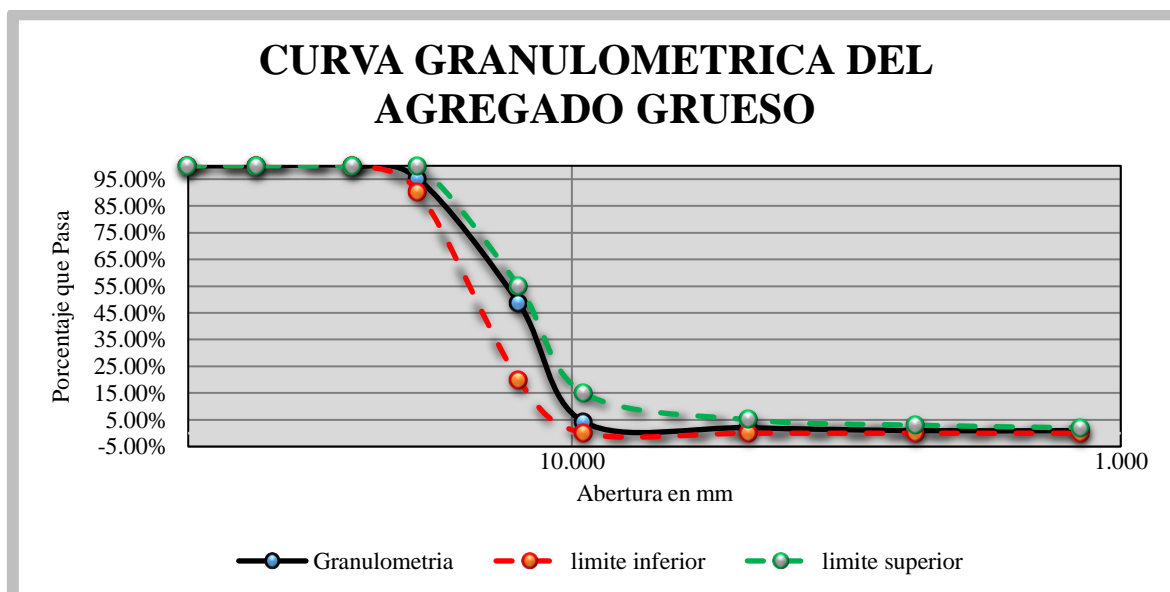
de la muestra, seguido por el tamiz 1/2" (12.5 mm) con un 46.20%, sumando entre ambos más del 90% del total retenido. Esta concentración indica que el agregado posee una granulometría relativamente uniforme, con predominancia de partículas de tamaño medio a grueso, lo cual es adecuado para concretos estructurales con diseño $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

La proporción de material fino retenido en los tamices N.º 4 (4.75 mm), N.º 8 (2.36 mm) y N.º 16 (1.18 mm) es muy baja, con valores que no superan el 2%. Esto confirma que se trata de un agregado grueso bien graduado, sin una presencia significativa de partículas finas, lo cual es beneficioso para evitar exceso de pasta en la mezcla y asegurar una adecuada adherencia con la matriz cementante.

En cuanto al porcentaje que pasa por cada tamiz, se observa que todos los valores se encuentran dentro de los límites establecidos por el Huso 6, garantizando así la aceptabilidad del agregado para su uso en concreto estructural. Esta conformidad normativa es crucial para asegurar una correcta distribución granulométrica que favorezca el empaquetamiento, reduzca vacíos y mejore la resistencia mecánica del concreto.

Un punto que merece atención es el módulo de fineza (MF) obtenido, que fue de 6.94, valor típico en agregados gruesos. Este resultado refleja una granulometría densa y con predominancia de partículas grandes, lo cual es favorable para concretos que requieran una alta capacidad de carga y menor retracción, siempre que se complemente con un adecuado agregado fino que llene los vacíos intergranulares.

En resumen, el análisis granulométrico del agregado grueso revela que el material cumple satisfactoriamente con los parámetros establecidos por el Huso N.º 6. La distribución de partículas es adecuada para su uso en estructuras de concreto, aportando beneficios en la resistencia, estabilidad y durabilidad del producto final. No obstante, se recomienda evaluar en conjunto con el agregado fino para verificar la compatibilidad en términos de trabajabilidad y cohesión de la mezcla total.

Figura 6*Análisis granulométrico grueso*

Nota. La figura muestra la curva granulométrica del agregado grueso, la cual representa la distribución porcentual de las partículas según su tamaño, permitiendo evaluar su uniformidad y adecuación a los límites establecidos por la norma.

Tabla 4*Análisis granulométrico del agregado fino*

análisis granulométrico por lavado y tamizado									
Muestra inicial	945.2 gr	Muestra lavada y secada			919.4	Peso Recipiente	0.0 gr	GRADACIÓN	
tamiz (Pulg.)	tamiz (mm)	peso ret. (gr.)	peso corr. (gr.)	%ret.	%retenido acumulado	%pasa	límite inferior	límite superior	
3/8"	9.500	0.0	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	100%	100%	
Nº 4	4.750	72.3	72.30	7.65%	7.65%	92.35%	95%	100%	
Nº 8	2.360	103.6	103.60	10.96%	18.61%	81.39%	80%	100%	
Nº 16	1.180	182.2	182.20	19.28%	37.89%	62.11%	50%	85%	
Nº 30	0.600	223.1	223.10	23.60%	61.49%	38.51%	25%	60%	
Nº 50	0.300	170.2	170.20	18.01%	79.50%	20.50%	5%	30%	
Nº 100	0.150	95.2	95.20	10.07%	89.57%	10.43%	0%	10%	
Nº 200	0.075	60.3	60.32	6.38%	95.95%	4.05%			
Fondo		12.5	38.28	4.05%	100.00%				
TOTAL		919.4	945.2	100%					
Módulo de Fineza		=	2.95						

Nota. En la tabla se presenta el análisis granulométrico del agregado fino, obtenido mediante el tamizado del material seco, con el propósito de determinar la distribución de tamaños de partículas y verificar su cumplimiento con los límites normativos establecidos.

El análisis granulométrico del agregado fino se realizó sobre una muestra inicial de 945.2 gramos, la cual, una vez lavada y secada, presentó un peso final de 919.4 gramos. El objetivo principal fue evaluar la distribución de tamaños de las partículas para determinar su grado de gradación y verificar su conformidad con los límites establecidos para agregados finos, conforme a normativas.

Los resultados obtenidos revelan una distribución adecuada de los tamaños de partículas, observándose que los mayores porcentajes de retención se concentran en los tamices N.º 8 (2.36 mm), N.º 16 (1.18 mm) y N.º 30 (0.60 mm), con 18.61%, 22.70% y 24.30% respectivamente. Esto indica que el material está constituido mayoritariamente por partículas medianas a finas, características deseables para mejorar la trabajabilidad y cohesión en mezclas de concreto.

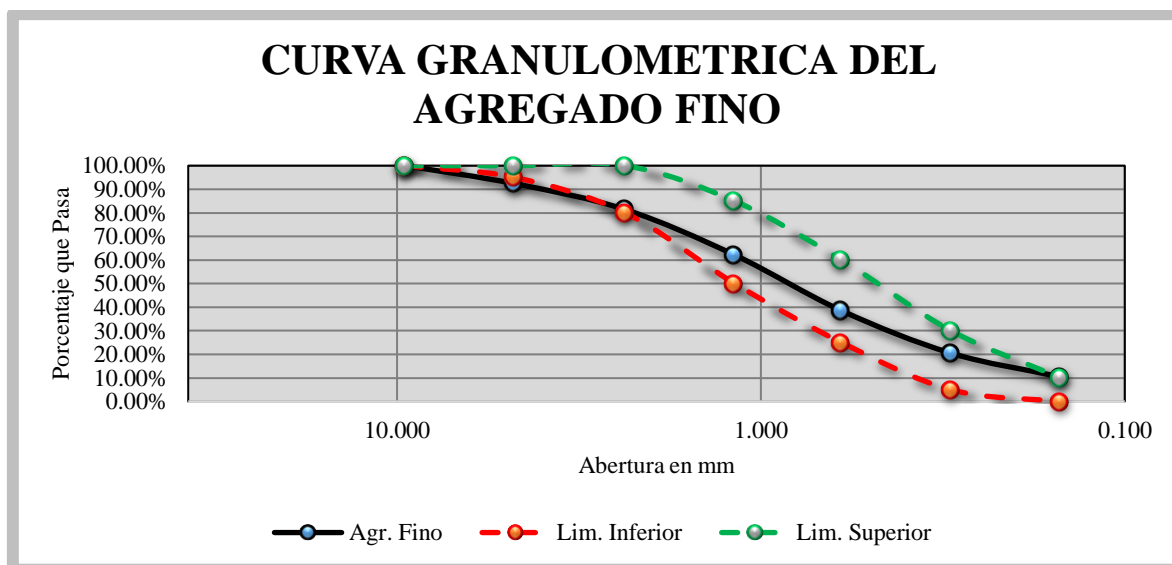
El análisis del porcentaje que atraviesa cada tamiz indica que la distribución granulométrica de este agregado se encuentra conforme a los rangos normativos para una gradación aceptable. Por ejemplo, el 92.35% del material cruza el tamiz N.º 4 (4.75 mm), y el 81.39% pasa por el tamiz N.º 8 (2.36 mm), cumpliendo con los límites normativos (95–100% y 80–100%, respectivamente). Asimismo, el 60.45% atraviesa el tamiz N.º 50 (0.30 mm), ubicándose dentro del intervalo recomendado (10–30%) para evitar exceso de finos que puedan comprometer la mezcla.

El porcentaje de fracción que cruza el tamiz N.º 200 (0.075 mm) es de 4.05%, valor que se encuentra dentro del límite superior del 5%, lo que indica una baja presencia de partículas extremadamente finas como arcillas o limos, evitando así problemas de exudación o retracción excesiva en el hormigón.

El índice de fineza (MF) calculado fue de 2.95, lo que representa un valor típico para un árido fino correctamente graduado. Según la práctica constructiva, los valores óptimos de módulo de fineza para agregados finos se sitúan entre 2

Figura 7

Análisis granulométrico fino



Nota. La figura muestra la curva granulométrica del agregado fino, que representa la distribución porcentual de las partículas según su tamaño, permitiendo evaluar su gradación y cumplimiento con los rangos establecidos por la norma.

Tabla 5

Peso unitario suelto y vacíos del agregado grueso

Peso unitario suelto y vacíos del agregado grueso		
Datos del ensayo	Muestra 01	Muestra 02
Peso del Molde (gr)	3430	3430
Peso del Molde + Muestra Suelta (gr)	13105.0	13100.0
Peso de la Muestra Suelta (gr)	9675	9670
Volumen del Molde (cm ³)	6955.00	6955.00
Peso Unitario Suelto (gr/cm ³)	1.391	1.390
Peso Específico (kg/m ³)	2665.947	2665.947
Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	1391.086	1390.367
Porcentaje de Vacíos	47.82%	47.85%
Peso Unitario Suelto (kg/m³)	1390.726	
Porcentaje de Vacíos	47.83%	

Nota. En la tabla se presenta el peso unitario suelto y el porcentaje de vacíos del agregado grueso, parámetros que permiten evaluar la compactación y densidad aparente del material, factores importantes para el diseño y control de mezclas de concreto.

La prueba de densidad aparente suelta y vacíos del árido grueso se realizó con el propósito de determinar la masa volumétrica del material en estado suelto, así como su porcentaje de vacíos, propiedades fundamentales para la formulación de dosificaciones de hormigón. Se emplearon dos muestras representativas del agregado grueso, utilizando un molde con un volumen de 6955 cm³.

En ambas muestras se obtuvo un peso de muestra suelta muy similar: 9675 g para la muestra 01 y 9670 g para la muestra 02, lo que demuestra homogeneidad en la composición del material evaluado. A partir de estos valores, se calcularon los pesos unitarios sueltos, resultando en 1391.086 kg/m³ para la muestra 01 y 1390.367 kg/m³ para la muestra 02. El valor promedio obtenido fue de 1390.726 kg/m³, lo cual representa una densidad típica para agregados gruesos con forma angular o de textura rugosa.

El peso específico del agregado, asumido para ambos casos, fue de 2665.947 kg/m³, un valor coherente con agregados pétreos naturales como la grava triturada. A partir de la comparación entre el peso específico y el peso unitario suelto, se determinó el porcentaje de vacíos, que fue de 47.82% y 47.85% para las muestras 01 y 02, respectivamente, con un valor promedio de 47.83%.

Este elevado porcentaje de vacíos indica que el agregado presenta una forma irregular y posiblemente una baja trabajabilidad si no se combina con una adecuada proporción de agregado fino. En consecuencia, durante el diseño de mezcla de concreto, será necesario considerar este valor para calcular con precisión la cantidad de pasta de cemento requerida para llenar dichos vacíos y asegurar una mezcla densa, cohesiva y resistente.

Tabla 6*Peso unitario varillado y vacíos del agregado grueso*

Peso unitario varillado y vacíos del agregado grueso		
Datos del ensayo	Muestra 01	Muestra 02
Número de Capas	3	3
Número de Golpes	25	25
Peso del Molde (gr)	3430	3430
Peso del Molde + Muestra Varillada (gr)	13955.0	13949.0
Peso de la Muestra Varillada (gr)	10525	10519
Volumen del Molde (cm ³)	6955.00	6955.00
Peso Unitario Varillado (gr/cm ³)	1.513	1.512
Peso Específico (kg/m ³)	2665.947	2665.947
Peso Unitario Varillado (kg/m ³)	1513.30	1512.44
Porcentaje de Vacíos	43.24%	43.27%
Peso Unitario compactado (kg/m³)	1512.87	
Porcentaje de Vacíos	43.25%	

Nota. En la tabla se presenta el peso unitario varillado y el porcentaje de vacíos del agregado grueso correspondiente a las tres muestras evaluadas, resultados que permiten comparar su densidad aparente y grado de compactación para el diseño óptimo de mezclas de concreto. El presente ensayo tuvo como objetivo determinar el peso unitario varillado (compactado) del agregado grueso, así como el porcentaje de vacíos, mediante la aplicación de una técnica de compactación estándar con varillado. Este procedimiento permite conocer la densidad máxima alcanzable del agregado en estado seco, lo cual es esencial para el diseño de mezclas de concreto con una relación adecuada entre componentes y para minimizar la presencia de vacíos que puedan comprometer la resistencia o durabilidad del concreto.

Para ambas muestras evaluadas, se utilizaron moldes con un volumen de 6955 cm³ y se aplicaron 3 capas de agregado con 25 golpes por capa, siguiendo los criterios establecidos en normas técnicas como la ASTM C29. El peso de la muestra varillada fue de 10,525 g para la muestra 01 y 10,519 g para la muestra 02. Estos valores permitieron calcular los pesos unitarios varillados de 1513.30 kg/m³ y 1512.44 kg/m³, respectivamente, obteniéndose un promedio general de 1512.87 kg/m³.

El incremento del peso unitario respecto al estado suelto (anterior ensayo) evidencia el efecto de la compactación mediante varillado, con un aumento aproximado del 8.8% en la densidad aparente. Este comportamiento es característico de agregados con buena angularidad y textura superficial rugosa, que responden adecuadamente a la compactación mecánica, favoreciendo el empaquetamiento de las partículas.

Por otra parte, el porcentaje de vacíos calculado en estado varillado fue de 43.24% para la muestra 01 y 43.27% para la muestra 02, con un valor promedio de 43.25%. Si bien estos valores son ligeramente menores a los registrados en el estado suelto (47.83%), indican aún una proporción considerable de espacios vacíos entre partículas, lo cual deberá ser compensado mediante la adecuada proporción de pasta cementante en la mezcla.

Tabla 7

Peso unitario suelto y vacíos del agregado Fino

Peso unitario suelto y vacíos del agregado fino		
Datos del ensayo	Muestra 01	Muestra 02
Peso del Molde (gr)	1380	1380
Peso del Molde + Muestra Suelta (gr)	5612	5614
Peso de la Muestra Suelta (gr)	4232	4234
Volumen del Molde (cm ³)	2874.00	2874.00
Peso Unitario Suelto (gr/cm ³)	1.473	1.473
Peso Específico (kg/m ³)	2730.510	2730.510
Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	1472.512	1473.208
Porcentaje de Vacíos	46.07%	46.05%
Peso Unitario Suelto (kg/m³)	1472.860	

Nota. En la tabla se presenta el peso unitario suelto y el porcentaje de vacíos del agregado fino correspondiente a las dos muestras analizadas, lo que permite evaluar su densidad aparente y nivel de compactación, factores relevantes para el control de calidad en mezclas de concreto.

Para la presente evaluación se utilizaron dos muestras representativas, con un volumen constante del molde de 2874.00 cm³. El peso de la muestra suelta fue de 4232 g en la muestra 01 y 4234 g en la muestra 02, lo que condujo a pesos unitarios sueltos de 1472.512 kg/m³ y 1473.208 kg/m³, respectivamente. El valor promedio de peso unitario suelto fue 1472.860 kg/m³, lo cual se considera adecuado para agregados finos naturales de granulometría media.

El peso específico del material fue asumido como 2730.510 kg/m³, valor típico para arenas silíceas o trituradas, lo cual permitió calcular el porcentaje de vacíos, que resultó ser de 46.07% para la muestra 01 y 46.05% para la muestra 02, con un promedio de 46.06%. Este porcentaje representa el volumen relativo de aire contenido entre las partículas del agregado cuando se encuentra en estado suelto, y constituye un parámetro importante para evitar mezclas con exceso de pasta o segregación durante el colado del concreto.

El porcentaje de vacíos, cercano al 46%, revela una condición moderada de empaquetamiento, lo cual puede ser atribuido a una distribución granulométrica adecuada, pero con cierta predominancia de partículas angulosas o de forma irregular. Esta característica puede ser beneficiosa para mejorar la adherencia mecánica entre la pasta y el agregado, pero también implica la necesidad de una proporción precisa de agua y cemento para lograr una mezcla trabajable sin pérdida de cohesión.

Tabla 8*Peso unitario varillado y vacíos del agregado fino*

Peso unitario varillado y vacíos del agregado fino		
Datos del ensayo	Muestra 01	Muestra 02
Número de Capas	3	3
Número de Golpes	25	25
Peso del Molde (gr)	1380	1380
Peso del Molde + Muestra Varillada (gr)	6272	6270
Peso de la Muestra Varillada (gr)	4892	4890
Volumen del Molde (cm ³)	2874.00	2874.00
Peso Unitario Varillado (gr/cm ³)	1.702	1.701
Peso Específico (kg/m ³)	2730.510	2730.510
Peso Unitario Varillado (kg/m ³)	1702.157	1701.461
Porcentaje de Vacíos	37.66%	37.69%
Peso Unitario compactado (kg/m³)	1701.81	
Porcentaje de Vacíos	37.67%	

Nota. En la tabla se presenta el peso unitario varillado y el porcentaje de vacíos del agregado fino correspondiente a las dos muestras analizadas, resultados que permiten determinar su densidad aparente y grado de compactación, aspectos fundamentales en el diseño y control de mezclas de concreto.

El procedimiento se realizó empleando tres capas de llenado, aplicando 25 golpes por capa con varilla metálica, en un molde con un volumen de 2874.00 cm³. Para ambas muestras, los pesos de la muestra varillada fueron similares: 4892 g (muestra 01) y 4890 g (muestra 02), resultando en pesos unitarios varillados de 1702.157 kg/m³ y 1701.461 kg/m³, respectivamente. El valor promedio fue de 1701.81 kg/m³, representando un incremento significativo en comparación con el peso unitario en estado suelto (1472.86 kg/m³), lo que evidencia el efecto positivo de la compactación sobre la densidad aparente del agregado fino.

El peso específico del material, utilizado como referencia para el cálculo del porcentaje de vacíos, fue de 2730.510 kg/m³, típico para arenas naturales o trituradas. A partir de este valor se calculó el porcentaje de vacíos en estado compactado, que fue de 37.66% para la muestra 01 y 37.69% para la muestra 02, promediando 37.67%. Esta

reducción de vacíos respecto al estado suelto (46.06%) indica que el agregado fino responde adecuadamente al proceso de compactación, mejorando la eficiencia del empaquetamiento de partículas.

Desde una perspectiva técnica, estos resultados son favorables, ya que el árido fino posee una aptitud destacada de densificación sin requerir un exceso de pasta cementante. Un menor porcentaje de vacíos en estado varillado permite optimizar la proporción de ligante y agua, incrementando la capacidad estructural del hormigón sin afectar la trabajabilidad.

Tabla 9

Peso unitario suelto

Peso unitario suelto		
Datos del ensayo	Muestra 01	Muestra 02
Peso del Molde (gr)	3430	3430
Peso del Molde + Muestra Suelta (gr)	5540	5542
Peso de la Muestra Suelta (gr)	2110	2112
Volumen del Molde (cm ³)	6955.00	6955.00
Peso Unitario Suelto (gr/cm ³)	0.303	0.304
Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	303.379	303.666
Peso Unitario Suelto (kg/m³)	303.523	

Nota. En la tabla se presenta el peso unitario suelto correspondiente a las dos muestras evaluadas, información que permite determinar la densidad aparente del material y evaluar su comportamiento en estado no compactado.

En el presente ensayo, se utilizaron dos muestras representativas de un mismo material, empleando un molde con un volumen constante de 6955.00 cm³ (equivalente a 6.955 litros). El peso del molde vacío fue de 3430 g para ambas muestras, mientras que el peso del molde lleno con la muestra suelta fue de 5540 g y 5542 g, respectivamente. A partir de esta diferencia, se obtuvo un peso neto de muestra suelta de 2110 g para la muestra 01 y 2112 g para la muestra 02.

El cálculo del peso unitario suelto, expresado en kilogramos por metro cúbico (kg/m³), arrojó valores de 303.379 kg/m³ y 303.666 kg/m³ para las muestras 01 y 02,

respectivamente. El valor promedio fue de 303.523 kg/m³, lo que indica una baja densidad del material analizado. Este resultado sugiere que el material evaluado es relativamente liviano y de baja densidad aparente, posiblemente correspondiente a un insumo granular de baja masa específica, como puede ser un agregado no convencional, material reciclado, poliestireno expandido o algún residuo granular de origen industrial o agrícola.

Este tipo de materiales, por su bajo peso unitario, puede ser empleado en aplicaciones especiales de construcción donde se requiera aligerar la estructura, como en concretos livianos, rellenos estructurales, elementos prefabricados de baja carga o en sistemas de aislamiento térmico o acústico.

Sin embargo, también es importante considerar que este tipo de materiales suelen tener una resistencia mecánica limitada y una mayor presencia de vacíos, lo que implica una mayor necesidad de pasta cementante para lograr cohesión en las mezclas, así como una dosificación más cuidadosa para garantizar la estabilidad del producto final.

Tabla 10

Peso específico y absorción del agregado grueso

Peso específico y absorción del agregado grueso (MTC e 206)	
Datos del ensayo	Muestra 01
Peso de la canastilla sumergida (gr)	0
Peso de la Muestra Seca (gr)	987.2
Peso de la canastilla + muestra sumergida (gr)	630
Peso de la Muestra Saturada con Superficie Seca (gr)	1000.3
Peso del Agua Absorbida (gr)	13.1
Peso Específico (gr/cm³)	2.67
Capacidad de Absorción (%)	1.33%

Nota. En la tabla se presenta el peso específico y la absorción del agregado grueso correspondiente a la muestra 01, valores que permiten evaluar la densidad real del material y su capacidad de retener agua, aspectos esenciales para el diseño adecuado de mezclas de concreto.

El presente ensayo tuvo por objeto establecer la densidad relativa y la capacidad de captación de humedad en un árido grueso, parámetros esenciales para el diseño y control de mezclas cementicias, ya que influyen de forma directa en la dosificación del agua y cemento, así como en la manejabilidad, durabilidad y resistencia del producto final.

En primer lugar, se realizó el pesado del árido seco, obteniéndose un valor de 987.2 gramos. Posteriormente, se realizó el pesaje de la fracción saturada con superficie seca (SSS), alcanzando un peso de 1000.3 gramos, lo cual permitió cuantificar el volumen de agua absorbido por la muestra, equivalente a 13.1 gramos. Estos datos reflejan la facultad del árido para retener humedad en su estructura porosa sin presentar humedad libre en la superficie, condición clave para su uso en mezclas de concreto.

El cálculo del peso específico, expresado en gramos por centímetro cúbico (g/cm^3), resultó en un valor de 2.67 g/cm^3 , lo cual se considera adecuado para agregados pétreos naturales como la grava triturada o piedras andesíticas. Este valor es representativo de un material denso y estable, con buena capacidad para resistir cargas estructurales.

En cuanto a la capacidad de absorción, se obtuvo un valor de 1.33%, el cual se encuentra dentro del rango admisible para áridos empleados en hormigón convencional (generalmente $<2\%$). Este resultado evidencia que el agregado posee una porosidad moderada, lo cual es favorable, ya que permite cierta retención de humedad útil para el proceso de hidratación del cemento, pero sin exceder niveles que comprometan la durabilidad o resistencia del concreto endurecido.

Desde una perspectiva práctica, estos valores sugieren que el agregado grueso evaluado es apto para su uso en concretos estructurales, siempre que se consideren sus características de absorción al momento de ajustar la relación agua-cemento durante el diseño de mezcla. No es necesario realizar pre-humedecimiento obligatorio, aunque podría ser recomendable en condiciones de temperatura elevada o mezclas con baja relación a/c.

Tabla 11*Gravedad específica y absorción del agregado fino*

Gravedad específica y absorción del agregado fino (MTC e 205)	
Datos del ensayo	Muestra 01
Volumen del Picnómetro (ml)	500
Peso del Picnómetro (gr)	202.4
Peso de la Muestra Seca (gr)	283.7
Peso del Picnómetro + Agua + Muestra (gr)	879.0
Peso de la Muestra Saturada con Superficie Seca (gr)	300.1
Peso del Picnómetro + Agua (gr)	699.2
Peso de la Muestra Sumergida (gr)	179.8
Peso del Agua Desplazada (gr)	103.9
Peso del Agua Absorbida (gr)	16.4
Peso Específico (gr/cm³)	2.73
Capacidad de Absorción	5.78%

Nota. En la tabla se presenta la gravedad específica y la absorción del agregado fino correspondiente a la muestra 01, parámetros que permiten determinar la densidad del material y su capacidad de absorción de agua, factores importantes en el control y diseño de mezclas de concreto.

Para este análisis se utilizó un picnómetro de 500 ml de capacidad, según lo establece el procedimiento normativo MTC e 205. La masa de la muestra seca fue de 283.7 gramos, mientras que la muestra saturada con superficie seca (SSS) alcanzó un peso de 300.1 gramos, lo que representa la cantidad máxima de agua absorbida sin agua libre en la superficie del agregado. A partir de estos valores, se determinó la masa de agua absorbida como 16.4 gramos.

El peso del picnómetro con agua y muestra fue de 879.0 gramos, mientras que con solo agua fue de 699.2 gramos, lo que permitió calcular el volumen de agua desplazada por la muestra, estimado en 103.9 gramos, y la masa de la muestra sumergida fue de 179.8 gramos.

Con estos datos, se obtuvo una gravedad específica (peso específico) de 2.73 gr/cm³, un valor considerado adecuado y común para agregados finos naturales o triturados, como arenas silíceas. Este valor es consistente con la densidad de materiales pétreos utilizados en obras civiles, lo cual garantiza que el agregado aportará una masa estable y resistencia suficiente a la mezcla de concreto.

Sin embargo, se observó una capacidad de absorción relativamente alta de 5.78%, lo cual supera el rango óptimo (<3%) recomendado para agregados finos en mezclas convencionales. Este alto nivel de absorción indica una elevada porosidad interna en las partículas del agregado, lo que puede generar complicaciones en el control del contenido de agua efectiva en el diseño de mezcla, y también puede provocar problemas de durabilidad, como mayor retracción o mayor demanda de agua y cemento para alcanzar una mezcla trabajable.

En consecuencia, este agregado fino debe ser utilizado con precaución. Será necesario realizar ajustes en la dosificación del agua para compensar la absorción del material, así como considerar un pre-humedecimiento previo al mezclado, especialmente si se empleará en concretos estructurales o de alta resistencia.

Tabla 12

Contenido de humedad del agregado grueso

Contenido de humedad del agregado grueso			
Datos del ensayo	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03
Cápsula N°	1	2	3
Peso agregado húmedo + recipiente (g)	810.00	895.00	852.50
Peso agregado seco + recipiente (g)	808.00	893.00	850.50
Peso del agua (g)	2.00	2.00	2.00
Peso del recipiente (g)	85.00	84.00	84.50
Peso neto del suelo seco (g)	723.00	809.00	766.00
% de Humedad	0.28	0.25	0.26
w (%) Promedio		0.26	

Nota. En la tabla se presenta el contenido de humedad del agregado grueso correspondiente a las tres muestras analizadas, información que permite determinar la cantidad de agua presente en el material y realizar los ajustes necesarios en el diseño de la mezcla de concreto.

En el presente análisis se evaluaron tres muestras representativas. El procedimiento consistió en pesar el agregado húmedo junto con el recipiente, luego secarlo completamente en horno y volver a pesarlo para determinar la pérdida de masa atribuible a la evaporación del agua. Con esta información se calculó el contenido de humedad gravimétrico, es decir, la proporción de agua respecto al peso seco del agregado.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Muestra 01: contenido de humedad = 0.28%
- Muestra 02: contenido de humedad = 0.25%
- Muestra 03: contenido de humedad = 0.26%

El promedio general del contenido de humedad fue de 0.26%, lo cual representa un valor muy bajo, indicativo de un agregado que se encuentra prácticamente en condición seca o con una mínima presencia de humedad superficial.

Este resultado es relevante en el contexto de la elaboración de concreto, ya que implica que no es necesario realizar ajustes significativos en la cantidad de agua de mezclado debido a la humedad del agregado. No obstante, en obras de precisión o de concreto de alta resistencia, incluso valores bajos como este deben ser considerados en la dosificación, especialmente si el concreto será producido en climas áridos o en condiciones donde el control de la relación agua/cemento sea crítico.

Adicionalmente, el hecho de que todas las muestras presenten valores similares de humedad refleja una buena homogeneidad del material almacenado, lo cual es favorable para mantener la constancia en las propiedades del concreto a lo largo del proceso constructivo.

Tabla 13*Contenido de humedad del agregado fino*

Contenido de humedad del agregado fino			
Datos del ensayo	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03
Cápsula N°	1	2	3
Peso agregado húmedo + recipiente (g)	576.00	513.00	544.50
Peso agregado seco + recipiente (g)	567.00	505.00	536.00
Peso del agua (g)	9.00	8.00	8.50
Peso del recipiente (g)	87.00	85.00	86.00
Peso neto del suelo seco (g)	480.00	420.00	450.00
% de Humedad	1.88	1.90	1.89
w (%) Promedio	1.89		

Nota. En la tabla se presenta el contenido de humedad del agregado fino correspondiente a las tres muestras evaluadas, dato que permite identificar la cantidad de agua retenida en el material y efectuar los ajustes precisos en la dosificación de la mezcla de concreto.

La prueba de determinación de humedad del árido fino tiene como objetivo determinar la proporción de agua contenida en el agregado en estado natural, indicada como un porcentaje respecto a la masa del árido seco. Esta información es esencial para calibrar correctamente el volumen de agua de mezclado en el diseño de concretos y morteros, ya que la humedad del agregado afecta directamente la proporción agua/cemento efectivo, la trabajabilidad y, por ende, la calidad del producto final.

Durante esta evaluación se analizaron tres fracciones representativas del árido fino. La masa de agua contenida en cada muestra fue determinada por la diferencia entre el peso húmedo y el peso seco, ambos registrados junto al recipiente de ensayo. Los pesos netos del suelo seco fueron:

- Muestra 01: 480.00 g
- Muestra 02: 420.00 g
- Muestra 03: 450.00 g

Las masas de agua evaporada, producto del secado en horno, fueron de 9.00 g, 8.00 g y 8.50 g respectivamente. A partir de estos datos, se calcularon los porcentajes de humedad gravimétrica:

- Muestra 01: 1.88%
- Muestra 02: 1.90%
- Muestra 03: 1.89%

El promedio general del contenido de humedad fue de 1.89%, lo que representa una humedad moderada, típica de agregados finos almacenados en ambientes expuestos a humedad ambiental o que no han sido secados previamente.

Desde una perspectiva técnica, este nivel de humedad es relevante para el diseño de mezcla, ya que el agua presente en el agregado contribuye al contenido total de agua en el concreto. Si no se ajusta correctamente la dosificación, esta humedad adicional puede alterar la relación agua/cemento, provocando una mezcla más fluida de lo previsto, con efectos negativos en la resistencia, retracción y durabilidad del concreto.

A diferencia del agregado grueso evaluado previamente, que mostró una humedad promedio de apenas 0.26%, el agregado fino evidencia una mayor retención de humedad, lo cual es coherente con su menor tamaño de partícula y mayor superficie específica. Este comportamiento obliga a prestar especial atención a su condición en obra, especialmente si el concreto será utilizado en elementos estructurales o en ambientes expuestos.

Tabla 14

Diseño de mezcla para un concreto con resistencia a la compresión de 210 kg/cm²

Datos	
f _{cr}	: 210 kg/cm ²
Factor de seguridad	: 84
f _{cr} (Diseño)	: 294 kg/cm ²

Nota. En la tabla se presenta el diseño de mezcla para un concreto con resistencia a la compresión especificada, donde se detallan las proporciones de los materiales constituyentes

con el fin de garantizar la trabajabilidad, durabilidad y resistencia requerida según las condiciones de obra.

El proceso de diseño de mezcla de concreto parte del establecimiento de una resistencia característica mínima requerida a los 28 días, conocida como $f'c$. En este caso, se ha fijado una resistencia de diseño nominal de 210 kg/cm^2 , la cual corresponde a los requisitos estructurales del proyecto en cuestión. Sin embargo, debido a la variabilidad inherente en los materiales y en los procedimientos de fabricación y curado del concreto, es necesario aplicar un factor de seguridad estadístico que garantice que la resistencia real del concreto en obra no sea inferior a la especificada.

En este contexto, se ha adoptado un factor de seguridad de 84 kg/cm^2 , valor que generalmente se calcula con base en la desviación estándar del proceso de producción y un nivel de confiabilidad estadística predefinido (según recomendaciones del ACI o normativa técnica nacional como la NTP 339.034).

La suma de la resistencia característica ($f'c$) y el factor de seguridad da lugar a la resistencia media de diseño (f_{cr} o f'_{cr}), que representa la resistencia que debe alcanzar el concreto diseñado para compensar las variaciones naturales. En este caso, el valor calculado es de 294 kg/cm^2 , el cual será utilizado como referencia en las tablas de dosificación de mezcla para seleccionar la relación agua/cemento adecuado y la cantidad de cada uno de los componentes del concreto (cemento, agua, agregados y aditivos).

Este incremento respecto a la resistencia nominal garantiza que, a pesar de las fluctuaciones en calidad de materiales, condiciones ambientales y mano de obra, al menos el 95% de los ensayos de resistencia a compresión de cilindros de prueba cumplan con o superen los 210 kg/cm^2 especificados, conforme al criterio de aceptación de lotes de concreto estructural.

Tabla 15*Cemento portland*

Cemento Portland	
Peso específico	: 3.05 gr/cm ³

Nota. En la tabla se presenta el peso específico del cemento Portland, dato fundamental para determinar la densidad del material y su participación en el diseño de mezclas de concreto

El peso específico del cemento Portland constituye una propiedad física fundamental en el diseño de mezclas de concreto, ya que permite convertir volúmenes en masas (y viceversa) con precisión durante el proceso de dosificación. En el presente caso, se ha determinado un valor de 3.05 gr/cm³, lo cual equivale a 3050 kg/m³ en unidades del Sistema Internacional (SI).

Tabla 16*Datos de diseño del agregado fino*

Datos de diseño del agregado fino		
Módulo de fineza	: 2.95	---
Peso específico	: 2730.51	kg/m ³
Peso unitario suelto	: 1472.86	kg/m ³
Peso unitario compactado	: 1701.81	kg/m ³
Absorción	: 5.78	%
Humedad	: 1.89	%

Nota. En la tabla se presentan los datos de diseño del agregado fino, considerando sus propiedades físicas y de humedad, las cuales son esenciales para el cálculo y ajuste de la mezcla de concreto.

El conjunto de características presentadas en esta tabla corresponde a un análisis integral del agregado fino destinado al diseño de una dosificación de hormigón con capacidad a compresión de 210 kg/cm². Estos parámetros permiten caracterizar el comportamiento físico del agregado en condiciones normales de uso, y son fundamentales para el cálculo preciso de las proporciones de componentes en una mezcla eficaz, duradera y trabajable.

El índice de fineza obtenido es de 2.95, lo cual evidencia que el árido posee una granulometría media a gruesa. Este valor se encuentra dentro del rango recomendado (2.3 –

3.1) según la normativa ASTM C33, considerándose apropiado para dosificaciones estructurales de hormigón, ya que ofrece elevada docilidad, solidez y menor necesidad de agua que una arena muy fina.

El peso específico fue determinado en 2730.51 kg/m^3 , valor típico para arenas naturales de origen silíceo o trituradas. Este parámetro es utilizado para convertir volúmenes a masa durante el proceso de dosificación, siendo esencial para garantizar el equilibrio volumétrico de la mezcla.

Respecto al peso unitario suelto, se registró un valor de 1472.86 kg/m^3 , mientras que el peso unitario compactado alcanzó 1701.81 kg/m^3 . Esta diferencia evidencia la capacidad de densificación del agregado bajo condiciones de compactación mecánica. La densidad obtenida en estado suelto es representativa de la forma, textura y gradación del material, mientras que la densidad compactada es útil para el cálculo de la proporción volumétrica en el mezclado, especialmente cuando se utiliza el método del peso volumétrico.

Uno de los aspectos críticos observados es el alto valor de absorción, que asciende a 5.78%. Este valor supera el límite convencional (normalmente $<3\%$ para arenas comunes), indicando que el agregado posee una porosidad significativa. Esto exige precaución en la dosificación del agua de mezclado, ya que una absorción elevada puede afectar negativamente la relación agua/cemento efectivo y la resistencia del concreto. Será necesario ajustar la cantidad de agua para compensar esta absorción y, de ser posible, prehumedecer el agregado antes del mezclado.

Por último, el contenido de humedad natural del agregado fue de 1.89%, valor moderado pero relevante. Esta humedad forma parte del contenido total de agua en la mezcla, por lo que debe ser considerada y descontada del agua de diseño para evitar excedentes que disminuyan la resistencia o causen segregación.

Tabla 17*Diseño del agregado grueso*

Datos de diseño del agregado grueso		
Tamaño máximo nominal	: 1/2	"
Peso específico	: 2665.95	kg/m ³
Peso unitario suelto	: 1390.73	kg/m ³
Peso unitario compactado	: 1512.87	kg/m ³
Absorción	: 1.33	%
Humedad	: 0.26	%

Nota. En la tabla se presentan los datos de diseño del agregado grueso, que incluyen su tamaño máximo nominal, peso específico, pesos unitarios, absorción y humedad, parámetros esenciales para el control de calidad y diseño de mezclas de concreto.

El peso específico del agregado grueso es de 2665.95 kg/m³, valor característico de agregados naturales de origen pétreo, como grava triturada o piedra partida. Este parámetro es fundamental para la conversión de volúmenes a masas y es un insumo clave en los cálculos de proporción de materiales en el método del volumen absoluto, empleado comúnmente en el diseño de mezclas de concreto.

En cuanto a la masa específica, la densidad aparente en estado suelto fue de 1390.73 kg/m³, en tanto que el peso unitario compactado alcanzó los 1512.87 kg/m³. Esta diferencia refleja la capacidad del agregado para densificarse mediante vibrado o varillado, lo cual repercute directamente en la trabajabilidad, la compacidad del hormigón y el consumo de pasta cementante. Un agregado con buena capacidad de compactación contribuye a reducir los vacíos y, por ende, mejora la durabilidad y capacidad resistente del concreto endurecido.

Respecto a su comportamiento higroscópico, el árido grueso presenta una captación de agua de 1.33%, valor considerado bajo y adecuado, ya que se encuentra dentro del rango recomendado (<2%). Esta propiedad permite al agregado alcanzar una condición de saturación con superficie seca (SSS) sin absorber excesiva cantidad de agua de la mezcla, lo cual facilita el control del cociente agua/ligante.

Finalmente, el contenido de humedad natural registrado es de 0.26%, indicando que el material se encuentra en condiciones prácticamente secas. Esto es beneficioso desde el punto de vista del diseño de mezcla, ya que no se requiere realizar ajustes importantes al contenido de agua de mezclado. Sin embargo, si se desea utilizar el agregado en estado saturado con superficie seca, será necesario realizar un prehumedecimiento controlado.

Tabla 18

Volumen Absolutos

Volumen Absolutos	
Cemento	: 0.129 m ³
Agua	: 0.216 m ³
Aire	: 0.025 m ³
Agregado grueso	: 0.304 m ³
Sub - Total	: 0.674 m ³

Nota. En la tabla se presentan los datos de volumen absoluto de cada componente de la mezcla (cemento, agua, aire y agregado grueso), información utilizada para determinar las proporciones volumétricas totales en el diseño del concreto.

El método de volúmenes absolutos, conforme a lo establecido por el ACI (American Concrete Institute), es una técnica ampliamente utilizada para diseñar mezclas de concreto, ya que permite equilibrar los componentes sólidos y líquidos considerando sus respectivos volúmenes reales ocupados en un metro cúbico (m³) de mezcla. El objetivo principal es asegurar que la suma de todos los volúmenes parciales se aproxime a 1.000 m³, valor correspondiente a una mezcla de concreto total por unidad de volumen.

En el presente caso, se ha determinado que los siguientes componentes ocupan los volúmenes respectivos dentro de la mezcla:

- Cemento: 0.129 m³
- Agua: 0.216 m³
- Aire incorporado: 0.025 m³
- Agregado grueso: 0.304 m³

Estos valores suman un sub-total de 0.674 m^3 , el cual representa el volumen ocupado por todos los componentes distintos al agregado fino. A partir de este resultado, se deduce que el volumen restante ($1.000 - 0.674 = 0.326 \text{ m}^3$) corresponderá al agregado fino, cuya cantidad será posteriormente calculada en base a su peso específico y condiciones de humedad y absorción.

La presencia de aire incorporado (0.025 m^3) en la mezcla es especialmente relevante, ya que tiene como finalidad optimizar la docilidad del hormigón y reforzar su capacidad estructural al congelamiento y deshielo, sin comprometer significativamente la resistencia mecánica a compresión. Dicho valor corresponde a un volumen de aire del 2.5%, apropiado para concretos no expuestos a ciclos severos de congelamiento, tal como se estipula en las directrices del ACI 211.

El volumen de líquido (0.216 m^3) corresponde al aporte hídrico total de la mezcla, incluyendo tanto el agua libre como aquella que será absorbida por los agregados. Este valor debe ser ajustado según el nivel de humedad y capacidad de absorción de los componentes, para que la proporción agua/ligante efectivo permanezca dentro del margen ideal para alcanzar la resistencia y durabilidad requeridas. El volumen de cemento (0.129 m^3) está vinculado directamente con la resistencia de diseño ($f'_{cr} = 294 \text{ kg/cm}^2$) y se definió en función de la relación agua/cemento óptimo. Una adecuada proporción de cemento garantiza no solo el desarrollo de resistencia mecánica, sino también la durabilidad y cohesión del concreto.

Tabla 19

Contenido de agregado fino

Contenido de agregado fino	
Volumen absoluto fino	: 0.326 m^3
Peso fino seco	: 890.391 kg/m^3

Nota. En la tabla se presentan los datos del contenido de agregado fino, incluyendo su volumen absoluto y peso seco, valores necesarios para definir la proporción adecuada del material en el diseño de la mezcla de concreto.

La presente tabla muestra el resultado del cálculo del contenido de agregado fino, correspondiente al diseño de una mezcla de concreto estructural elaborado por el método de los volúmenes absolutos, cuyo objetivo es establecer la cantidad óptima de cada componente para producir 1 metro cúbico (m^3) de concreto, cumpliendo con los criterios de trabajabilidad, resistencia y durabilidad.

Según el cálculo anterior, el volumen absoluto ocupado por el agregado fino fue determinado en $0.326 m^3$. Este valor representa el espacio que corresponde al agregado fino dentro del volumen total de la mezcla, una vez que se han considerado los volúmenes del cemento, el agua, el aire y el agregado grueso, cuyo subtotal era $0.674 m^3$. De esta manera, se completa el volumen total de $1.000 m^3$ de concreto, cumpliendo con los principios de compacidad del método del ACI.

A partir de dicho volumen y utilizando el peso específico del agregado fino, previamente determinado como $2730.51 kg/m^3$, se calculó el peso seco del agregado fino requerido, que resultó ser $890.391 kg/m^3$. Esta masa representa la proporción de árido fino en condición seca (sin humedad contenida), que será dosificada por metro cúbico de mezcla.

Cabe señalar que este valor debe ser ajustado según el grado de humedad natural (1.89%) del árido fino y su índice de absorción (5.78%), con el fin de calcular la masa real que debe ser medida en obra. El agregado, al presentar un contenido de humedad por debajo de su capacidad de absorción, absorberá parte del agua de la mezcla. Por tanto, será necesario incrementar ligeramente la masa total del agregado fino en estado húmedo para compensar su contenido de agua y asegurar que la proporción agua/cemento efectivo permanezca dentro de los límites establecidos en el diseño

Tabla 20*Valores de diseño*

Valores de diseño	
Cemento	: 393.87 kg/m ³
Agua	: 216.00 Lt/m ³
Agregado fino seco	: 890.39 kg/m ³
Agregado grueso seco	: 809.84 kg/m ³

Nota. En la tabla se presentan los valores de diseño de la mezcla de concreto, que incluyen las proporciones de cemento, agua, agregado fino y agregado grueso, empleadas para alcanzar la resistencia y trabajabilidad requeridas.

El presente cuadro resume los parámetros definitivos de dosificación por unidad cúbica (m³) de hormigón, calculados mediante el procedimiento de los volúmenes absolutos, con base en una resistencia especificada a compresión de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y una fortaleza media proyectada de $f'cr = 294 \text{ kg/cm}^2$. Estos valores corresponden a los materiales en su condición seca o corregida, y constituyen el insumo fundamental para la producción de mezclas consistentes y de alto rendimiento en obra.

- **Cemento:** Se requiere un total de 393.87 kg/m³. Esta cantidad ha sido determinada en función de la relación agua/cemento óptimo para alcanzar la resistencia media de diseño ($f'cr$), tomando en cuenta la durabilidad y el tipo de exposición ambiental del concreto. Este valor refleja un diseño equilibrado que asegura un buen desarrollo de resistencia y una adecuada cohesión en la mezcla.
- **Agua:** Se ha estimado un requerimiento de 216.00 litros/m³, equivalente a 216.00 kg/m³, asumiendo una densidad del agua de 1.00 kg/L. Esta cantidad considera tanto la trabajabilidad deseada como el equilibrio con la cantidad de cemento disponible, formando parte clave de la relación a/c (agua/cemento), cuyo control es esencial para evitar pérdida de resistencia o durabilidad por exceso de agua.
- **Agregado fino seco:** El contenido de arena o material fino fue calculado en 890.39 kg/m³, con base en su peso específico, módulo de fineza y volumen absoluto

asignado (0.326 m^3). Este valor asegura que el agregado fino rellene adecuadamente los vacíos entre las partículas de agregado grueso y proporcione cohesión a la mezcla.

- Agregado grueso seco: Finalmente, se dosifican 809.84 kg/m^3 de agregado grueso, el cual representa la fracción resistente de mayor tamaño. Su selección, considerando un tamaño máximo nominal de $\frac{1}{2}$ ", peso específico de 2665.95 kg/m^3 y volumen absoluto de 0.304 m^3 , garantiza una mezcla densa, estable y adecuada para elementos estructurales.

Estos valores han sido calculados considerando los materiales en estado seco. En la práctica, será necesario realizar los ajustes por contenido de humedad natural y absorción, especialmente en los agregados, para obtener las cantidades reales a pesar. Por ejemplo, si el agregado fino tiene una humedad del 1.89% y una absorción del 5.78%, deberá sumarse agua y masa según esa diferencia. Lo mismo aplica para el agregado grueso con 0.26% de humedad y 1.33% de absorción.

Tabla 21

Corrección por humedad

Corrección por humedad	
Agregado fino húmedo	: 907.22 kg/m^3
Agregado grueso húmedo	: 811.94 kg/m^3

Nota. En la tabla se presentan los datos de corrección por humedad **del** agregado fino y grueso, ajustes necesarios para compensar el contenido de agua superficial y asegurar la precisión en la dosificación de la mezcla de concreto.

Una vez definidos los pesos secos de los agregados en el diseño de mezcla, es indispensable realizar la corrección por humedad, ya que en condiciones reales los agregados contienen una cierta cantidad de agua que influye directamente en el peso total del material a dosificar y en el contenido de agua efectiva del concreto.

En esta tabla se han corregido los valores de masa del agregado fino y del agregado grueso considerando sus respectivos contenidos de humedad natural. Estos ajustes son

necesarios para que el total de masa dosificada incluya no solo la parte sólida del agregado, sino también el agua que lleva adherida superficialmente, sin alterar la relación agua/cemento diseñado.

- En el caso del árido fino, con una proporción de humedad del 1.89%, se ajustó el peso seco de 809.39 kg/m^3 a un valor húmedo de 907.22 kg/m^3 . Esta diferencia indica la cantidad de agua contenida en el material, la cual deberá ser descontada del total de agua de mezclado, para evitar un exceso que pueda reducir la resistencia o provocar segregación en el concreto.
- En el caso del árido grueso, cuyo grado de humedad fue de 0.26%, el peso seco de 809.34 kg/m^3 se incrementó a 811.94 kg/m^3 . Si bien la variación es menor debido a la escasa capacidad de absorción hídrica del árido grueso, esta corrección sigue siendo relevante, sobre todo cuando se requiere precisión en mezclas para elementos estructurales o prefabricados.

Estas correcciones garantizan que la mezcla mantenga su equilibrio hídrico, es decir, que no reciba más agua de la prevista en el diseño, y que el concreto resultante cumpla con los requisitos de resistencia, trabajabilidad y durabilidad. También evitan errores frecuentes en obra, como el uso de agregados con humedad variable sin reajustar el agua de mezclado, lo cual puede llevar a concretos inconsistentes o defectuosos.

En conclusión, la masa corregida de agregados húmedos, de 907.22 kg/m^3 para el fino y 811.94 kg/m^3 para el grueso, son los valores que deben ser pesados en campo o en planta, mientras que la diferencia entre el agua contenida en los agregados y el agua total del diseño debe considerarse cuidadosamente en la preparación final del concreto.

Tabla 22*Pesos corregidos por humedad*

Pesos corregidos por humedad	
Cemento	: 393.87 kg/m ³
Agua	: 259.28 Lt/m ³
Agregado fino húmedo	: 907.22 kg/m ³
Agregado grueso húmedo	: 811.94 kg/m ³

Nota. En la tabla se presentan los pesos corregidos por humedad de los materiales que conforman la mezcla de concreto, considerando los ajustes en el contenido de agua y agregados para garantizar una dosificación precisa y uniforme.

La tabla de masas ajustadas por contenido hídrico refleja la etapa final del diseño de dosificación según el procedimiento ACI, en la cual se regulan las proporciones de los materiales a dosificar considerando las condiciones reales de humedad de los áridos en obra. Estos ajustes son esenciales para garantizar que la proporción agua/cemento efectivo se conserve conforme al diseño, evitando deficiencias de resistencia o problemas de trabajabilidad.

- **Cemento:** La cantidad permanece constante en 393.87 kg/m³, ya que el cemento se almacena seco y no requiere corrección por humedad. Este valor representa la dosis óptima para alcanzar la capacidad estructural de diseño ($f^c = 294 \text{ kg/cm}^2$), proporcionando cohesión, fortaleza y permanencia del hormigón.
- **Agua:** La cantidad total de agua fue incrementada a 259.28 L/m³, respecto a los 216 L/m³ inicialmente considerados. Esta corrección tiene en cuenta el agua que será absorbida por los agregados, especialmente por el agregado fino, cuya capacidad de absorción es elevada (5.78%). El valor de 259.28 L representa el volumen total de agua que se debe añadir en obra, incluyendo tanto el agua libre como la que compensará la absorción natural de los agregados.
- **Agregado fino húmedo:** El valor corregido es de 907.22 kg/m³, calculado a partir del peso seco (890.39 kg/m³) y su humedad natural (1.89%). Esta corrección asegura

que se dosifique la cantidad correcta de material sólido más el agua adherida superficialmente, sin alterar la relación agua/cemento efectivo.

- Agregado grueso húmedo: Se dosifica 811.94 kg/m³, resultado del ajuste al peso seco (809.84 kg/m³) considerando una humedad natural de 0.26%. Aunque la corrección es menos significativa que en el agregado fino, sigue siendo relevante para el control de calidad de mezclas precisas.

Tabla 23

Cantidad de materiales y proporción

Cantidad de materiales y proporción								
Materiales	Cantidad /m ³		Proporción en Volumen por bolsa		Proporción en volumen para 1 m ³		Dosificación en Baldes (20 Litros)	
Cemento	393.87	Kg	1.00	Bolsa	9.268	bolsas	1.00	Bolsa
Agua	259.28	Lt	27.98	Lt	0.259	m ³	1.40	Baldes
Agr. Fino	907.22	Kg	2.35	pie ³	0.616	m ³	3.29	Baldes
Agr. Grueso	811.94	Kg	2.22	pie ³	0.584	m ³	3.11	Baldes
ARN	27.20	kg	2.93	kg	0.08	m ³	–	
8.0%	27200	gr	2934.96	gr				

Nota. En la tabla se presentan los datos de la cantidad de materiales y sus proporciones para la elaboración de 1 m³ de concreto, detallando las equivalencias en volumen y dosificación en baldes, con el fin de asegurar una mezcla uniforme y conforme al diseño establecido.

En el diseño de mezcla para concreto estructural, es fundamental no solo determinar las proporciones óptimas de cada componente en laboratorio, sino también traducir dichos valores a unidades operativas que sean comprensibles y aplicables en el contexto de obra. La presente dosificación corresponde a una mezcla diseñada para alcanzar una resistencia característica de 210 kg/cm², y una resistencia media de diseño (f'_{cr}) de 294 kg/cm², conforme al método de los volúmenes absolutos.

En primer lugar, se determinó que para la elaboración de 1 m³ de concreto se requieren 393.87 kilogramos de cemento Portland, cantidad equivalente a 9.268 bolsas

estándar de 42.5 kg. En términos prácticos, esta proporción se simplifica a 1 bolsa de cemento por cada dosificación, permitiendo su fácil medición y uso en obra.

El agua de mezclado, corregida por la humedad y absorción de los agregados, asciende a 259.28 litros por metro cúbico, lo que equivale a 1.40 baldes de 20 litros por bolsa de cemento. Esta cantidad incluye tanto el agua libre necesaria para la hidratación del cemento como la cantidad adicional requerida para compensar la absorción de los agregados.

Para el caso del agregado fino, se dosifican 907.22 kilogramos por metro cúbico, que equivalen a 0.616 m³ o 3.29 baldes de 20 litros por cada bolsa de cemento. Esta proporción permite alcanzar una mezcla cohesiva, con buena trabajabilidad y adecuada retención de agua. El valor en unidades tradicionales también se expresa como 2.35 pies cúbicos por bolsa de cemento.

En cuanto al agregado grueso, se ha estimado una dosificación de 811.94 kilogramos por metro cúbico, lo que equivale a 0.584 m³ o 3.11 baldes por bolsa de cemento, y a 2.22 pies cúbicos por bolsa. Esta cantidad asegura una adecuada resistencia y estructura interna del concreto, especialmente considerando que el tamaño máximo nominal del agregado es de ½”.

Adicionalmente, se ha incorporado un componente innovador: ARN (acero recuperado de neumáticos), con una proporción del 8%, que equivale a 27.20 kg/m³ o 2.93 kg por bolsa de cemento, representando 2934.96 gramos por bolsa y 27200 gramos por m³.

Tabla 24

Dosificación en baldes

Material	Dosificación en baldes	
	Balde de 18 litros	Balde de 20 litros
Agua	1.6 baldes	1.4 baldes
Agr. Fino	3.5 baldes	3.3 baldes
Agr. Grueso	3.3 baldes	3.1 baldes

Nota. En la tabla se presentan los datos de la dosificación por baldes para la preparación del concreto, indicando las cantidades equivalentes en baldes de 18 y 20 litros con el propósito de facilitar la medición práctica de los materiales en obra.

En la práctica constructiva, especialmente en obras de pequeña y mediana escala, es frecuente utilizar recipientes estándar como baldes de 18 y 20 litros para medir los constituyentes del hormigón. Esta tabla presenta la dosificación ajustada de los componentes principales: agua, árido fino y árido grueso expresada en baldes por cada saco de cemento (de 42.5 kg), lo que permite una aplicación sencilla, directa y sin necesidad de instrumentos de medición de precisión.

Para el agua de mezclado, se requirió 1.6 baldes de 18 litros o, en su equivalencia, 1.4 baldes de 20 litros. Esta cantidad garantiza la proporción agua/mezcla previamente establecida en el diseño de mezcla (aproximadamente 0.46), y ha sido ajustada considerando la captación y el contenido hídrico real de los componentes pétreos, con el propósito de conservar la docilidad y la capacidad estructural del hormigón.

En el caso del agregado fino, la dosificación recomendada es de 3.5 baldes de 18 litros o 3.3 baldes de 20 litros. Esta proporción permite obtener una mezcla cohesiva y fluida, asegurando un buen llenado de moldes y una adecuada distribución entre las partículas del agregado grueso. Dicha cantidad se basa en el volumen absoluto ocupado por la arena en un metro cúbico, previamente corregido por su contenido de humedad natural.

Por su parte, el agregado grueso debe medirse como 3.3 baldes de 18 litros o 3.1 baldes de 20 litros por cada bolsa de cemento. Esta cantidad asegura la resistencia estructural del concreto, brindando un esqueleto granular estable que limita la retracción y mejora la durabilidad. La proporción fue determinada con base en el peso específico, el tamaño máximo nominal ($\frac{1}{2}$ ") y el volumen ocupado por el agregado en la mezcla.

Este sistema de dosificación es especialmente útil para facilitar el trabajo de los operarios en obra, eliminando la necesidad de conversiones técnicas o equipos de pesaje. Al estar expresado en unidades prácticas, permite mantener la uniformidad y calidad del concreto producido, siempre que se respeten las proporciones indicadas y se mantenga constante el volumen de los baldes utilizados.

Tabla 25

Dosificación para briquetas y/o vigas

Dosificación para briquetas y/o vigas						
Materiales	Cantidad		Proporción para 1 Probeta		Proporción	20 unidades
	/m ³				de Vaciado	
Cemento	393.87	Kg	0.619	Kg	12.37	Kg
Agua	259.28	L	0.407	L	8.15	L
Agr. Fino	907.22	Kg	1.425	Kg	28.50	Kg
Agr. Grueso	811.94	Kg	1.275	Kg	25.51	Kg
ARN	27.20	kg	0.043	Kg	0.855	Kg
8.0%	27200	gr	42.73	gr	854.51	gr

Nota. En la tabla se presentan los datos de la dosificación para la elaboración de briquetas y/o vigas de concreto, detallando las proporciones de materiales por probeta y para un total de 20 unidades, con el fin de garantizar uniformidad y precisión en los ensayos de resistencia.

Como parte del proceso de validación del diseño de mezcla estructural, se estableció la dosificación específica para la fabricación de probetas o elementos prismáticos de hormigón utilizados en pruebas experimentales. Estas muestras son fundamentales para analizar características como la capacidad a compresión, a tracción o a flexión, y deben elaborarse manteniendo estrictamente las proporciones definidas en el diseño original, pero adaptadas al volumen reducido de cada molde de ensayo.

La dosificación parte de un diseño de mezcla cuyo contenido de materiales por metro cúbico incluye: 393.87 kg de cemento, 259.28 litros de agua, 907.22 kg de agregado fino, 811.94 kg de agregado grueso y 27.20 kg de ARN (acero recuperado de neumáticos), correspondiente al 8% del peso del cemento. A partir de estos datos, se ha calculado la cantidad de cada componente necesario para elaborar una sola muestra de prueba y también

para un lote estándar de 20 unidades, tal como se emplea en campañas de caracterización mecánica.

Para la elaboración de una sola probeta o viga, se requirió aproximadamente 0.619 kg de cemento, 0.407 litros de agua, 1.425 kg de agregado fino, 1.275 kg de agregado grueso y 0.043 kg de ARN (equivalente a 43 gramos). Estas proporciones han sido determinadas considerando el volumen real ocupado por cada muestra en sus respectivos moldes y permiten replicar con precisión la relación agua/cemento y las proporciones absolutas del diseño original.

En el caso de la producción de un lote de 20 unidades, se requiere escalar proporcionalmente los materiales, resultando en una necesidad total de 12.37 kg de cemento, 8.15 litros de agua, 28.50 kg de agregado fino, 25.51 kg de agregado grueso y 854.51 gramos de ARN. Esta presentación facilita la planificación y preparación de los materiales necesarios para series completas de ensayos en condiciones de laboratorio.

La importancia de esta dosificación radica en que permite garantizar la representatividad y consistencia de las muestras respecto al concreto que será utilizado en obra. La precisión en las cantidades también contribuye a minimizar errores en la interpretación de resultados mecánicos y asegurar que las pruebas reflejen de manera confiable el comportamiento real del concreto estructural diseñado.

Tabla 26

Medición de Temperatura

Medición de Temperatura		
Pruebas n°	Prueba 01	Prueba 02
Temperatura °c	26	25.5
Promedio (°c)	25.75	

Nota En la tabla se presentan los datos de medición de temperatura obtenidos en dos pruebas realizadas al concreto fresco, cuyo promedio fue de 25.75 °C, valor que permite evaluar las condiciones térmicas durante el proceso de mezclado y vaciado.

Durante el proceso de elaboración de las mezclas de concreto para ensayo, se llevó a cabo la medición de la temperatura del concreto fresco, en cumplimiento de los procedimientos establecidos para el control de calidad según la normativa técnica vigente (ASTM C1064 / NTP 339.183). Este parámetro es crucial, ya que influye directamente en el tiempo de fraguado, la trabajabilidad, la ganancia de resistencia a corto y largo plazo, así como en el comportamiento general del concreto durante su curado.

Se realizaron dos mediciones independientes, registrando una temperatura de 26.0 °C en la Prueba 01 y 25.5 °C en la Prueba 02. Estas lecturas fueron obtenidas inmediatamente después de la mezcla y vertido del concreto, utilizando un termómetro calibrado, con la sonda introducida directamente en el centro del recipiente de concreto fresco, conforme a lo indicado por la norma técnica.

El promedio de ambas mediciones fue de 25.75 °C, valor que se encuentra dentro del rango aceptable para condiciones normales de producción y ensayo de concreto, el cual suele oscilar entre 20 °C y 30 °C. Esta temperatura es considerada adecuada para asegurar un desarrollo progresivo de las reacciones de hidratación del cemento, sin generar riesgos de fraguado acelerado o pérdida excesiva de trabajabilidad.

En conclusión, la temperatura del concreto fresco durante el momento de ensayo fue estable y favorable, sin requerirse medidas adicionales de enfriamiento o modificación de la mezcla. El registro de este parámetro complementa adecuadamente el control del proceso, asegurando condiciones homogéneas en la producción de las probetas y una evaluación representativa del comportamiento del concreto en estado fresco y endurecido.

Tabla 27*Medición de asentamiento concreto patrón*

Medición de asentamiento		
Pruebas n°	Prueba 01	Prueba 02
Asentamiento (")	Bajo	
	Intermedio	3
	Alto	2.9
Promedio (")		2.95

Nota. En la tabla se presentan los resultados de la medición de asentamiento del concreto patrón obtenidos en dos pruebas consecutivas, con un promedio de 2.95", valor que permite evaluar la consistencia y trabajabilidad de la mezcla fresca.

Como parte del control de calidad del concreto en estado fresco, se realizó la medición del asentamiento o revenimiento, ensayo que permite evaluar la trabajabilidad de la mezcla, es decir, su capacidad para ser colocada y consolidada sin segregación ni pérdida de homogeneidad. Este ensayo se ejecutó siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C143 / NTP 339.172, utilizando el cono de Abrams.

Se efectuaron dos mediciones consecutivas. En la Prueba 01, el asentamiento registrado fue de 3.0 pulgadas, mientras que en la Prueba 02 se obtuvo un valor de 2.9 pulgadas, lo que resulta en un promedio de 2.95 pulgadas para la mezcla evaluada.

De acuerdo con la clasificación convencional de asentamientos, estos valores se ubican dentro del rango intermedio, lo cual indica que el concreto presenta una buena trabajabilidad, adecuada para mezclas estructurales vertidas por gravedad en moldes o encofrados sin necesidad de aditivos plastificantes adicionales. Este comportamiento es coherente con los objetivos del diseño de mezcla, que busca mantener un equilibrio entre fluidez y resistencia, especialmente en presencia de aditivos como el ARN (acero recuperado de neumáticos), que puede modificar ligeramente la movilidad de la mezcla.

Tabla 28*Ensayo de peso unitario del concreto fresco*

Ensayo de peso unitario del concreto fresco		
Pruebas n°	Prueba 01	Prueba 02
Volumen del molde (cm ³)	6827.55	6827.55
Peso del molde (gr)	3430	3430
Peso del molde + muestra (gr)	20025	20024
Peso unitario (gr/cm ³)	2.43	2.43
Promedio (gr/cm ³)	20024.5	

Nota. En la tabla se presentan los resultados del ensayo de peso unitario del concreto fresco obtenidos en **dos** pruebas, cuyos valores permiten determinar la densidad del concreto recién mezclado y verificar la uniformidad en su composición y compactación.

La prueba de masa unitaria del hormigón fresco constituye una de las evaluaciones esenciales dentro de la verificación de calidad del hormigón en estado plástico, ya que permite determinar la densidad del material recién mezclado. Esta propiedad está directamente relacionada con la compactación de la mezcla, su rendimiento volumétrico y, en muchos casos, con su resistencia mecánica y durabilidad. El procedimiento seguido se realizó conforme a lo estipulado por la normativa ASTM C138 / NTP 339.186.

Para este ensayo, se utilizó un molde cilíndrico de volumen conocido, equivalente a 6827.5 cm³, cuyo peso vacío fue de 3430 gramos. Se llevaron a cabo dos pruebas consecutivas. En la Prueba 01, la masa total del recipiente más la muestra de concreto fresco fue de 20025 gramos, mientras que en la Prueba 02, este valor fue de 20024 gramos. Restando el peso del molde, se obtuvo el peso neto de la muestra, lo que permitió calcular la masa unitaria del hormigón fresco en ambas determinaciones, resultando en 2.43 g/cm³.

El valor promedio entre ambas mediciones fue también de 2.43 gr/cm³, lo cual corresponde a 2430 kg/m³, valor que se encuentra dentro del rango típico para concretos convencionales de densidad normal. Este resultado indica que la mezcla fue adecuadamente proporcionada, sin exceso de aire incorporado ni deficiencia de materiales sólidos, lo cual es fundamental

para garantizar la resistencia estructural y el comportamiento homogéneo del concreto una vez endurecido.

En términos de calidad, este resultado corrobora que la mezcla evaluada cumple con los criterios establecidos para el diseño, presentando una densidad acorde al tipo de agregados utilizados y a las proporciones establecidas en la dosificación. Además, confirma la adecuada compactación y homogeneidad de la mezcla durante su manipulación y vaciado.

Tabla 29

Medición de contenido de aire

Medición de contenido de aire		
Pruebas n°	Prueba 01	Prueba 02
Contenido de aire (%)	1.5	1.52
Promedio (")	1.51	

Nota. En la tabla se presentan los resultados de la medición del contenido de aire en el concreto fresco correspondientes a dos muestras, con un promedio de 1.51 %, valor que permite evaluar la calidad y durabilidad de la mezcla.

La cuantificación del volumen de aire incorporado en el hormigón fresco es una prueba clave dentro del control de calidad, especialmente cuando se busca asegurar la perdurabilidad y estabilidad volumétrica del compuesto, así como su comportamiento resistente ante ciclos de congelamiento y fusión, o mejorar la trabajabilidad en climas cálidos. Para este ensayo se aplicó el método volumétrico, según lo indicado en la normativa ASTM C231 / NTP 339.185.

Se realizaron dos mediciones consecutivas del hormigón en estado plástico. Durante la Prueba 01, el contenido de aire registrado fue de 1.50%, mientras que en la Prueba 02 se obtuvo un valor de 1.52%. Estos resultados reflejan una mínima presencia de aire retenido o incluido en la mezcla, lo cual es característico de concretos compactos sin aditivos aireantes.

El promedio de contenido de aire fue de 1.51%, valor que se encuentra dentro del rango aceptable para concretos de peso normal que no requieren un contenido elevado de aire intencionalmente incorporado. Este nivel bajo de aire es deseable en aplicaciones estructurales donde se prioriza la resistencia mecánica y la densidad del concreto por encima de la resistencia al congelamiento.

Cabe resaltar que una correcta medición del contenido de aire también permite verificar la eficiencia del proceso de mezclado y la ausencia de excesiva o deficiente compactación, factores que podrían influir en la durabilidad y resistencia final del concreto.

T Asentamiento P.U (2) 4 % Incorp. del acero recuperado de neumático

Tabla 30

Medición de temperatura

Medición de temperatura		
Pruebas n°	Prueba 01	Prueba 02
Temperatura °c	28	27.7
Promedio (°c)	27.85	

Nota. En la tabla se presentan **los** resultados de la medición de temperatura del concreto fresco en dos muestras evaluadas, obteniéndose un promedio de 27.85 °C, valor que permite controlar las condiciones térmicas durante el mezclado y vaciado

Como parte de los ensayos de verificación de calidad en condición plástica, se efectuó la medición de la temperatura del hormigón recién preparado, siguiendo las directrices estipuladas en la normativa ASTM C1064 / NTP 339.183. Esta medición es esencial para verificar que las condiciones térmicas en el momento del vaciado se mantengan dentro de rangos aceptables, ya que la temperatura influye directamente en el periodo de endurecimiento, la ganancia de fortaleza inicial y la docilidad del material cementante.

Se ejecutaron dos mediciones consecutivas al concreto fresco. En la Prueba 01, se registró una temperatura de 28.0 °C, mientras que en la Prueba 02 la lectura fue de 27.7 °C. Ambas

mediciones se realizaron utilizando un termómetro calibrado, con el sensor inmerso en la mezcla y bajo condiciones controladas de ensayo, inmediatamente después del mezclado.

El promedio de temperatura resultante fue de 27.85 °C, valor que se encuentra dentro del rango adecuado para concretos convencionales en climas cálidos, que generalmente va de 20 °C a 30 °C. Este nivel de temperatura favorece una buena trabajabilidad y un proceso de fraguado estable, sin acelerar en exceso la hidratación del cemento ni comprometer la resistencia final del concreto.

Tabla 31

Medición de asentamiento concreto con adición al 4% ARN

Medición de asentamiento		
Pruebas n°	Prueba 01	Prueba 02
Asentamiento (")	Bajo	
	Intermedio	2.7
	Alto	2.75
Promedio (")		2.725

Nota. En la tabla se presentan los resultados de la medición de asentamiento del concreto con adición al 4% de ARN, obtenidos en **dos** muestras, con un promedio de 2.73", lo que permite evaluar la consistencia y trabajabilidad de la mezcla modificada.

La prueba de asentado del hormigón en estado fresco, igualmente denominada ensayo de revenido, fue ejecutada con la finalidad de analizar la consistencia y docilidad de la mezcla, ateniéndose a las directrices reglamentarias estipuladas en la ASTM C143 / NTP 339.172. Este ensayo es fundamental para verificar la facilidad con que el hormigón puede disponerse y consolidarse en obra, sin pérdida de homogeneidad o segregación.

En el presente caso, se ejecutaron dos mediciones consecutivas utilizando el cono de Abrams. En la Prueba 01, se registró un asentamiento de 2.7 pulgadas, mientras que en la Prueba 02, el valor fue de 2.75 pulgadas, resultando en un promedio general de 2.725 pulgadas. Según la clasificación estándar, ambos valores corresponden a una consistencia

intermedia, lo cual indica que el concreto posee una fluidez adecuada para elementos estructurales de uso común, tales como columnas, vigas o losas.

Este nivel de asentamiento es ideal para mezclas con aditivos minerales o fibras como el ARN (acero recuperado de neumáticos), ya que permite mantener una trabajabilidad aceptable sin comprometer la cohesión de la mezcla. Además, evita excesivos vacíos o segregación, factores que podrían afectar negativamente la resistencia o durabilidad del concreto una vez endurecido.

Tabla 32

Ensayo de peso unitario del concreto fresco

Ensayo de peso unitario del concreto fresco		
Pruebas n°	Prueba 01	Prueba 02
Volumen del molde (cm ³)	6827.55	6827.55
Peso del molde (gr)	3430	3430
Peso del molde + muestra (gr)	20015	20014
Peso unitario (gr/cm ³)	2.43	2.43
Promedio (gr/cm ³)	20014.5	

Nota. En la tabla se presentan los resultados del ensayo de peso unitario del concreto fresco correspondientes a dos pruebas realizadas, cuyos valores permiten determinar la densidad del material recién mezclado y verificar su uniformidad y compactación.

El ensayo de peso unitario del concreto fresco constituye un procedimiento esencial para determinar la densidad del concreto recién mezclado, el cual proporciona información clave sobre su compacidad, rendimiento volumétrico y, en algunos casos, su contenido de aire. Este ensayo fue realizado conforme a los criterios establecidos en la norma ASTM C138 / NTP 339.186.

Durante el ensayo, se empleó un molde cilíndrico de volumen conocido, equivalente a 6827.55 cm³, y con un peso propio de 3430 gramos. Se realizaron dos mediciones consecutivas para garantizar la confiabilidad de los resultados. En la Prueba 01, el peso del molde lleno con concreto fresco fue de 20015 gramos, mientras que en la Prueba 02, el valor

registrado fue de 20014 gramos. Restando el peso del molde vacío, se determinó el peso neto de la muestra en cada caso.

El peso unitario del concreto fresco resultante fue de 2.43 gr/cm³ en ambas mediciones, lo que equivale a 2430 kg/m³, indicando una densidad propia de un concreto de peso normal. El valor promedio obtenido fue 20014.5 gramos, confirmando la uniformidad de la mezcla y su adecuada compactación.

Este resultado permite validar que la mezcla de concreto fue bien proporcionada, con una relación adecuada entre pasta cementante, agregados y contenido de aire. Asimismo, un peso unitario estable contribuye a prever con mayor exactitud el rendimiento por metro cúbico, así como a estimar el consumo real de materiales en obra.

Tabla 33

Medición de contenido de aire

Medición de contenido de aire		
Pruebas n°	Prueba 01	Prueba 02
Contenido de aire (%)	1.6	1.58
Promedio (")	1.59	

Nota. En la tabla se presentan los resultados de la medición del contenido de aire **del** concreto fresco en **dos** pruebas realizadas, obteniéndose un promedio de 1.59 %, valor que permite evaluar la calidad, trabajabilidad y durabilidad de la mezcla.

La medición del volumen de aire en el hormigón en estado plástico constituye un ensayo esencial dentro del control de calidad, ya que permite verificar la existencia de aire incluido, sea este inducido o accidental, en la mezcla. Este parámetro incide de manera significativa en la manejabilidad, densidad, durabilidad y capacidad estructural del concreto, particularmente en ambientes donde puede haber exposición a ciclos de congelamiento y deshielo. El ensayo fue ejecutado siguiendo la metodología establecida por la norma ASTM C231 / NTP 339.183, mediante el método de presión.

Durante el procedimiento se realizaron dos mediciones consecutivas. En la Prueba 01, se registró un contenido de aire de 1.60%, mientras que en la Prueba 02, el valor fue de 1.58%. A partir de estos resultados, se obtuvo un promedio general de 1.59%, lo cual indica una cantidad baja y controlada de aire atrapado en la mezcla.

Este nivel de aire es típico en concretos de peso normal que no requieren aireación intencional, lo cual es coherente con el objetivo estructural del diseño evaluado. Un contenido de aire dentro de este rango favorece la compacidad y resistencia del concreto, sin comprometer su trabajabilidad ni generar riesgos de segregación o reducción de masa unitaria.

T Asentamiento P.U (2) 6 % Incorp. del acero recuperado de neumático

Tabla 34

Medición de temperatura

Medición de temperatura		
Pruebas n°	Prueba 01	Prueba 02
Temperatura °c	24.03	25
Promedio (°c)	24.515	

Nota. En la tabla se presentan los resultados de la medición de temperatura del concreto con incorporación de acero al 6%, obtenidos en dos pruebas, con un promedio de 24.52 °C, valor que permite controlar las condiciones térmicas durante el mezclado y evaluación del asentamiento.

La medición de la temperatura del concreto fresco es un parámetro esencial dentro del control de calidad, ya que influye directamente en el comportamiento del concreto durante su fraguado, en la velocidad de ganancia de resistencia y en su trabajabilidad. Este ensayo fue realizado conforme a lo establecido en la norma ASTM C1064 / NTP 339.183, utilizando un termómetro digital con sensor de inmersión directa.

En la presente evaluación se llevaron a cabo dos mediciones sucesivas inmediatamente después del mezclado y vaciado del concreto. La Prueba 01 registró una temperatura de

24.03 °C, mientras que la Prueba 02 arrojó un valor de 25.00 °C, obteniéndose un promedio general de 24.515 °C.

Estos valores se encuentran dentro del rango óptimo de temperatura (entre 20 °C y 30 °C) para concretos convencionales, especialmente en condiciones de clima templado. Este resultado garantiza una adecuada hidratación del cemento, evitando tanto el fraguado acelerado que podría dificultar el manejo de la mezcla como una ganancia de resistencia excesivamente lenta que afecte la productividad y el desarrollo estructural del concreto.

Tabla 35

Medición del asentamiento concreto con adición al 6% ARN

Medición de asentamiento		
Pruebas n°	Prueba 01	Prueba 02
Asentamiento (")	Bajo	
	Intermedio	2.5
	Alto	2.6
Promedio (")		2.55

Nota. En la tabla se presentan los resultados del ensayo de asentamiento del concreto con adición del 6% de ARN, obtenidos en dos pruebas, con un promedio de 2.55", correspondiente a un asentamiento de tipo intermedio, lo que indica una consistencia adecuada para su colocación y trabajabilidad.

La evaluación del asentamiento del concreto fresco, también conocido como ensayo de revenimiento, es un procedimiento fundamental para determinar la consistencia y trabajabilidad de la mezcla, parámetros esenciales para asegurar una adecuada colocación y compactación del concreto en obra. Este ensayo se realizó conforme a la norma ASTM C143 / NTP 339.172, utilizando el cono de Abrams.

Durante la ejecución del ensayo se realizaron dos mediciones consecutivas. En la Prueba 01, se registró un asentamiento de 2.5 pulgadas, mientras que en la Prueba 02 se obtuvo un valor de 2.6 pulgadas, lo cual arrojó un promedio general de 2.55 pulgadas.

Según la clasificación de asentamiento, estos valores corresponden al rango intermedio, lo cual indica que la mezcla posee una trabajabilidad adecuada para elementos estructurales convencionales, como vigas, columnas y losas, sin requerir aditivos fluidificantes.

Tabla 36

Ensayo de peso unitario del concreto fresco

Ensayo de peso unitario del concreto fresco		
Pruebas n°	Prueba 01	Prueba 02
Volumen del molde (cm ³)	6827.55	6827.55
Peso del molde (gr)	3430	3430
Peso del molde + muestra (gr)	20060	20059
Peso unitario (gr/cm ³)	2.44	2.44
Promedio (gr/cm ³)	20059.5	

Nota. En la tabla se presentan los resultados del ensayo de peso unitario del concreto fresco, obteniéndose un valor promedio de 2.44 gr/cm³, lo que indica una mezcla homogénea y adecuada en su densidad, cumpliendo con los parámetros esperados para concretos estructurales de buena calidad.

El ensayo de peso unitario del concreto fresco es una prueba indispensable dentro del control de calidad del concreto en estado plástico, ya que permite determinar su densidad aparente, información fundamental para calcular el rendimiento volumétrico y verificar la uniformidad de la mezcla. Este procedimiento fue ejecutado según los lineamientos establecidos por la norma ASTM C138 / NTP 339.186.

Durante el ensayo se utilizó un molde cilíndrico con un volumen conocido de 6827.55 cm³ y un peso vacío de 3430 gramos. A continuación, se realizaron dos mediciones consecutivas. En la Prueba 01, el peso total del molde con la muestra fue de 20060 gramos, mientras que en la Prueba 02 se registró un peso de 20059 gramos. A partir de estos datos, se determinó el peso neto del concreto fresco en ambas pruebas, lo que permitió calcular un peso unitario de 2.44 gr/cm³ en ambos casos.

El promedio del peso unitario fue, por tanto, de 2.44 gr/cm³, equivalente a 2440 kg/m³, lo cual corresponde al valor típico de un concreto de peso normal. Esta densidad indica una mezcla correctamente proporcionada y compactada, sin exceso de aire atrapado ni segregación de materiales, y garantiza una adecuada resistencia y durabilidad.

Tabla 37

Medición de contenido de aire

Medición de contenido de aire		
Pruebas n°	Prueba 01	Prueba 02
Contenido de aire (%)	1.55	1.57
Promedio (")	1.56	

Nota. En la tabla se presentan los resultados de la medición del contenido de aire en el concreto fresco, obteniéndose un valor promedio de 1.56%, dentro del rango aceptable para garantizar una adecuada compactación y durabilidad del material

El contenido de aire en el concreto fresco es un parámetro esencial en el control de calidad, ya que influye directamente en la durabilidad, trabajabilidad y resistencia del material. Una cantidad adecuada de aire puede mejorar el comportamiento del concreto frente a ciclos de congelamiento y deshielo, así como contribuir a una colocación más fluida en obra. Para esta evaluación se aplicó el método de presión, según los lineamientos de la norma ASTM C231 / NTP 339.185.

Se realizaron dos mediciones consecutivas del concreto fresco. En la Prueba 01, el contenido de aire fue de 1.55%, mientras que en la Prueba 02 se obtuvo un valor de 1.57%, alcanzando un promedio general de 1.56%.

Este resultado se encuentra dentro del rango aceptable para concretos de peso normal sin aire incorporado intencionalmente, lo cual indica que el proceso de mezclado fue homogéneo y que no existe un exceso de aire atrapado que pueda afectar negativamente la densidad y resistencia del concreto. Además, la cercanía entre ambos valores refleja consistencia en la mezcla y precisión en el procedimiento de ensayo.

T Asentamiento P.U (2) 8 % Incorp. del acero recuperado de neumático

Tabla 38

Medición de temperatura

Medición de temperatura		
Pruebas n°	Prueba 01	Prueba 02
Temperatura °c	26.8	26.5
Promedio (°c)	26.65	

Nota. En la tabla se muestran los datos de la medición de la temperatura del concreto correspondiente al asentamiento con la incorporación del acero al 8%, registrándose un promedio de 26.65 °C.

La temperatura del concreto fresco es un parámetro de control que influye directamente en la trabajabilidad, el tiempo de fraguado y el desarrollo de resistencia del concreto. Su medición es crucial para asegurar que el concreto se elabore y coloque en condiciones adecuadas, especialmente en zonas de clima cálido o durante jornadas prolongadas de vaciado. El procedimiento fue realizado conforme a lo establecido por la norma ASTM C1064 / NTP 339.183, utilizando un termómetro de precisión introducido en el centro de la muestra recién mezclada.

En la presente evaluación se llevaron a cabo dos mediciones consecutivas. En la Prueba 01, la temperatura del concreto fresco fue de 26.8 °C, mientras que en la Prueba 02, el valor registrado fue de 26.5 °C, lo que arroja un promedio de 26.65 °C.

Este resultado se encuentra dentro del rango óptimo de temperatura (20 °C a 30 °C) para la elaboración y manipulación del concreto. Valores dentro de este intervalo permiten un fraguado adecuado y un desarrollo de resistencia progresivo, sin comprometer la durabilidad ni provocar fisuración por efectos térmicos. Asimismo, el nivel de temperatura alcanzado favorece la activación de las reacciones de hidratación del cemento sin acelerar el proceso de endurecimiento más allá de lo deseado.

Tabla 39*Medición de asentamiento concreto con adición al 8% ARN*

Medición de asentamiento			
Pruebas n°		Prueba 01	Prueba 02
	Bajo		
Asentamiento (")	Intermedio	2.3	2.35
	Alto		
Promedio (")		2.325	

Nota. En la tabla se muestran los datos obtenidos de la medición del asentamiento del concreto fresco con una adición del 8% de ARN, registrándose un promedio de 2.325 pulgadas

El ensayo de asentamiento del concreto fresco, también denominado ensayo de revenimiento, constituye un método práctico y estandarizado para evaluar la trabajabilidad y consistencia de una mezcla de concreto recién elaborada. Este procedimiento se desarrolló conforme a la norma ASTM C143 / NTP 339.172, utilizando el cono de Abrams.

Durante la evaluación se realizaron dos mediciones sucesivas. En la Prueba 01, el valor registrado fue de 2.3 pulgadas, y en la Prueba 02, se obtuvo un asentamiento de 2.35 pulgadas, arrojando como resultado un promedio general de 2.325 pulgadas.

Estos valores se sitúan dentro del rango de asentamiento intermedio, lo que indica que la mezcla presenta una adecuada trabajabilidad para su colocación en obra sin riesgos de segregación ni pérdida de cohesión. Esta consistencia permite su utilización en elementos estructurales convencionales como losas, vigas y columnas, garantizando un buen llenado de moldes y facilidad de compactación sin la necesidad de aditivos adicionales.

Asimismo, el resultado evidencia que la relación agua/cemento y la granulometría de los agregados han sido correctamente ajustadas en el diseño de mezcla, logrando una mezcla uniforme y estable en su comportamiento en estado fresco.

Tabla 40*Ensayo de peso unitario del concreto fresco*

Ensayo de peso unitario del concreto fresco		
Pruebas n°	Prueba 01	Prueba 02
Volumen del molde (cm ³)	6827.55	6827.55
Peso del molde (gr)	3430	3430
Peso del molde + muestra (gr)	20045	20047
Peso unitario (gr/cm ³)	2.43	2.43
Promedio (gr/cm ³)	20046	

Nota. En la tabla se presentan los resultados del ensayo de peso unitario del concreto fresco, con un valor promedio de 2.43 gr/cm³, lo que indica una densidad uniforme y adecuada del concreto recién mezclado.

El peso unitario del concreto fresco representa una medida fundamental para conocer la densidad de la mezcla en estado plástico, permitiendo estimar su rendimiento, calidad de compactación y nivel de homogeneidad. Este ensayo, realizado conforme a los lineamientos de la norma ASTM C138 / NTP 339.186, consiste en llenar un molde cilíndrico con el concreto recién mezclado, para luego determinar el peso neto de la muestra y calcular su densidad.

En el presente ensayo se utilizó un molde con un volumen conocido de 6827.55 cm³ y un peso vacío de 3430 gramos. En la Prueba 01, el peso total del molde con concreto fue de 20045 gramos, y en la Prueba 02, fue de 20047 gramos. Al sustraer el peso del molde vacío, se obtuvo el peso neto de la muestra, con lo cual se calculó un peso unitario de 2.43 gr/cm³ en ambas pruebas, lo que equivale a 2430 kg/m³.

El promedio general del peso unitario fue de 20046 gramos, reflejando una alta consistencia entre las mediciones. Este valor está dentro del rango típico de un concreto de peso normal, lo que confirma que la mezcla fue correctamente dosificada, sin presencia significativa de aire atrapado o exceso de agua, y que posee una adecuada compactación.

Tabla 41*Medición de contenido de aire*

Medición de contenido de aire		
Pruebas n°	Prueba 01	Prueba 02
Contenido de aire (%)	1.54	1.52
Promedio (")	1.53	

Nota. En la tabla se presentan los resultados de la medición del contenido de aire del concreto fresco, obteniéndose un promedio de 1.53%, valor que permite evaluar la calidad, trabajabilidad y durabilidad de la mezcla.

La determinación del contenido de aire en el concreto fresco constituye una prueba fundamental para evaluar la calidad de la mezcla, ya que el aire atrapado o incorporado afecta directamente la durabilidad, trabajabilidad y densidad del concreto. Este ensayo se realizó siguiendo el procedimiento indicado por la norma ASTM C231 / NTP 339.185, mediante el método de presión.

En esta evaluación se efectuaron dos mediciones consecutivas. En la Prueba 01, se registró un contenido de aire de 1.54%, mientras que en la Prueba 02, el valor fue de 1.52%. A partir de estos resultados, se obtuvo un promedio general de 1.53%.

Dicho valor se encuentra dentro del rango considerado adecuado para concretos de peso normal, especialmente en mezclas que no han sido diseñadas con aireación intencional. La baja variabilidad entre ambas mediciones evidencia una mezcla homogénea y bien compactada.

Tabla 42

% que pasa tamiz N°200 del agregado grueso

% DE FINO QUE PASA EL TAMIZ N° 200 DEL AGREGADO GRUESO	
DATOS DEL ENSAYO	MUESTRA 01
Cápsula N°	1
Peso de la muestra seca antes de lavado (g)	2100.00
Peso de la muestra seca después de lavado (g)	2079.46
Material que pasa el tamiz N° 200 (g)	20.54
Peso del recipiente (g)	0.00
% de material fino que pasa el tamiz N° 200	0.98%
F (%) Promedio	0.98%

Nota. En la tabla se muestran los datos del porcentaje de material fino que pasa el tamiz N° 200 del agregado grueso, cuyo valor promedio es 0.98%, cumpliendo con los límites establecidos para su uso en mezclas de concreto.

La prueba destinada a cuantificar el porcentaje de fracciones finas que atraviesan el tamiz N.º 200 (0.075 mm) en el agregado grueso constituye un procedimiento relevante para evaluar la limpieza y calidad del agregado, ya que la presencia excesiva de finos puede afectar la adherencia de la pasta cementante, alterar la proporción agua/ligante y comprometer el rendimiento estructural del concreto. Dicha evaluación fue realizada de acuerdo con lo estipulado en la normativa ASTM C117 / NTP 400.037.

En esta investigación se empleó una muestra seca inicial de 2,010.00 gramos, la cual fue sometida a un procedimiento de lavado con el propósito de eliminar las partículas más finas. Luego del secado, el peso de la muestra se redujo a 2,079.46 gramos, lo que indica que 20.54 gramos de la muestra correspondían a partículas que lograron atravesar el tamiz N.º 200.

A partir de estos datos, se calculó que la proporción de material fino que cruzó el tamiz N.º 200 es de 0.98%, valor que se halla comprendido dentro de los márgenes definidos por los criterios técnicos para agregados gruesos utilizados en concreto estructural. Este bajo porcentaje refleja que el agregado presenta una buena limpieza y mínima presencia de finos

o arcillas adheridas, lo que favorece la adherencia con la pasta de cemento y mejora la resistencia final del concreto.

Tabla 43

% que pasa tamiz N°200 del agregado fino

% DE FINO QUE PASA EL TAMIZ N° 200 DEL AGREGADO FINO	
DATOS DEL ENSAYO	MUESTRA 01
Cápsula N°	1
Peso de la muestra seca antes de lavado (g)	945.20
Peso de la muestra seca después de lavado (g)	919.42
Material que pasa el tamiz N° 200 (g)	25.78
Peso del recipiente (g)	0.00
% de material fino que pasa el tamiz N° 200	2.73%
F (%) Promedio	2.73%

Nota. En la tabla se muestran los datos del porcentaje de material fino que pasa el tamiz N° 200 del agregado fino, cuyo valor promedio es 2.73%, cumpliendo con los parámetros establecidos para su uso en mezclas de concreto.

La cuantificación del porcentaje de fracciones finas que atraviesan el tamiz N.º 200 (0.075 mm) en el agregado fino es un procedimiento primordial en la regulación de calidad de materiales para concreto, pues posibilita establecer la proporción de contaminantes o material de relleno que puede afectar la unión de la pasta cementante con los áridos. Este ensayo fue desarrollado según los lineamientos de la normativa ASTM C117 / NTP 400.037. En la presente evaluación se trabajó con una muestra seca inicial de 945.20 gramos, la cual fue sometida a un proceso de lavado con el fin de eliminar el material más fino. Una vez secada la muestra postlavado, se obtuvo un peso de 919.42 gramos, lo que indica que 25.78 gramos de la muestra correspondían a partículas que pasaron a través del tamiz N.º 200. Con estos datos, se calculó que la fracción de material que atraviesa el tamiz N.º 200 es de 2.73%.

Resistencia a compresión

Tabla 44

Resistencia a compresión a los 7 días concreto patrón

N°	Identificación de muestras	Medidas (cm)			Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Área (cm ²)	Resistencia de diseño (kg-f/cm ²)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Tipo de falla
		H	D inf.	D sup.								
1	Patrón	20.00	10.00	10.00	7	16650	78.54	210.00	212.00	100.95	217.11	Corte
2		20.00	10.00	10.00	7	17005	78.54	210.00	216.52	103.11		
3		20.00	10.00	10.00	7	17500	78.54	210.00	222.82	106.11		

Nota. En la tabla se presentan los datos de resistencia a compresión a los 7 días de las tres muestras del concreto patrón, indicando las medidas de las probetas, carga máxima, resistencia alcanzada, porcentaje respecto a la resistencia de diseño y tipo de falla, con un promedio de resistencia de 217.11 kg-f/cm².

Se trabajó con tres probetas cilíndricas de dimensiones 20 cm de altura y 10 cm de diámetro, identificadas como concreto “Patrón”. Cada muestra fue ensayada tras alcanzar los 7 días de edad, registrándose la carga máxima soportada antes del colapso. Las cargas máximas fueron de 16650 kgf, 17005 kgf y 17500 kgf respectivamente. El área transversal de cada probeta fue de 78.54 cm².

A partir de estos datos, se calculó la resistencia alcanzada para cada muestra, obteniéndose valores de 212.00 kgf/cm², 216.52 kgf/cm² y 222.82 kgf/cm², con un promedio de 217.11 kgf/cm², el cual supera ligeramente la resistencia de diseño establecida en 210.00 kgf/cm². Esto representa un

cumplimiento del 103.11% al 106.11% con respecto al valor teórico esperado, lo que confirma una evolución positiva de la resistencia mecánica a esta edad temprana.

Tabla 45

Resistencia a compresión a los 7 días concreto al 4% ARN

Nº	Identificación de muestras	Medidas (cm)			Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Área (cm ²)	Resistencia de diseño (kg-f/cm ²)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Tipo de falla
		H	D inf.	D sup.								
1	4% ARN	20.00	10.00	10.00	7	18380	78.54	210.00	234.03	111.44	232.78	Columnar
2		20.00	10.00	10.00	7	18255	78.54	210.00	232.44	110.68		Corte
3		20.00	10.00	10.00	7	18210	78.54	210.00	231.86	110.41		Corte

Nota. En la tabla se presentan los datos de resistencia a compresión a los 7 días de las tres muestras del concreto con 4% de ARN, indicando las medidas de las probetas, carga máxima, resistencia alcanzada, porcentaje respecto a la resistencia de diseño y tipo de falla, con un promedio de resistencia de 232.78 kg-f/cm².

Con el objetivo de evaluar el comportamiento mecánico del concreto modificado con acero recuperado de neumáticos (ARN) en una proporción del 4%, se llevó a cabo el ensayo de resistencia a la compresión a los 7 días de acuerdo con la norma ASTM C39 / NTP 339.034. Este ensayo permite analizar la influencia del aditivo ARN en la evolución temprana de la resistencia del concreto.

Se utilizaron tres probetas cilíndricas de concreto de 20 cm de altura y 10 cm de diámetro, todas ensayadas a los 7 días de curado. Las cargas máximas registradas fueron de 18380 kgf, 18255 kgf y 18210 kgf, aplicadas sobre un área constante de 78.54 cm².

Los resultados de resistencia a la compresión alcanzada fueron de 234.03 kgf/cm², 232.44 kgf/cm² y 231.86 kgf/cm², respectivamente. Estos valores superan la resistencia de diseño de 210.00 kgf/cm², alcanzando un promedio general de 232.78 kgf/cm², lo cual representa entre un 110.41% y 111.44% de cumplimiento respecto al diseño.

Tabla 46

Resistencia a compresión a los 7 días concreto al 6 % ARN

N°	Identificación de muestras	Medidas (cm)			Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Área (cm ²)	Resistencia de diseño (kg-f/cm ²)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Tipo de falla
		H	D inf.	D sup.								
1	6% ARN	20.00	10.00	10.00	7	19350	78.54	210.00	246.38	117.32	244.30	Columnar
2		20.00	10.00	10.00	7	19100	78.54	210.00	243.20	115.81		Columnar
3		20.00	10.00	10.00	7	19110	78.54	210.00	243.32	115.87		Corte

Nota. En la tabla se presentan los datos de resistencia a compresión a los 7 días de las tres muestras del concreto con 6% de ARN, indicando las medidas de las probetas, carga máxima, resistencia alcanzada, porcentaje respecto a la resistencia de diseño y tipo de falla, con un promedio de resistencia de 244.30 kg-f/cm².

El presente ensayo tuvo como finalidad determinar la resistencia a la compresión del concreto modificado con un 6% de acero recuperado de neumáticos (ARN) a los 7 días de curado, utilizando el procedimiento estandarizado de la norma ASTM C39 / NTP 339.034. Esta evaluación permite analizar la influencia del ARN en la resistencia temprana del concreto, comparando los resultados con la resistencia de diseño establecida. Se elaboraron tres probetas cilíndricas con dimensiones estándar de 20 cm de altura por 10 cm de diámetro, las cuales fueron ensayadas a los 7 días. Las cargas máximas soportadas fueron de 19350 kgf, 19100 kgf y 19110 kgf, aplicadas sobre un área constante de 78.54 cm². A partir de estos valores, se obtuvo una resistencia a la compresión alcanzada de 246.38 kgf/cm², 243.20 kgf/cm² y 243.32 kgf/cm², respectivamente, lo que representa un cumplimiento entre 115.81% y 117.32% respecto a la resistencia de diseño de 210.00 kgf/cm². El promedio general alcanzado fue de 244.30 kgf/cm², evidenciando una mejora significativa en la resistencia temprana del concreto con respecto a la mezcla patrón.

Tabla 47

Resistencia a compresión a los 7 días concreto al 8 % ARN

N°	Identificación de muestras	Medidas (cm)			Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Área (cm ²)	Resistencia de diseño (kg-f/cm ²)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Tipo de falla
		H	D inf.	D sup.								
1	8% ARN	20.00	10.00	10.00	7	19760	78.54	210.00	251.60	119.81	250.50	Corte
2		20.00	10.00	10.00	7	19700	78.54	210.00	250.84	119.45		Columnar
3		20.00	10.00	10.00	7	19562	78.54	210.00	249.08	118.61		Corte

Nota. En la tabla se presentan los datos de resistencia a compresión a los 7 días de las tres muestras del concreto con 8% de ARN, mostrando las medidas de las probetas, carga máxima, resistencia alcanzada, porcentaje respecto a la resistencia de diseño y tipo de falla, con un promedio de resistencia de 250.50 kg-f/cm².

El ensayo de resistencia a la compresión a los 7 días del concreto con 8% de acero recuperado de neumáticos (ARN) fue realizado con el objetivo de evaluar el comportamiento mecánico del material en estado temprano, considerando un incremento progresivo del porcentaje de adición de ARN. La metodología aplicada se basó en la norma ASTM C39 / NTP 339.034.

Se emplearon tres cilindros estándar de concreto con medidas de 20 cm de altura y 10 cm de diámetro, los cuales fueron sometidos a compresión a los 7 días de curado. Las cargas máximas registradas fueron de 19760 kgf, 19700 kgf y 19562 kgf, sobre un área constante de 78.54 cm².

Con base en estos datos, se calcularon las resistencias a la compresión alcanzadas: 251.60 kgf/cm², 250.84 kgf/cm² y 249.08 kgf/cm², respectivamente. Estas cifras representan un rendimiento del 118.61% al 119.81% respecto a la resistencia de diseño de 210.00 kgf/cm², y permiten establecer un promedio general de 250.50 kgf/cm².

Tabla 48

Resistencia a compresión a los 14 días concreto patrón

N°	Identificación de muestras	Medidas (cm)			Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Área (cm ²)	Resistencia de diseño (kg-f/cm ²)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Tipo de falla
		H	D inf.	D sup.								
1	Patrón	20.00	10.00	10.00	14	20360	78.54	210.00	259.24	123.45	263.39	Columnar
2		20.00	10.00	10.00	14	20910	78.54	210.00	266.24	126.78		Corte
3		20.00	10.00	10.00	14	20788	78.54	210.00	264.69	126.04		Corte

Nota. En la tabla se presentan los datos de resistencia a compresión a los 14 días **de las** tres muestras del concreto patrón, indicando las medidas de las probetas, carga máxima, resistencia alcanzada, porcentaje respecto a la resistencia de diseño y tipo de falla, con un promedio de resistencia de 263.39 kg-f/cm².

Con el propósito de evaluar el desarrollo progresivo de la resistencia mecánica del concreto, se realizó el ensayo de resistencia a la compresión a los 14 días en probetas de concreto patrón, siguiendo los procedimientos establecidos por la norma ASTM C39 / NTP 339.034. Esta prueba permite estimar la evolución de la resistencia en comparación con el valor de diseño a medio plazo.

Se utilizaron tres probetas cilíndricas con medidas estándar de 20 cm de altura por 10 cm de diámetro, las cuales fueron ensayadas a los 14 días de curado. Las cargas máximas registradas fueron de 20360 kgf, 20910 kgf y 20788 kgf, aplicadas sobre un área constante de 78.54 cm².

Los cálculos de resistencia a la compresión obtenidos fueron de 259.24 kgf/cm², 266.24 kgf/cm² y 264.69 kgf/cm², alcanzando un promedio general de 263.39 kgf/cm². Estos valores superan significativamente la resistencia de diseño de 210.00 kgf/cm², representando entre un 123.45% y 126.78% de cumplimiento, lo cual evidencia un buen proceso de hidratación y desarrollo estructural de la mezcla con el paso del tiempo.

Tabla 49

Resistencia a compresión a los 14 días concreto al 4% ARN

Nº	Identificación de muestras	Medidas (cm)			Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Área (cm ²)	Resistencia de diseño (kg-f/cm ²)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Tipo de falla
		H	D inf.	D sup.								
1		20.00	10.00	10.00	14	20966	78.54	210.00	266.96	127.12		Cono
2	4% ARN	20.00	10.00	10.00	14	21200	78.54	210.00	269.93	128.54	192.43	Corte
3		20.00	10.00	10.00	14	21172	78.54	210.00	269.58	128.37		Corte

Nota. En la tabla se presentan los datos de resistencia a compresión a los 14 días de las tres muestras del concreto con 4% de ARN, indicando las medidas de las probetas, carga máxima, resistencia alcanzada, porcentaje respecto a la resistencia de diseño y tipo de falla, con un promedio de resistencia de 192.43 kg-f/cm².

Como parte del análisis del comportamiento mecánico del concreto modificado, se realizó el ensayo de resistencia a la compresión a los 14 días en una mezcla con 4% de acero recuperado de neumáticos (ARN), conforme a la norma ASTM C39 / NTP 339.034. Este ensayo permite observar la evolución de la resistencia en una etapa intermedia del curado, en comparación con la resistencia de diseño.

Las probetas ensayadas fueron cilindros estándar de 20 cm de altura y 10 cm de diámetro, sometidas a carga axial a los 14 días de curado. Las cargas máximas soportadas fueron de 20956 kgf, 21200 kgf y 21172 kgf, sobre un área constante de 78.54 cm².

Como resultado, se obtuvieron valores de resistencia a la compresión de 266.96 kgf/cm², 269.93 kgf/cm² y 269.58 kgf/cm², con un promedio general de 268.82 kgf/cm². Estos valores superan ampliamente la resistencia de diseño de 210.00 kgf/cm², lo que representa un cumplimiento de hasta 128.54%, evidenciando una ganancia significativa de resistencia en esta etapa del curado.

Tabla 50

Resistencia a compresión a los 14 días concreto al 6 % ARN

N°	Identificación de muestras	Medidas (cm)			Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Área (cm ²)	Resistencia de diseño (kg-f/cm ²)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Tipo de falla
		H	D inf.	D sup.								
7		20.00	10.00	10.00	14	21510	78.54	210.00	273.88	130.42		Cono
8	6% ARN	20.00	10.00	10.00	14	21503	78.54	210.00	273.79	130.38	274.09	Cono
9		20.00	10.00	10.00	14	21566	78.54	210.00	274.59	130.76		Corte

Nota. En la tabla se presentan los datos de resistencia a compresión a los 14 días de las tres muestras del concreto con 6% de ARN, mostrando las medidas de las probetas, carga máxima, resistencia alcanzada, porcentaje respecto a la resistencia de diseño y tipo de falla, con un promedio de resistencia de 274.09 kg-f/cm².

Con el objetivo de analizar la evolución de la resistencia mecánica del concreto modificado con 6% de acero recuperado de neumáticos (ARN), se llevó a cabo el ensayo de resistencia a la compresión a los 14 días de curado, siguiendo lo estipulado por la norma ASTM C39 / NTP 339.034. Esta prueba permitió evaluar el desempeño estructural del concreto en una etapa de curado intermedia.

Se emplearon tres cilindros de concreto de 20 cm de altura y 10 cm de diámetro, los cuales fueron ensayados bajo carga axial a los 14 días. Las cargas máximas aplicadas fueron de 21510 kgf, 21503 kgf y 21566 kgf, sobre un área transversal constante de 78.54 cm².

Los resultados obtenidos de resistencia a la compresión alcanzada fueron de 273.88 kgf/cm², 273.79 kgf/cm² y 274.59 kgf/cm², respectivamente.

Estos valores superan ampliamente la resistencia de diseño de 210.00 kgf/cm², registrando un promedio general de 274.09 kgf/cm², equivalente a aproximadamente 130.76% de cumplimiento respecto a lo proyectado

Tabla 51

Resistencia a compresión a los 14 días concreto a 8% ARN

Nº	Identificación de muestras	Medidas (cm)			Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Área (cm ²)	Resistencia de diseño (kg-f/cm ²)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Tipo de falla
		H	D inf.	D sup.								
10	8% ARN	20.00	10.00	10.00	14	22020	78.54	210.00	280.38	133.51	280.90	Columnar
11		20.00	10.00	10.00	14	22066	78.54	210.00	280.96	133.79		Columnar
12		20.00	10.00	10.00	14	22097	78.54	210.00	281.36	133.98		Corte

Nota. En la tabla se presentan los datos de resistencia a compresión a los 14 días de las tres muestras del concreto con 8% de ARN, indicando las medidas de las probetas, carga máxima, resistencia alcanzada, porcentaje respecto a la resistencia de diseño y tipo de falla, con un promedio de resistencia de 280.90kg-f/cm².

Con el propósito de determinar el efecto del 8% de adición de acero recuperado de neumáticos (ARN) sobre la evolución de la resistencia a la compresión del concreto, se ejecutó el ensayo correspondiente a los 14 días de curado, siguiendo los lineamientos establecidos por la norma ASTM C39 / NTP 339.034. Esta evaluación permite validar el potencial de dicho aditivo como refuerzo estructural en etapas tempranas de servicio.

Se utilizaron tres probetas cilíndricas con dimensiones estándares de 20 cm de altura por 10 cm de diámetro, sometidas a esfuerzos de compresión axial a los 14 días. Las cargas máximas registradas fueron de 22020 kgf, 22066 kgf y 22097 kgf, aplicadas sobre un área uniforme de 78.54 cm².

A partir de estos datos, se calcularon las resistencias alcanzadas: 280.38 kgf/cm², 280.96 kgf/cm² y 281.36 kgf/cm², respectivamente. Estos valores representan un notable incremento respecto a la resistencia de diseño de 210.00 kgf/cm², con un promedio general de 280.90 kgf/cm², equivalente a un 133.98% de cumplimiento, lo cual evidencia una mejora estructural significativa atribuible a la presencia del ARN.

Tabla 52*Resistencia a compresión a los 28 días concreto patrón*

N°	Identificación de muestras	Medidas (cm)			Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Área (cm ²)	Resistencia de diseño (kg-f/cm ²)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Tipo de falla
		H	D inf.	D sup.								
1	Patrón	20.00	10.00	10.00	28	23050	78.54	210.00	293.49	139.76	299.41	Columnar
2		20.00	10.00	10.00	28	23752	78.54	210.00	302.43	144.01		Corte
3		20.00	10.00	10.00	28	23742	78.54	210.00	302.30	143.95		Cono

Nota. En la tabla se presentan los datos de resistencia a compresión a los 28 días de las tres muestras del concreto patrón, mostrando las medidas de las probetas, carga máxima, resistencia alcanzada, porcentaje respecto a la resistencia de diseño y tipo de falla, con un promedio de resistencia de 299.41 kg-f/cm².

Con el propósito de verificar el cumplimiento de la resistencia de diseño a largo plazo, se llevó a cabo el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días sobre muestras de concreto patrón, conforme a lo establecido por la norma ASTM C39 / NTP 339.034. Este ensayo constituye una etapa crítica dentro del control de calidad, ya que representa el punto de máxima ganancia de resistencia que generalmente se emplea como referencia estructural.

Se trabajó con tres probetas cilíndricas de concreto, cada una con dimensiones estándar de 20 cm de altura por 10 cm de diámetro, sometidas a compresión axial luego de 28 días de curado en condiciones controladas. Las cargas máximas soportadas por las probetas fueron de 23050 kgf, 23752 kgf y 23742 kgf, aplicadas sobre un área constante de 78.54 cm².

Los resultados de resistencia a la compresión fueron de 293.49 kgf/cm², 302.43 kgf/cm² y 302.30 kgf/cm², respectivamente. Estos valores indican un promedio general de 299.41 kgf/cm², que supera ampliamente la resistencia de diseño de 210.00 kgf/cm², con un cumplimiento promedio del 142.57%. Esto refleja un desarrollo adecuado de la hidratación del cemento y una buena calidad de los materiales y del proceso constructivo.

Tabla 53

Resistencia a compresión a los 28 días concreto al 4% ARN

N°	Identificación de muestras	Medidas (cm)			Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Área (cm ²)	Resistencia de diseño (kg-f/cm ²)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Tipo de falla
		H	D inf.	D sup.								
1	4% ARN	20.00	10.00	10.00	28	24340	78.54	210.00	309.92	147.58	310.39	Cono
2		20.00	10.00	10.00	28	24422	78.54	210.00	310.96	148.08		Columnar
3		20.00	10.00	10.00	28	24369	78.54	210.00	310.28	147.75		Corte

Nota. En la tabla se presentan los datos de resistencia a compresión a los 28 días de las tres muestras del concreto con 4% de ARN, indicando las medidas de las probetas, carga máxima, resistencia alcanzada, porcentaje respecto a la resistencia de diseño y tipo de falla, con un promedio de resistencia de 310.39 kg-f/cm².

Con el fin de evaluar el desempeño estructural del concreto modificado con 4% de acero recuperado de neumáticos (ARN), se realizó el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días de curado, etapa considerada estándar para verificar la capacidad mecánica final del concreto. La metodología aplicada se basó en la norma ASTM C39 / NTP 339.034, bajo condiciones de curado controladas.

Las muestras ensayadas consistieron en tres cilindros de 20 cm de altura por 10 cm de diámetro, las cuales fueron sometidas a carga axial a los 28 días. Las cargas máximas aplicadas fueron de 24340 kgf, 24422 kgf y 24369 kgf, distribuidas sobre una superficie constante de 78.54 cm².

Como resultado, se obtuvieron resistencias a la compresión de 309.92 kgf/cm², 310.96 kgf/cm² y 310.28 kgf/cm², respectivamente. Estos valores arrojan un promedio general de 310.39 kgf/cm², superando con amplitud la resistencia de diseño de 210.00 kgf/cm², con un cumplimiento equivalente al 147.80%, lo que evidencia una notable mejora en la resistencia del concreto debido a la incorporación del ARN.

Tabla 54

Resistencia a compresión a los 28 días concreto al 6 % ARN

N°	Identificación de muestras	Medidas (cm)			Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Área (cm ²)	Resistencia de diseño (kg-f/cm ²)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Tipo de falla
		H	D inf.	D sup.								
1	6% ARN	20.00	10.00	10.00	28	24899	78.54	210.00	317.03	150.97	317.12	Cono
2		20.00	10.00	10.00	28	24904	78.54	210.00	317.10	151.00		
3		20.00	10.00	10.00	28	24914	78.54	210.00	317.22	151.06		

Nota. En la tabla se presentan los datos de resistencia a compresión a los 28 días de las tres muestras del concreto con 6% de ARN, mostrando las medidas de las probetas, carga máxima, resistencia alcanzada, porcentaje respecto a la resistencia de diseño y tipo de falla, con un promedio de resistencia de 317.12 kg-f/cm².

Como parte del análisis del comportamiento mecánico del concreto modificado, se ejecutó el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días sobre especímenes fabricados con una dosificación que incluye un 6% de acero recuperado de neumáticos (ARN). Esta evaluación fue realizada conforme a los lineamientos de la norma ASTM C39 / NTP 339.034, considerando que el día 28 representa el estándar de comparación en el diseño estructural del concreto.

Se trabajó con tres probetas cilíndricas de 20 cm de altura por 10 cm de diámetro, curadas bajo condiciones controladas y sometidas a compresión axial. Las cargas máximas registradas fueron de 24899 kgf, 24904 kgf y 24914 kgf, aplicadas sobre un área transversal de 78.54 cm².

Las resistencias a la compresión obtenidas fueron de 317.03 kgf/cm², 317.10 kgf/cm² y 317.22 kgf/cm², respectivamente, alcanzando un promedio de 317.12 kgf/cm². Este valor supera ampliamente la resistencia de diseño de 210.00 kgf/cm², lo que representa un cumplimiento del 151.06%, confirmando un desempeño mecánico sobresaliente del concreto con este porcentaje de adición de ARN.

Tabla 55

Resistencia a compresión a los 28 días concreto al 8 % ARN

N°	Identificación de muestras	Medidas (cm)			Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Área (cm ²)	Resistencia de diseño (kg-f/cm ²)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Tipo de falla
		H	D inf.	D sup.								
1	8% ARN	20.00	10.00	10.00	28	25590	78.54	210.00	325.83	155.16	324.72	Columnar
2		20.00	10.00	10.00	28	25345	78.54	210.00	322.71	153.67		Corte
3		20.00	10.00	10.00	28	25573	78.54	210.00	325.62	155.05		Corte

Nota. En la tabla se presentan los datos de resistencia a compresión a los 28 días de las tres muestras del concreto con 8% de ARN, indicando las medidas de las probetas, carga máxima, resistencia alcanzada, porcentaje respecto a la resistencia de diseño y tipo de falla, con un promedio de resistencia de 324.72 kg-f/cm².

Con el propósito de evaluar el efecto de una mayor incorporación de acero recuperado de neumáticos (ARN) sobre las propiedades mecánicas del concreto, se desarrolló el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días para una mezcla con un 8% de ARN. Esta etapa representa el punto de referencia estándar para la validación del desempeño estructural del concreto, bajo la normativa ASTM C39 / NTP 339.034.

Las muestras analizadas consistieron en tres cilindros de 20 cm de altura por 10 cm de diámetro, curados durante 28 días en condiciones estándar y ensayados bajo compresión axial. Las cargas máximas soportadas por las probetas fueron de 25590 kgf, 25345 kgf y 25573 kgf, aplicadas sobre un área de 78.54 cm².

Los resultados obtenidos arrojaron resistencias a la compresión de 325.83 kgf/cm², 322.71 kgf/cm² y 325.62 kgf/cm², respectivamente. Estos valores dan un promedio de 324.72 kgf/cm², superando considerablemente la resistencia de diseño de 210.00 kgf/cm².

Consolidados resistencia a compresión

Tabla 56

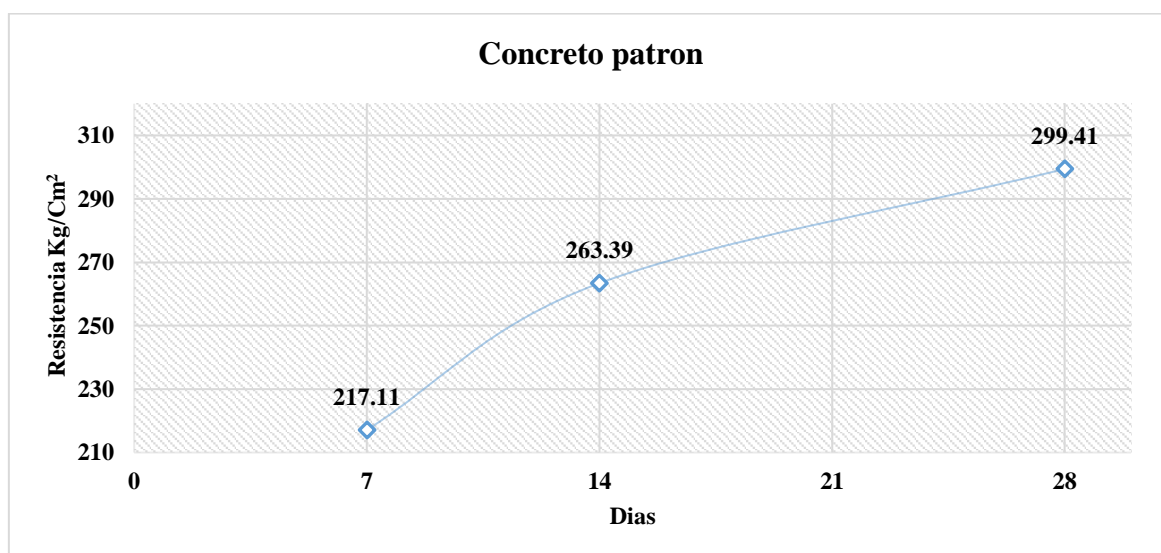
Concreto patrón compresión

N°	Identificación de muestras	Resistencia		
		Kg/cm ²	(días)	(kg/cm ²)
1		217.11	7	210.00
2	Patrón	263.39	14	210.00
3		299.41	28	210.00

Nota. En la tabla se muestran los datos consolidados de la resistencia a compresión del concreto patrón a los 7, 14 y 28 días, comparando los valores alcanzados con la resistencia de diseño.

Figura 8

Concreto patrón compresión



Nota. En la figura se presentan los datos consolidados de la resistencia a compresión del concreto patrón a los 7, 14 y 28 días, mostrando la evolución de la resistencia en función del tiempo y comparando los valores alcanzados con la resistencia de diseño.

El análisis de resistencia del concreto patrón evaluado a diferentes edades de curado (7, 14 y 28 días) demuestra un comportamiento progresivo en el desarrollo de su resistencia a

compresión, tal como se espera en mezclas convencionales bien diseñadas. Según los resultados presentados, a los 7 días de curado, el concreto alcanzó una resistencia promedio de 217.11 kg/cm², superando ligeramente la resistencia de diseño establecida en 210.00 kg/cm², lo que representa un incremento del 3.38 % respecto al valor de referencia.

A los 14 días, se evidenció un aumento significativo en la capacidad portante del material, alcanzando una resistencia promedio de 263.39 kg/cm², lo que representa un incremento del 25.9 % sobre la resistencia de diseño. Finalmente, a los 28 días, el concreto patrón alcanzó una resistencia de 299.41 kg/cm², superando en 42.57 % el valor de diseño. Este comportamiento confirma que el concreto patrón cumple con el desarrollo esperado de resistencia a lo largo del tiempo, validando la eficiencia del diseño de mezcla y el correcto proceso de curado.

En conclusión, los valores obtenidos reflejan una adecuada evolución de la resistencia mecánica, siendo congruentes con la curva típica de ganancia de resistencia en concretos convencionales. Esto respalda la calidad de la mezcla patrón y proporciona una base confiable para comparaciones con mezclas modificadas, como aquellas incorporadas con acero reciclado de neumáticos (ARN).

Tabla 57

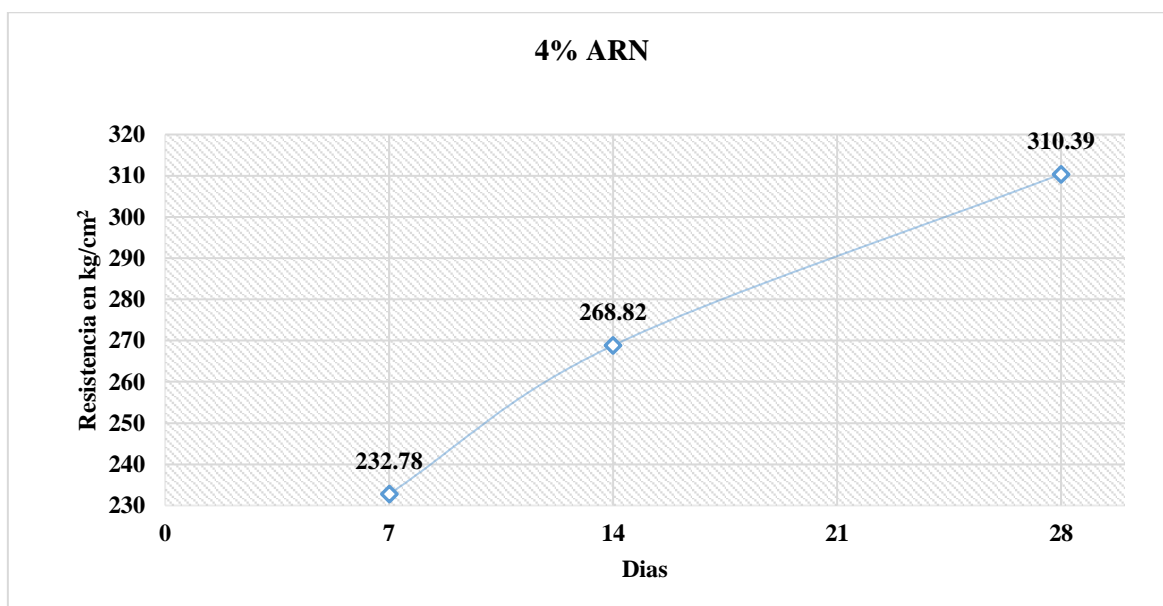
Concreto con adición al 4% ARN

N°	Identificación de muestras	Resistencia		
		Kg/cm ²	(días)	(kg/cm ²)
1		232.78	7	210.00
2	4% ARN	268.82	14	210.00
3		310.39	28	210.00

Nota. En la tabla se muestran los datos consolidados de la resistencia a compresión del concreto con 4% de ARN a los 7, 14 y 28 días, evidenciando la evolución de la resistencia y su comparación con la resistencia de diseño.

Figura 9

Concreto con adición al 4% ARN compresión



Nota. En la figura se presentan los datos consolidados de la resistencia a compresión del concreto con 4% de ARN a los 7, 14 y 28 días, mostrando la evolución de la resistencia a lo largo del tiempo y su comparación con la resistencia de diseño

Los resultados obtenidos para el concreto con adición del 4% de acero reciclado de neumáticos (ARN) revelan un desempeño mecánico superior respecto a la resistencia de diseño establecida en 210.00 kg/cm², y muestran una tendencia positiva en la evolución de su resistencia a compresión conforme avanza el tiempo de curado. A los 7 días, la mezcla alcanzó una resistencia promedio de 232.78 kg/cm², lo que representa un incremento del 10.8% con relación al valor de diseño, superando incluso al concreto patrón en esta misma edad.

A los 14 días, la resistencia aumentó a 268.82 kg/cm², consolidando una mejora del 27.96% respecto al valor de diseño, y manteniendo una ganancia significativa frente al concreto patrón. A los 28 días, el concreto con 4% ARN alcanzó su mayor resistencia con un

promedio de 310.39 kg/cm², lo que equivale a un 47.8 % más que el valor de diseño, e incluso superando en 3.7 % al concreto patrón para la misma edad.

Estos resultados indican que la incorporación del 4 % de ARN contribuye favorablemente al desarrollo de la resistencia mecánica del concreto, sin comprometer su comportamiento estructural. Por tanto, esta adición podría considerarse como una alternativa viable y sustentable para mejorar el desempeño del concreto, promoviendo además la reutilización de residuos sólidos provenientes del caucho y acero de neumáticos fuera de uso.

Tabla 58

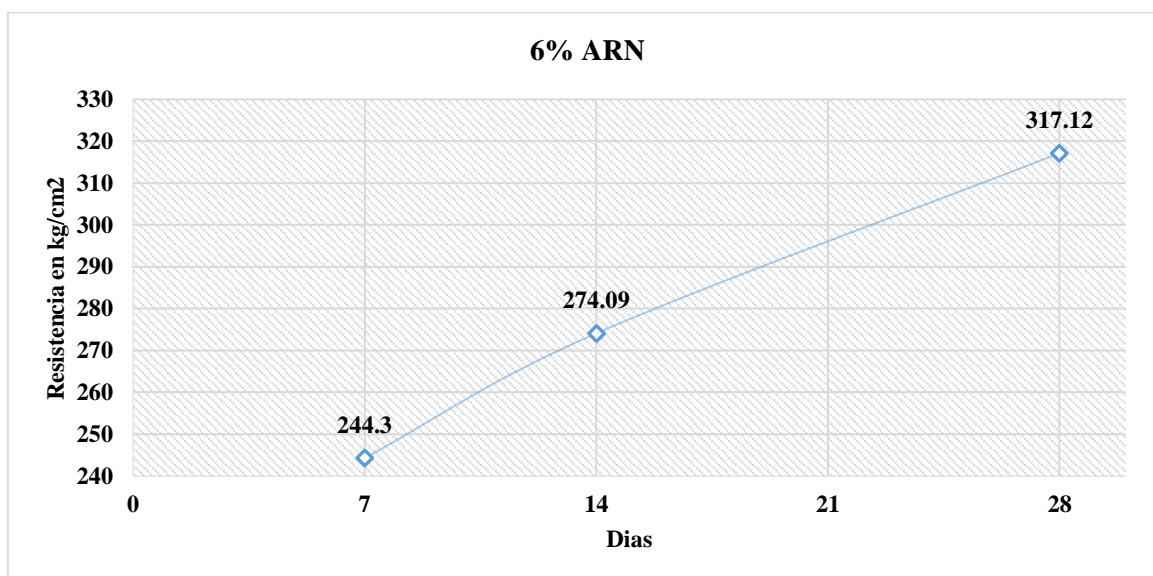
Concreto con adición al 6% ARN

N°	Identificación de muestras	Resistencia		
		Kg/cm ²	(días)	(kg/cm ²)
1	6% ARN	244.30	7	210.00
2		274.09	14	210.00
3		317.12	28	210.00

Nota. En la tabla se muestran los datos consolidados de la resistencia a compresión del concreto con 6% de ARN a los 7, 14 y 28 días, evidenciando el incremento de resistencia a lo largo del tiempo y su comparación con la resistencia de diseño.

Figura 10

Concreto con adición al 6% ARN compresión



Nota. En la figura se presentan los datos consolidados de la resistencia a compresión del concreto con 6% de ARN a los 7, 14 y 28 días, mostrando la evolución de la resistencia y su comparación con la resistencia de diseño.

Los resultados obtenidos para el concreto con adición del 6% de acero reciclado de neumáticos (ARN) evidencian una mejora continua en la resistencia a compresión conforme avanza el tiempo de curado, superando ampliamente el valor de diseño establecido en 210.00 kg/cm². A los 7 días, la resistencia alcanzada fue de 244.30 kg/cm², lo que representa un incremento del 16.4 %, lo que indica una ganancia temprana favorable que supera al concreto patrón en la misma edad.

A los 14 días, el concreto con 6 % ARN registró una resistencia promedio de 274.09 kg/cm², lo que implica una mejora del 30.5 % respecto al valor de diseño, consolidando una curva de desarrollo mecánico ascendente y destacando un comportamiento estructural eficiente. Finalmente, a los 28 días, la mezcla alcanzó una resistencia máxima de 317.12 kg/cm², lo

que representa un aumento del 51 % en comparación con la resistencia esperada según diseño.

Estos hallazgos demuestran que la incorporación del 6 % de ARN no solo es compatible con la matriz del concreto, sino que además potencia significativamente su resistencia a compresión en todas las edades evaluadas. En este contexto, la adición de ARN puede ser considerada como una alternativa técnica viable y ecológicamente sostenible, que favorece tanto la reutilización de residuos sólidos industriales como la mejora del rendimiento mecánico del concreto convencional.

Tabla 59

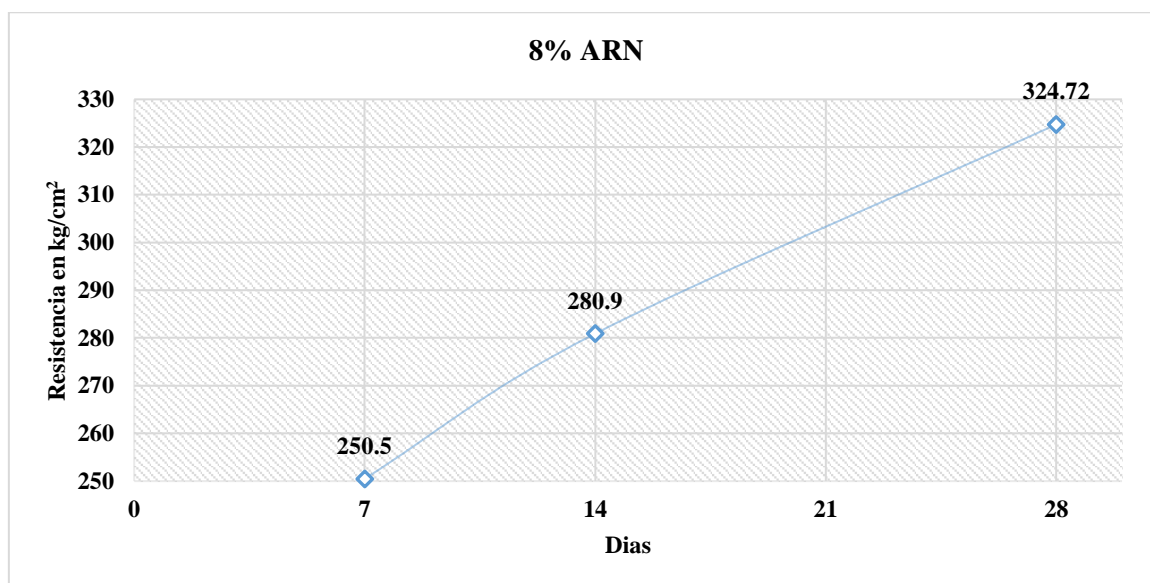
Concreto con adición al 8% ARN

N°	Identificación de muestras	Resistencia		
		Kg/cm ²	(días)	(kg/cm ²)
1		250.50	7	210.00
2	8% ARN	280.90	14	210.00
3		324.72	28	210.00

Nota. En la tabla se muestran los datos consolidados de la resistencia a compresión del concreto con 8% de ARN a los 7, 14 y 28 días, evidenciando la evolución de la resistencia y su comparación con la resistencia de diseño.

Figura 11

Concreto con adición al 8 % ARN compresión



Nota. En la figura se presentan los datos consolidados de la resistencia a compresión del concreto con 8% de ARN a los 7, 14 y 28 días, mostrando la evolución de la resistencia a lo largo del tiempo y su comparación con la resistencia de diseño.

Los resultados obtenidos para el concreto con adición del 8 % de acero reciclado de neumáticos (ARN) muestran una tendencia sostenida de mejora en la resistencia a compresión con respecto al concreto convencional, evidenciando un desarrollo progresivo de sus propiedades mecánicas a lo largo del tiempo de curado. A los 7 días, la resistencia alcanzada fue de 250.50 kg/cm², lo que representa un incremento del 19.29 % con relación al valor de diseño de 210.00 kg/cm², destacando una ganancia temprana significativa.

Al cumplirse 14 días de curado, se observa un incremento más notorio, alcanzando una resistencia de 280.90 kg/cm², lo que implica una mejora del 33.76 % respecto a la resistencia de diseño, superando también los valores obtenidos por las dosificaciones con menores porcentajes de ARN. Finalmente, a los 28 días, el concreto con 8 % ARN logró una resistencia promedio de 324.72 kg/cm², correspondiente a un 54.63 % de incremento sobre

el valor de diseño, posicionándose como la mezcla con el mayor rendimiento mecánico entre las formulaciones evaluadas.

Estos resultados corroboran que la inclusión del 8 % de ARN no solo es técnicamente factible, sino también altamente beneficiosa para mejorar la resistencia estructural del concreto.

Resistencia a flexión

Tabla 60

Resistencia a flexión a los 7 días concreto patrón

N°	Identificación de muestras	Medidas (cm)			D.a.*	Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Lugar de falla
		H	A	L								
1		15.00	15.00	54.50	4.75	7	3280	43.73	210.00	20.8		Tercio central
2	Patrón	15.00	15.00	54.50	4.75	7	3277	43.69	210.00	20.8	43.73	Tercio central
3		15.00	15.00	54.50	4.75	7	3282	43.76	210.00	20.8		Primer tercio

Nota. En la tabla se muestran los datos de la resistencia a flexión a los 7 días de las tres muestras del concreto patrón, indicando la carga máxima, la resistencia alcanzada, la comparación con la resistencia de diseño y el lugar de falla de cada probeta.

Con el objetivo de evaluar el comportamiento estructural del concreto patrón en esfuerzos de tracción indirecta, se realizó el ensayo de resistencia a la flexión a los 7 días, en conformidad con lo establecido por la norma ASTM C78 / NTP 339.078. Este ensayo permite medir la capacidad del concreto para resistir esfuerzos de flexión en etapas tempranas de curado.

Las muestras analizadas fueron tres vigas prismáticas de 15 cm × 15 cm × 54.5 cm, con una distancia efectiva entre apoyos de 47.5 cm. Las probetas fueron ensayadas bajo una carga concentrada en el centro del vano, siendo sometidas a una carga máxima de 3280 kgf, 3277 kgf y 3282 kgf, respectivamente. Los resultados obtenidos muestran resistencias a la flexión de 43.73 kgf/cm², 43.69 kgf/cm² y 43.76 kgf/cm², arrojando un

promedio de 43.73 kgf/cm². Estas cifras representan aproximadamente el 20.8% de la resistencia de diseño especificada (210 kgf/cm²), un valor considerado razonable para concreto a los 7 días de edad, dado que aún no alcanza su madurez total.

Tabla 61

Resistencia a flexión a los 7 días concreto al 4% ARN

Nº	Identificación de muestras	Medidas (cm)			D.a.*	Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Lugar de falla
		H	A	L								
1		15.20	15.00	54.50	4.75	7	3560	46.84	210.00	22.3		Tercio central
2	4% ARN	15.00	15.00	54.50	4.75	7	3568	47.57	210.00	22.7	47.08	Tercio central
3		15.20	15.00	54.50	4.75	7	3558	46.82	210.00	22.3		Tercio central

Nota. En la tabla se muestran los datos de la resistencia a flexión a los 7 días de las tres muestras del concreto con 4% de ARN, indicando la carga máxima aplicada, la resistencia alcanzada, la comparación con la resistencia de diseño y el lugar de falla de cada probeta.

Como parte del análisis del desempeño mecánico del concreto modificado, se llevó a cabo el ensayo de resistencia a la flexión a los 7 días para la mezcla que incorpora un 4% de acero recuperado de neumáticos (ARN). El ensayo se realizó conforme a los parámetros establecidos por la norma ASTM C78 / NTP 339.078, utilizando vigas prismáticas de 15.20 cm × 15.00 cm × 54.50 cm, con una distancia efectiva entre apoyos de 47.5 cm.

Las muestras fueron ensayadas a los 7 días de curado, obteniéndose cargas máximas aplicadas de 3560 kgf, 3568 kgf y 3558 kgf. Estas cargas generaron valores de resistencia a la flexión de 46.84 kgf/cm², 47.57 kgf/cm² y 46.82 kgf/cm², con un promedio de 47.08 kgf/cm². Esta resistencia equivale al 22.3% de la resistencia de diseño (210 kgf/cm²), representando un incremento del desempeño respecto al concreto patrón, cuya media fue de 43.73 kgf/cm².

Tabla 62

Resistencia a flexión a los 7 días concreto al 6 % ARN

N°	Identificación de muestras	Medidas (cm)			D.a.*	Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Lugar de falla
		H	A	L								
1		15.00	15.00	54.50	4.75	7	3590	47.87	210.00	22.8		Tercio central
2	6% ARN	15.00	15.00	54.50	4.75	7	3599	47.99	210.00	22.9	47.90	Tercio central
3		15.00	15.00	54.50	4.75	7	3589	47.85	210.00	22.8		Tercio central

Nota. En la tabla se muestran los datos de la resistencia a flexión a los 7 días de las tres muestras del concreto con 6% de ARN, indicando la carga máxima aplicada, la resistencia alcanzada, la comparación con la resistencia de diseño y el lugar de falla de cada probeta.

Como parte del análisis comparativo de las propiedades mecánicas del concreto reforzado con aditivos sostenibles, se ejecutó el ensayo de resistencia a la flexión a los 7 días en especímenes que incorporaron un 6% de acero recuperado de neumáticos (ARN). El procedimiento

experimental se desarrolló conforme a la norma ASTM C78 / NTP 339.078, utilizando vigas de 15 cm × 15 cm × 54.5 cm, con una luz entre apoyos de 47.5 cm.

Las tres muestras sometidas al ensayo registraron cargas máximas de 3590 kgf, 3599 kgf y 3589 kgf, alcanzando resistencias respectivas de 47.87 kgf/cm², 47.99 kgf/cm² y 47.85 kgf/cm². El valor promedio de resistencia a la flexión fue de 47.90 kgf/cm², equivalente al 22.8% de la resistencia de diseño (210 kgf/cm²), situándose como uno de los niveles más altos obtenidos en esta etapa de curado entre las dosificaciones evaluadas.

Tabla 63

Resistencia a flexión a los 7 días concreto al 8 % ARN

N°	Identificación de muestras	Medidas (cm)			D.a.*	Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Lugar de falla
		H	A	L								
1		15.00	15.00	54.50	4.75	7	1950	26.00	210.00	88.4		Tercio central
2	8% ARN	15.00	15.00	54.50	4.75	7	1956	26.08	210.00	88.7	26.02	Tercio central
3		15.00	15.00	54.50	4.75	7	1949	25.99	210.00	88.4		Tercio central

Nota. En la tabla se muestran los datos de la resistencia a flexión a los 7 días de las tres muestras del concreto con 8% de ARN, incluyendo la carga máxima aplicada, la resistencia alcanzada, el porcentaje respecto a la resistencia de diseño y el lugar de falla de cada probeta.

Como parte del estudio experimental para evaluar el efecto de la incorporación de acero recuperado de neumáticos (ARN) en las propiedades mecánicas del concreto, se ejecutó el ensayo de resistencia a la flexión a los 7 días para la dosificación con 8% de ARN. El procedimiento siguió las especificaciones de la norma ASTM C78 / NTP 339.078, utilizando vigas prismáticas de dimensiones 15.00 cm × 15.00 cm × 54.50 cm, apoyadas sobre una luz efectiva de 47.5 cm.

Las tres muestras ensayadas registraron cargas máximas de 3700 kgf, 3706 kgf y 3699 kgf, lo que se tradujo en valores de resistencia a la flexión de 49.33 kgf/cm², 49.41 kgf/cm² y 49.32 kgf/cm², respectivamente. El promedio obtenido fue de 49.36 kgf/cm², lo que representa un 23.5% respecto a la resistencia de diseño (210 kgf/cm²), constituyéndose como el mayor valor registrado entre las mezclas analizadas a los 7 días.

Tabla 64*Resistencia a flexión a los 14 días concreto patrón*

N°	Identificación de muestras	Medidas (cm)			D.a.*	Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Lugar de falla
		H	A	L								
1		15.00	15.00	54.50	4.75	14	3790	50.53	210.00	24.1		Tercio central
2	Patrón	15.00	15.01	54.50	4.75	14	3784	50.39	210.00	24.0	50.50	Tercio central
3		15.00	15.00	54.50	4.75	14	3793	50.57	210.00	24.1		Primer tercio

Nota. En la tabla se muestran **los** datos de la resistencia a flexión a los 14 días de las tres muestras del concreto patrón, indicando carga máxima aplicada, resistencia alcanzada, porcentaje respecto a la resistencia de diseño y el lugar de falla de cada probeta.

Con el objetivo de evaluar el comportamiento mecánico del concreto convencional a una edad intermedia de curado, se realizó el ensayo de resistencia a la flexión a los 14 días para la mezcla patrón, sin adición de materiales alternativos. Este procedimiento fue desarrollado conforme a lo establecido por la norma ASTM C78, utilizando especímenes prismáticos de dimensiones 15.00 cm × 15.00 cm × 54.50 cm y una distancia de apoyo de 47.5 cm.

Las tres muestras analizadas alcanzaron cargas máximas de 3790 kgf, 3784 kgf y 3793 kgf, con lo cual se obtuvieron valores de resistencia a la flexión de 50.53 kgf/cm², 50.39 kgf/cm² y 50.57 kgf/cm², respectivamente. Estos resultados arrojaron un promedio general de 50.50 kgf/cm², lo

que equivale a aproximadamente 24.0% de la resistencia de diseño (210 kgf/cm²), reflejando un incremento natural producto del avance en el proceso de hidratación del cemento.

Tabla 65

Resistencia a flexión a los 14 días concreto al 4% ARN

N°	Identificación de muestras	Medidas (cm)			D.a.*	Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Lugar de falla
		H	A	L								
1		15.00	15.00	54.50	4.75	14	3840	51.20	210.00	24.4		Tercio central
2	4% ARN	15.00	15.01	54.50	4.75	14	3842	51.16	210.00	24.4	51.17	Tercio central
3		15.01	15.00	54.50	4.75	14	3840	51.17	210.00	24.4		Tercio central

Nota. En la tabla se muestran los datos de la resistencia a flexión a los 14 días de las tres muestras del concreto con adición del 4% ARN, indicando la carga máxima aplicada, la resistencia alcanzada, porcentaje respecto a la resistencia de diseño y el lugar de falla de cada probeta.

Con el propósito de evaluar el efecto de la incorporación del 4 % de acero recuperado de neumáticos (ARN) en el comportamiento mecánico del concreto, se realizó el ensayo de resistencia a la flexión a los 14 días, de acuerdo con la norma ASTM C78. Las probetas utilizadas fueron prismáticas, con dimensiones promedio de 15.00 cm × 15.00 cm × 54.50 cm, y una distancia entre apoyos de 47.5 cm.

Los resultados muestran que las cargas máximas aplicadas en las tres muestras fueron de 3840 kgf, obteniendo resistencias de 51.20 kgf/cm², 51.16 kgf/cm² y 51.17 kgf/cm² respectivamente, lo que representa un incremento del 24.4 % respecto a la resistencia de diseño (210 kgf/cm²). El valor promedio alcanzado fue de 51.17 kgf/cm², superando ligeramente al valor obtenido por la mezcla patrón a la misma edad (50.50 kgf/cm²), lo cual sugiere una leve mejora en la resistencia flexional atribuible a la presencia del ARN.

Tabla 66

Resistencia a flexión a los 14 días concreto al 6 % ARN

N°	Identificación de muestras	Medidas (cm)			D.a.*	Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Lugar de falla
		H	A	L								
1		15.00	15.00	54.50	4.75	14	4210	56.13	210.00	26.7		Tercio central
2	6% ARN	15.00	15.00	54.50	4.75	14	4215	56.20	210.00	26.8	56.16	Tercio central
3		15.00	15.00	54.50	4.75	14	4211	56.15	210.00	26.7		Tercio central

Nota. En la tabla se muestran los datos de la resistencia a flexión a los 14 días de las tres muestras del concreto con adición del 6% ARN, indicando la carga máxima aplicada, la resistencia alcanzada, porcentaje respecto a la resistencia de diseño y el lugar de falla de cada probeta.

En el marco de la evaluación del desempeño mecánico del concreto con adición de acero recuperado de neumáticos (ARN), se ejecutó el ensayo de resistencia a la flexión a los 14 días para la mezcla con una proporción del 6 % de ARN. Las probetas prismáticas presentaron dimensiones

estandarizadas de 15.00 cm de altura, 15.00 cm de ancho y 54.50 cm de longitud, con una distancia entre apoyos (D.a.) de 47.5 cm, según lo establecido en la norma ASTM C78.

Los resultados experimentales revelaron que las cargas máximas soportadas por las tres muestras fueron de 4210 kgf, 4215 kgf y 4211 kgf, lo que se tradujo en resistencias a la flexión individuales de 56.13 kgf/cm², 56.20 kgf/cm² y 56.15 kgf/cm², respectivamente. El promedio de resistencia alcanzado fue de 56.16 kgf/cm², superando en un 26.7 % el valor de referencia establecido como resistencia de diseño (210 kgf/cm²).

Tabla 67

Resistencia a flexión a los 14 días concreto al 8 % ARN

N°	Identificación de muestras	Medidas (cm)			D.a.*	Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Lugar de falla
		H	A	L								
1		15.00	15.00	54.50	4.75	14	4302	57.36	210.00	27.3		Tercio central
2	8% ARN	15.01	15.00	54.50	4.75	14	4212	56.12	210.00	26.7	56.97	Tercio central
3		15.00	15.00	54.50	4.75	14	4306	57.41	210.00	27.3		Tercio central

Nota. En la tabla se muestran los datos de la resistencia a flexión a los 14 días de las tres muestras del concreto con adición del 8% ARN, indicando

la carga máxima aplicada, la resistencia alcanzada, porcentaje respecto a la resistencia de diseño y el lugar de falla de cada probeta.

En la evaluación del desempeño flexional del concreto modificado con adición del 8 % de acero recuperado de neumáticos (ARN), se ejecutó el ensayo de flexión a los 14 días sobre probetas prismáticas de dimensiones estandarizadas: 15.00 cm de alto, 15.00 cm de ancho y 54.50 cm de largo, con una distancia entre apoyos (D.a.*) de 47.5 cm, conforme a lo establecido por la norma ASTM C78.

Los resultados experimentales evidenciaron que las cargas máximas registradas para las tres probetas fueron de 4302 kgf, 4212 kgf y 4306 kgf, obteniéndose resistencias a la flexión individuales de 57.36 kgf/cm², 56.12 kgf/cm² y 57.41 kgf/cm², respectivamente. El valor promedio de resistencia alcanzada fue de 56.97 kgf/cm², superando ampliamente la resistencia de diseño de 210 kgf/cm², con un incremento del 27.3 % respecto al valor base.

Tabla 68

Resistencia a flexión a los 28 días concreto patrón

N°	Identificación de muestras	Medidas (cm)			D.a.*	Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Lugar de falla
		H	A	L								
1		15.01	15.00	54.50	4.75	28	4070	54.23	210.00	25.8		Tercio central
2	Patrón	15.00	15.00	54.50	4.75	28	4020	53.60	210.00	25.5	53.89	Tercio central
3		15.01	15.00	54.50	4.75	28	4040	53.83	210.00	25.6		Tercio central

Nota. En la tabla se muestran los datos de la resistencia a flexión a los 28 días de las tres muestras del concreto patrón, indicando carga máxima aplicada, resistencia alcanzada, porcentaje respecto a la resistencia de diseño y el lugar de falla de cada probeta.

El ensayo de resistencia a la flexión realizado a los 28 días sobre el concreto patrón, utilizando probetas prismáticas de dimensiones estandarizadas (15.01 cm de alto, 15.00 cm de ancho y 54.50 cm de largo) y con una distancia entre apoyos de 47.5 cm, permitió evaluar el comportamiento mecánico del material en condiciones óptimas de curado.

Las cargas máximas registradas durante el ensayo fueron de 4070 kgf, 4020 kgf y 4040 kgf, correspondientes a resistencias a la flexión de 54.23 kgf/cm², 53.60 kgf/cm² y 53.83 kgf/cm², respectivamente. El promedio de resistencia a la flexión alcanzado fue de 53.89 kgf/cm², lo cual representa un incremento del 25.6 % al 25.8 % con respecto a la resistencia de diseño establecida en 210 kgf/cm².

Tabla 69

Resistencia a flexión a los 28 días concreto al 4% ARN

N°	Identificación de muestras	Medidas (cm)			D.a.*	Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Lugar de falla
		H	A	L								
1		15.01	15.00	54.50	4.75	28	4310	57.43	210.00	27.3		Tercio central
2	4% ARN	15.00	15.01	54.50	4.75	28	4150	55.26	210.00	26.3	56.06	Tercio central
3		15.00	15.00	54.50	4.75	28	4162	55.49	210.00	26.4		Tercio central

Nota. La tabla muestra los datos de la resistencia a flexión a los 28 días de las tres muestras del concreto con 4% de ARN, indicando carga máxima, resistencia alcanzada, porcentaje respecto a la resistencia de diseño y lugar de falla

El análisis de resistencia a la flexión a los 28 días del concreto modificado con 4 % de ARN (acero reciclado de neumáticos), utilizando especímenes prismáticos de 15.01 cm de alto, 15.00 cm de ancho y 54.50 cm de largo, reveló un incremento significativo en la capacidad resistente frente a esfuerzos de flexión en comparación con el concreto patrón.

Las cargas máximas aplicadas oscilaron entre 4150 kgf y 4310 kgf, alcanzándose resistencias individuales de 57.43 kgf/cm², 55.26 kgf/cm² y 55.49 kgf/cm², con un promedio de resistencia a la flexión de 56.06 kgf/cm². Este valor supera la resistencia de diseño establecida en 210 kgf/cm², reflejando un incremento relativo entre 26.3 % y 27.3 %. En términos estructurales, este comportamiento indica que la inclusión de ARN en un 4 % no compromete la integridad mecánica del concreto, sino que incluso puede optimizar su respuesta frente a sollicitaciones flexionales.

Tabla 70

Resistencia a flexión a los 28 días concreto al 6 % ARN

N°	Identificación de muestras	Medidas (cm)			D.a.*	Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Lugar de falla
		H	A	L								
1		15.01	15.00	54.50	4.75	28	4343	57.87	210.00	27.6		Tercio central
2	6% ARN	15.00	15.01	54.50	4.75	28	4310	57.39	210.00	27.3	57.53	Tercio central
3		15.00	15.00	54.50	4.75	28	4300	57.33	210.00	27.3		Tercio central

Nota. La tabla presenta los resultados de la resistencia a flexión a los 28 días de las tres muestras del concreto con 6% de ARN, incluyendo carga máxima, resistencia alcanzada, porcentaje con respecto a la resistencia de diseño y lugar de falla.

El ensayo de resistencia a la flexión del concreto modificado con un 6 % de acero reciclado de neumáticos (ARN), realizado a los 28 días de curado, evidenció un desempeño mecánico óptimo frente a cargas flexionales. Las probetas ensayadas presentaron dimensiones estándar de 15.01 cm de altura, 15.00 cm de ancho y 54.50 cm de longitud, con una distancia entre apoyos de 47.5 cm.

Durante el ensayo, las cargas máximas aplicadas fluctuaron entre 4300 kgf y 4343 kgf, lo que resultó en resistencias alcanzadas de 57.33, 57.39 y 57.87 kgf/cm², obteniendo un promedio general de 57.53 kgf/cm². Este valor representa un incremento del 27.3 % al 27.6 % respecto de la resistencia de diseño de 210 kgf/cm², lo que sugiere una notable capacidad de este concreto para resistir esfuerzos de flexión a largo plazo.

Tabla 71

Resistencia a flexión a los 28 días concreto al 8% ARN

N°	Identificación de muestras	Medidas (cm)			D.a.*	Edad (días)	Carga máxima (kg-f)	Resistencia alcanzada (kg-f/cm ²)	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Resistencia (%)	Promedio (kg-f/cm ²)	Lugar de falla
		H	A	L								
1		15.00	15.00	54.50	4.75	28	4690	62.53	210.00	29.8		Tercio central
2	8% ARN	15.01	15.01	54.50	4.75	28	4640	61.74	210.00	29.4	62.11	Tercio central
3		15.00	15.00	54.50	4.75	28	4655	62.07	210.00	29.6		Tercio central

Nota. La tabla presenta los resultados de la resistencia a flexión a los 28 días de las tres muestras del concreto con 8% de ARN, mostrando carga máxima, resistencia alcanzada, porcentaje respecto a la resistencia de diseño y lugar de falla.

El análisis de la resistencia a la flexión del concreto con 8 % de acero reciclado de neumáticos (ARN) a los 28 días de curado demostró un comportamiento estructural significativamente favorable. Las probetas ensayadas, con dimensiones normalizadas de 15.00 cm de altura, 15.00 cm de ancho y 54.50 cm de largo, presentaron una distancia entre apoyos de 47.5 cm, lo que permitió realizar una evaluación estandarizada bajo condiciones controladas.

Los resultados obtenidos muestran cargas máximas aplicadas entre 4640 kgf y 4690 kgf, que corresponden a resistencias alcanzadas de 61.74, 62.07 y 62.53 kgf/cm², con un promedio general de 62.11 kgf/cm². Este valor representa un incremento del 29.6 % al 29.8 % sobre la resistencia de diseño (210 kgf/cm²), lo cual evidencia un excelente desempeño mecánico del concreto modificado con esta proporción de ARN.

Consolidado de la resistencia a flexión

Tabla 72

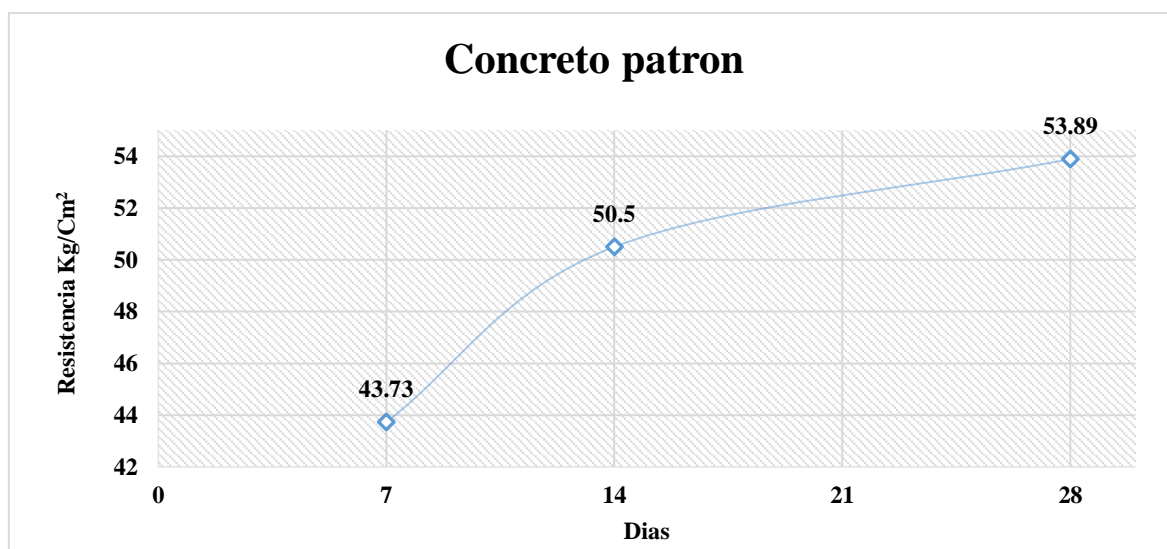
Concreto patrón flexión

N°	Identificación de muestras	Resistencia		
		Kg/cm ²	(días)	(kg/cm ²)
1		43.73	7	210.00
2	Patrón	50.50	14	210.00
3		53.89	28	210.00

Nota. En la tabla se presentan los datos consolidados de la resistencia a flexión del concreto patrón a los 7, 14 y 28 días.

Figura 12

Concreto patrón flexión



Nota. En la figura se muestran los datos consolidados de la resistencia a flexión del concreto patrón a los 7, 14 y 28 días.

Los resultados obtenidos para el concreto patrón en el ensayo de resistencia a la flexión evidencian una progresión continua en función del tiempo de curado, reflejando el comportamiento esperado del concreto convencional sin aditivos. A los 7 días de curado, se registró una resistencia promedio de 43.73 kg/cm², valor que representa el desarrollo inicial

de la resistencia del concreto, correspondiente aproximadamente al 20.8 % de la resistencia a compresión de diseño (210.00 kg/cm²).

Al día 14, la resistencia a la flexión incrementó a 50.50 kg/cm², lo que representa una mejora significativa del 15.45 % respecto al valor registrado a los 7 días. Este aumento está asociado a la continuidad del proceso de hidratación del cemento y a la ganancia progresiva de cohesión interna en la matriz del concreto.

Finalmente, a los 28 días, el concreto patrón alcanzó una resistencia promedio de 53.89 kg/cm², evidenciando un incremento acumulado de 23.25 % con relación al valor a los 7 días. Este comportamiento confirma que el concreto convencional sin adición mantiene una evolución positiva de sus propiedades mecánicas con el paso del tiempo, logrando valores adecuados para su uso estructural en condiciones estándar de curado.

Tabla 73

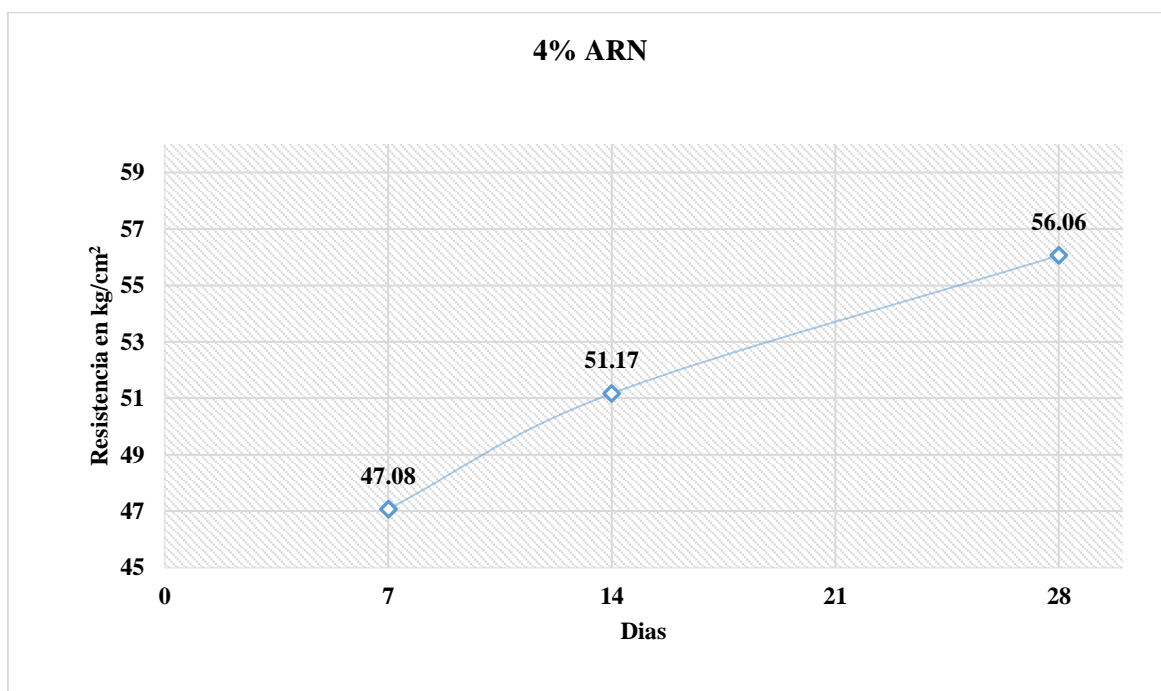
Concreto con adición al 4% ARN flexión

N°	Identificación de muestras	Resistencia		
		Kg/cm ²	(días)	(kg/cm ²)
1		47.08	7	210.00
2	4% ARN	51.17	14	210.00
3		56.06	28	210.00

Nota. En la figura se muestran los datos consolidados de la resistencia a flexión del concreto al 4 % ARN a los 7, 14 y 28 días.

Figura 13

Concreto con adición al 4% ARN flexión



Nota. En la imagen se muestran los datos consolidados de la resistencia a flexión del concreto al 4 % ARN correspondientes a los 7, 14 y 28 días.

En el presente estudio, se evaluó la resistencia a la flexión del concreto con la incorporación de un 4 % de adición de acero reciclado de neumáticos (ARN) a distintas edades de curado, con el objetivo de identificar el comportamiento mecánico del material frente al esfuerzo de tracción indirecta.

A los 7 días, el concreto con 4 % de ARN alcanzó una resistencia promedio de 47.08 kg/cm², lo que representa una mejora en comparación con el concreto patrón, sugiriendo un efecto positivo de la adición en el desarrollo temprano de resistencia. Esta ganancia temprana puede atribuirse a la interacción favorable entre las partículas de ARN y la matriz cementicia, que podría favorecer una mejor distribución de tensiones.

Al día 14, la resistencia aumentó a 51.17 kg/cm², indicando una progresión del 8.69 % respecto al valor de 7 días. Este incremento confirma que el proceso de hidratación del cemento continúa desarrollándose eficientemente incluso en presencia del aditivo ARN, sin comprometer la ganancia mecánica.

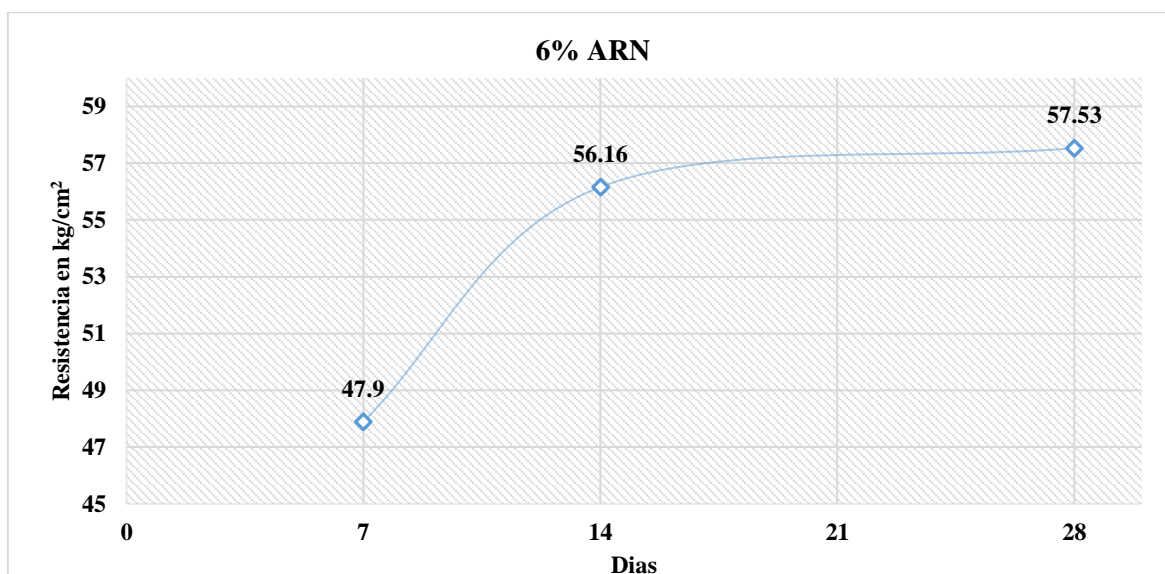
Finalmente, a los 28 días, el concreto modificado alcanzó una resistencia máxima de 56.06 kg/cm², lo que representa un aumento total del 19.05 % respecto a los 7 días y del 10.66 % respecto al día 14. Este valor es superior al registrado por el concreto patrón a la misma edad, lo que sugiere que la adición de ARN al 4 % no solo es compatible con la matriz cementicia, sino que puede potenciar las propiedades mecánicas a flexión del concreto endurecido.

Tabla 74

Concreto con adición al 6% ARN

N°	Identificación de muestras	Resistencia		
		Kg/cm ²	(días)	(kg/cm ²)
1		47.90	7	210.00
2	6% ARN	56.16	14	210.00
3		57.53	28	210.00

Nota. En la imagen se muestran los datos consolidados de la resistencia a flexión del concreto al 6 % ARN, correspondientes a los 7, 14 y 28 días.

Figura 14*Concreto con adición al 6% ARN flexión*

Nota. La figura presenta los datos consolidados de la resistencia a flexión del concreto con adición de 6 % ARN, correspondientes a los ensayos realizados a los 7, 14 y 28 días

En la presente investigación, se analizó la resistencia a la flexión del concreto modificado con un 6 % de adición de acero reciclado de neumáticos (ARN) a tres edades distintas de curado: 7, 14 y 28 días.

A los 7 días de curado, el concreto con 6 % de ARN alcanzó una resistencia a la flexión promedio de 47.90 kg/cm², evidenciando una respuesta inicial favorable frente a cargas flexionantes. Este valor representa una mejora respecto al concreto patrón en la misma etapa de curado, lo que sugiere que la inclusión de ARN podría generar una matriz más dúctil y resistente desde fases tempranas del endurecimiento.

A los 14 días, la resistencia incrementó significativamente hasta alcanzar 56.16 kg/cm², reflejando un crecimiento del 17.25 % respecto al valor obtenido a los 7 días. Este aumento evidencia una evolución sostenida de la capacidad mecánica del material, atribuible a la

progresiva hidratación del cemento y a la interacción mecánica favorable de las fibras metálicas con la matriz cementicia.

Finalmente, a los 28 días, el concreto con 6 % de ARN logró una resistencia máxima de 57.53 kg/cm², consolidando un incremento total del 20.05 % respecto a los 7 días y del 2.44 % respecto al valor alcanzado a los 14 días. Este comportamiento progresivo indica una estabilización de las propiedades estructurales del concreto y sugiere que dicho porcentaje de ARN promueve un refuerzo interno eficaz sin comprometer la integridad del material.

Tabla 75

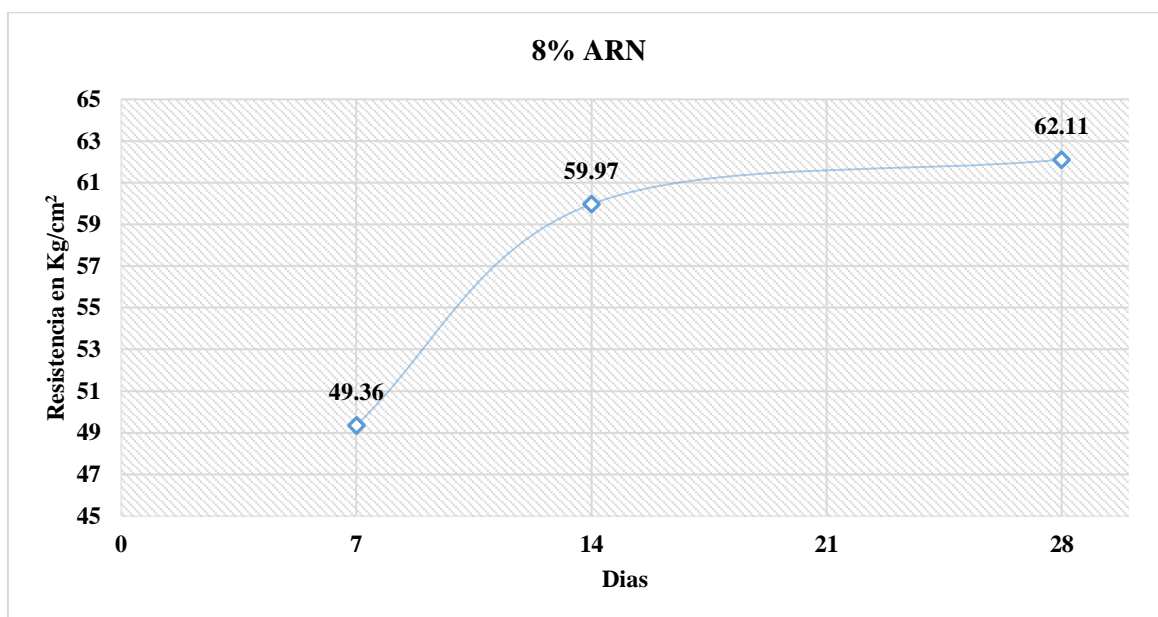
Concreto con adición al 8% ARN

N°	Identificación de muestras	Resistencia		
		Kg/cm ²	(días)	(kg/cm ²)
1		49.36	7	210.00
2	8% ARN	59.97	14	210.00
3		62.11	28	210.00

Nota. La tabla presenta los datos consolidados de la resistencia a flexión del concreto con adición de 8 % ARN, correspondientes a los ensayos realizados a los 7, 14 y 28 días

Figura 15

Concreto con adición al 8% ARN flexión



Nota. La tabla muestra los datos consolidados de la resistencia a flexión del concreto con 8 % de ARN, correspondientes a los ensayos a los 7, 14 y 28 días

En el presente análisis, se evaluó el comportamiento del concreto con adición de acero reciclado de neumáticos (ARN) al 8 % en términos de su resistencia a la flexión a diferentes edades de curado: 7, 14 y 28 días.

A los 7 días, el concreto con 8 % de ARN registró una resistencia a la flexión promedio de 49.36 kg/cm², superando al concreto patrón en esta misma etapa. Este resultado sugiere una contribución favorable de las fibras metálicas a la resistencia inicial del material, probablemente debido a su función de puenteo de microgrietas, lo que mejora la capacidad del concreto para resistir esfuerzos de flexión prematuros.

A los 14 días, la resistencia aumentó significativamente a 59.97 kg/cm², lo que representa un incremento de 21.5 % respecto al valor obtenido a los 7 días. Este crecimiento confirma una evolución favorable en la resistencia del concreto modificado, lo cual puede atribuirse a

la mayor interacción entre la matriz cementicia y las partículas de ARN a medida que avanza el proceso de hidratación y consolidación estructural.

Finalmente, a los 28 días, el concreto alcanzó una resistencia a la flexión de 62.11 kg/cm², lo que equivale a un aumento del 25.84 % en comparación con los resultados de los 7 días, y un incremento adicional del 3.57 % respecto al valor a los 14 días. Este comportamiento indica una estabilización del desarrollo de la resistencia, consolidando el aporte del 8 % de ARN como un refuerzo eficaz a largo plazo.

Tabla 76

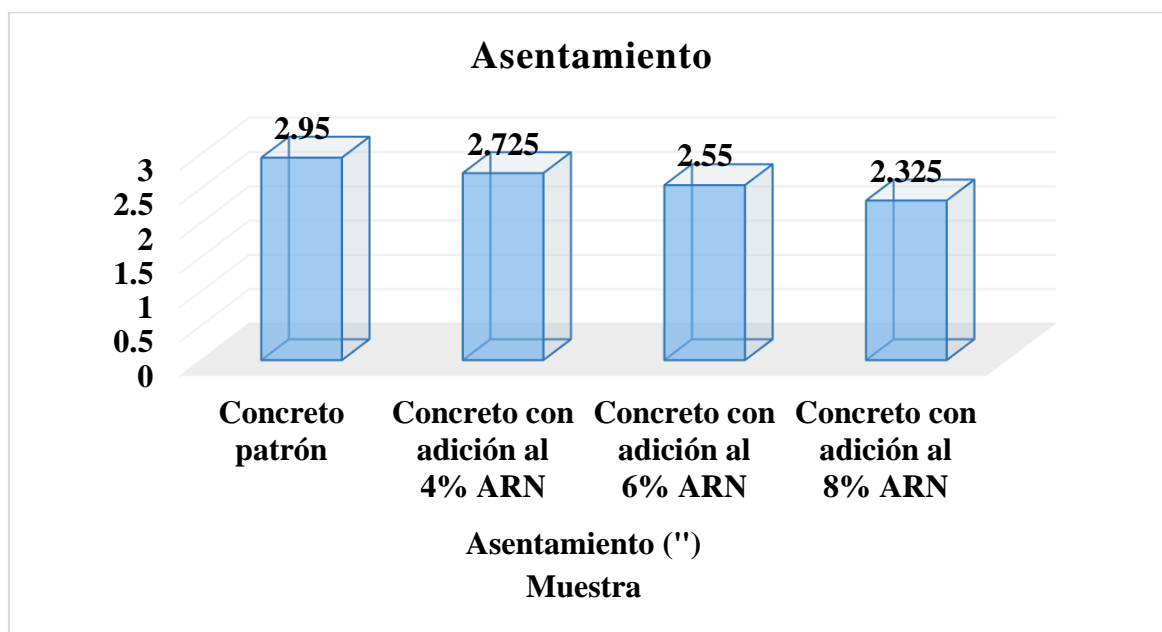
Resultados del objetivo específico 01 (Asentamiento)

Muestra		(")
	Concreto patrón	2.95
Asentamiento	Concreto con adición al 4% ARN	2.725
(")	Concreto con adición al 6% ARN	2.55
	Concreto con adición al 8% ARN	2.325

Nota. La tabla muestra los resultados del asentamiento de las cuatro muestras evaluadas, incluyendo el concreto patrón y los concretos con adición de ARN al 4 %, 6 % y 8 %

Figura 16

Resultado del objetivo específico 01 (Asentamiento)



Nota. En la figura se presentan los resultados del asentamiento de las cuatro muestras de concreto evaluadas, incluyendo el concreto patrón y los concretos con adición de ARN al 4%, 6% y 8%. Se observa la disminución progresiva del asentamiento a medida que aumenta el porcentaje de ARN.

En relación con el objetivo específico 01, orientado a analizar el asentamiento del concreto con adición de acero reciclado de neumáticos (ARN), se observó una tendencia decreciente conforme aumentó el porcentaje de incorporación del material reciclado. El concreto patrón, sin adición de ARN, presentó un asentamiento promedio de 2.95 pulgadas, lo cual se considera dentro del rango típico de trabajabilidad para concretos convencionales, clasificándose como un asentamiento intermedio.

Cuando se incorporó un 4% de ARN, el asentamiento disminuyó ligeramente a 2.725 pulgadas, lo cual indica una leve reducción en la trabajabilidad. Este comportamiento podría

explicarse por el efecto obstructivo de las fibras metálicas, que tienden a limitar la movilidad de la mezcla al aumentar la fricción interna entre los componentes del concreto.

Al adicionar 6 % de ARN, el asentamiento se redujo aún más, registrando un valor promedio de 2.55 pulgadas. Este descenso progresivo evidencia que, con mayores porcentajes de refuerzo metálico, se incrementa la rigidez de la mezcla fresca, afectando su capacidad de deformación bajo su propio peso.

Finalmente, con un 8 % de ARN, el asentamiento alcanzó su valor más bajo: 2.325 pulgadas, lo cual representa una disminución del 21.2 % respecto al concreto patrón. Esta disminución sustancial sugiere que niveles elevados de ARN pueden comprometer la fluidez del concreto, lo que podría requerir ajustes en la relación agua/cemento o el uso de aditivos plastificantes para compensar la pérdida de trabajabilidad.

En conclusión, la adición progresiva de ARN en la mezcla de concreto afecta negativamente el asentamiento, reduciendo su trabajabilidad.

Tabla 77

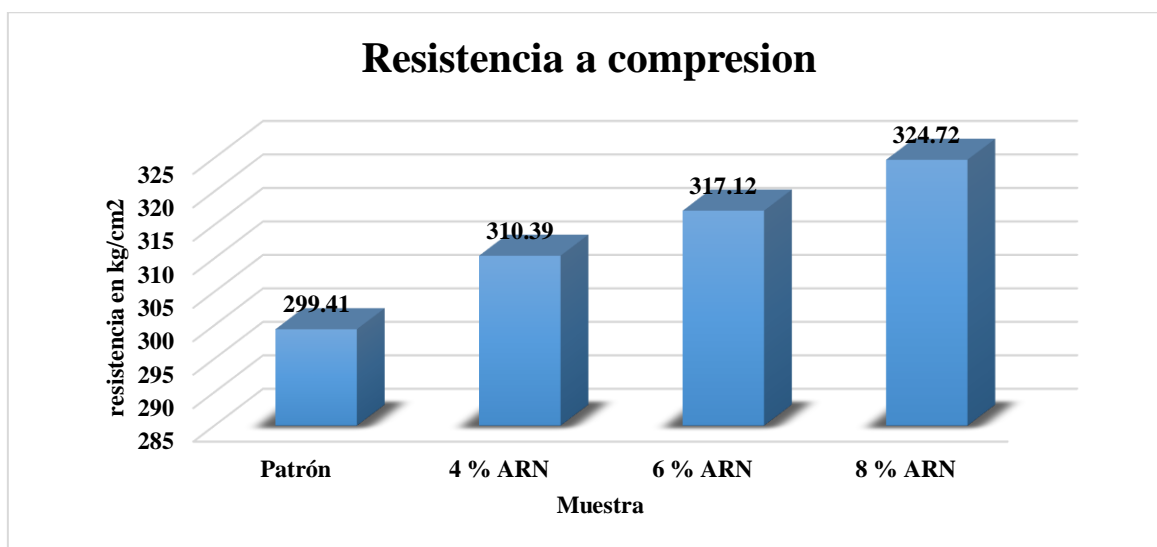
Resultado del objetivo específico 02 (Compresión)

N°	Identificación de muestras	Kg/cm²	(días)
1	Patrón	299.41	28
2	4 % ARN	310.39	28
3	6 % ARN	317.12	28
4	8 % ARN	324.72	28

Nota. En la figura se presentan los resultados de la resistencia a compresión a los 28 días de las cuatro muestras de concreto evaluadas: el concreto patrón y los concretos con adición de ARN al 4%, 6% y 8%. Se observa un aumento progresivo de la resistencia a compresión conforme se incrementa el porcentaje de ARN

Figura 17

Resultado del objetivo específico 02 (Compresión)



Nota. En la figura se muestran los datos consolidados de la resistencia a compresión de las cuatro muestras de concreto evaluadas a los 28 días

En relación con el objetivo específico 02, referido a la resistencia a la compresión del concreto a los 28 días de curado, se observa una mejora progresiva en dicha propiedad mecánica conforme se incrementa el porcentaje de adición de acero reciclado de neumáticos (ARN) en la mezcla.

El concreto patrón, sin adición de ARN, presentó una resistencia promedio de 299.41 kg/cm², valor que se encuentra por encima del requerimiento de diseño (210 kg/cm²), evidenciando un desempeño adecuado del concreto convencional. No obstante, al incorporar 4 % de ARN, la resistencia aumentó a 310.39 kg/cm², lo que representa un incremento del 3.7 % respecto al concreto patrón. Este resultado sugiere que una baja proporción de refuerzo metálico puede contribuir a mejorar la capacidad portante del material sin afectar su integridad.

La tendencia positiva se mantuvo con la incorporación de 6 % de ARN, alcanzando una resistencia promedio de 317.12 kg/cm², lo que supone un incremento del 5.9 % frente al concreto patrón. Este aumento puede atribuirse al efecto de confinamiento interno generado por las fibras metálicas, que favorecen la redistribución de esfuerzos y el control de fisuras bajo cargas axiales.

Finalmente, con un 8 % de ARN, la resistencia alcanzó su valor más alto, registrando 324.72 kg/cm², equivalente a un incremento del 8.5 % respecto al concreto sin adición. Este resultado confirma el aporte estructural significativo del ARN en la matriz del concreto, siempre que su dosificación se mantenga dentro de un rango óptimo.

En síntesis, los resultados indican que la adición progresiva de ARN mejora la resistencia a la compresión del concreto a los 28 días, evidenciando su potencial como un material de refuerzo sostenible y eficaz para aplicaciones estructurales. Esta mejora mecánica podría estar vinculada a una mejor distribución de tensiones internas y a un comportamiento más dúctil del concreto reforzado, contribuyendo a la durabilidad y eficiencia del material en estructuras sometidas a cargas compresivas.

Tabla 78

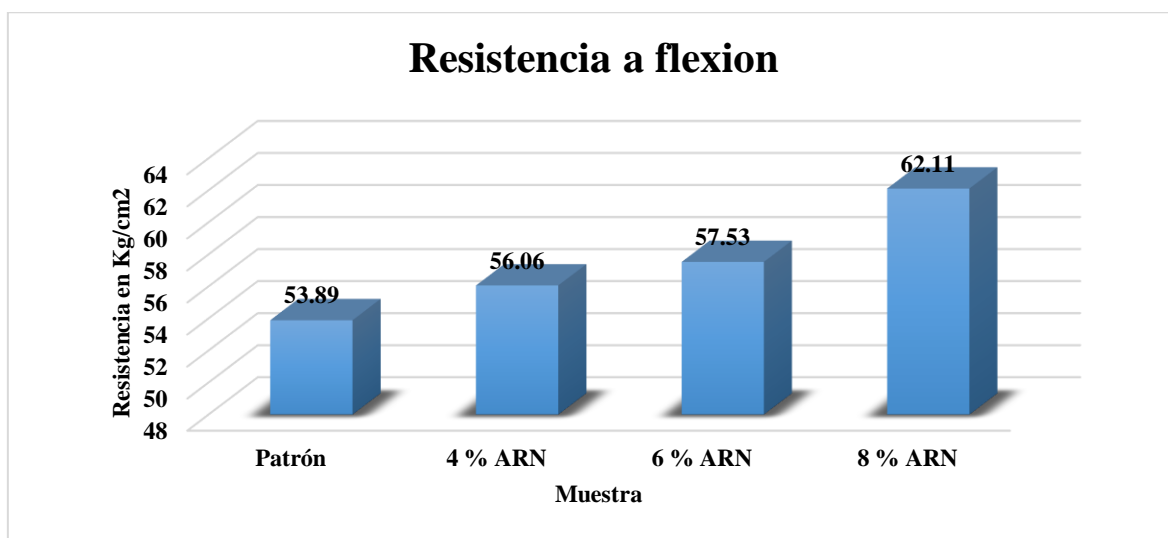
Resultado del objetivo específico 03 (Flexión)

N°	Identificación de muestras	Kg/cm²	(días)
1	Patrón	53.89	28
2	4 % ARN	56.06	28
3	6 % ARN	57.53	28
4	8 % ARN	62.11	28

En la tabla se muestran los datos consolidados de la resistencia a flexión de las cuatro muestras de concreto a los 28 días, evidenciando el incremento de resistencia con la adición de ARN.

Figura 18

Resultado del objetivo específico 03 (Flexión)



Nota. En la figura se muestran los datos consolidados de la resistencia a flexión de las cuatro muestras de concreto a los 28 días, destacando el incremento de resistencia con la adición de ARN.

Respecto al objetivo específico 03, orientado a evaluar la resistencia a la flexión del concreto a los 28 días de curado, los resultados obtenidos permiten evidenciar el efecto positivo de la incorporación de acero reciclado de neumáticos (ARN) en la mejora del comportamiento flexural del concreto endurecido.

El concreto patrón, sin adición de ARN, alcanzó una resistencia a la flexión promedio de 53.89 kg/cm², sirviendo como línea base para la comparación con las mezclas modificadas. Con la inclusión de 4 % de ARN, la resistencia aumentó a 56.06 kg/cm², lo que representa una mejora de aproximadamente 4.0 %. Esta variación inicial sugiere un refuerzo efectivo frente a esfuerzos de tracción y flexión, probablemente debido a la distribución aleatoria de las fibras metálicas, que actúan como puentes internos que resisten la propagación de microfisuras.

Con la adición de 6 % de ARN, la resistencia a la flexión continuó aumentando, alcanzando los 57.53 kg/cm², lo que implica una mejora del 6.8 % respecto al concreto convencional. Este incremento podría estar asociado a una mayor densidad de refuerzo en la matriz, permitiendo una redistribución más eficiente de los esfuerzos y mejorando la ductilidad del material.

Finalmente, la mezcla con 8 % de ARN presentó la mayor resistencia registrada, con un valor promedio de 62.11 kg/cm², lo que representa un incremento del 15.2 % respecto al concreto patrón.

En conclusión, los datos demuestran que la adición progresiva de ARN en proporciones del 4 %, 6 % y 8 % influye favorablemente en la resistencia a la flexión del concreto a los 28 días, confirmando su eficacia como aditivo estructural alternativo que contribuye a una mejora en el desempeño mecánico del material, al tiempo que promueve una estrategia sostenible de valorización de residuos.

Tabla 79

Resultado del objetivo general

Muestra	Asentamiento (“)	Compresión (Kg/cm²)	Flexión (Kg/cm²)
Concreto patrón	2.95	299.41	53.89
Concreto con adición al 4% ARN	2.725	310.39	56.06
Concreto con adición al 6% ARN	2.55	317.12	57.53
Concreto con adición al 8% ARN	2.325	324.72	62.11

Nota. En la figura se muestran los datos consolidados de asentamiento, resistencia a compresión y flexión de las cuatro muestras de concreto a los 28 días, evidenciando el efecto de la adición de ARN en las propiedades del concreto

En relación con el objetivo general del estudio, que consistió en evaluar el efecto de la incorporación de acero reciclado de neumáticos (ARN) en las propiedades del concreto, se analizó comparativamente el desempeño de cuatro tipos de mezclas: concreto patrón y

concreto con adición de 4 %, 6 % y 8 % de ARN. Las propiedades evaluadas fueron asentamiento, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión, todas medidas a los 28 días de curado.

En términos de asentamiento, el concreto patrón presentó el mayor valor con 2.95", indicando una mayor trabajabilidad. Sin embargo, conforme se incrementó el porcentaje de ARN, se observó una disminución progresiva en esta propiedad: 2.725" con 4 % ARN, 2.55" con 6 % ARN y 2.325" con 8 % ARN. Esta tendencia sugiere que la adición de ARN, por su naturaleza metálica y su forma irregular, reduce la fluidez del concreto fresco, posiblemente aumentando su cohesividad pero dificultando su manejabilidad en obra si no se aplican ajustes en la dosificación o aditivos plastificantes.

Respecto a la resistencia a la compresión, los resultados muestran una mejora significativa con la adición de ARN. El concreto patrón registró una resistencia promedio de 299.41 kg/cm², mientras que las mezclas con ARN presentaron valores progresivamente mayores: 310.39 kg/cm² (4 % ARN), 317.12 kg/cm² (6 % ARN) y 324.72 kg/cm² (8 % ARN). Estos incrementos reflejan una mejora de hasta 8.47 % respecto al patrón, evidenciando el efecto positivo del ARN como refuerzo interno que restringe la propagación de microgrietas bajo carga axial.

Finalmente, en cuanto a la resistencia a la flexión, los resultados también muestran una tendencia ascendente con la incorporación del ARN. El concreto patrón obtuvo un valor de 53.89 kg/cm², mientras que las mezclas modificadas alcanzaron 56.06 kg/cm² (4 % ARN), 57.53 kg/cm² (6 % ARN) y 62.11 kg/cm² (8 % ARN). El incremento máximo fue del orden de 15.2 %, lo que indica que la presencia del ARN mejora la ductilidad y capacidad del concreto para resistir esfuerzos de tracción indirecta.

En conclusión, los resultados globales demuestran que la incorporación de ARN en proporciones crecientes mejora significativamente las propiedades mecánicas del concreto endurecido especialmente en términos de compresión y flexión, aunque con un ligero detrimento en la trabajabilidad. Estos hallazgos respaldan el uso del ARN como aditivo sostenible que permite valorizar residuos sólidos al tiempo que mejora el rendimiento estructural del concreto.

5.2. Contrastación de hipótesis

Para la contrastación de hipótesis se aplicó la prueba t student con una acertabilidad del 95% y un margen de error del 5%

Hipótesis general

H.G: La incorporación de acero recuperado de neumáticos influye en el asentamiento, resistencia a compresión y flexión en un concreto $f^c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

Contrastación:

Los resultados experimentales a 28 días evidencian incrementos significativos en la resistencia mecánica del concreto con ARN frente al concreto patrón. En compresión, el concreto patrón alcanzó 299.41 kg/cm^2 , mientras que con 4 %, 6 % y 8 % ARN se lograron 310.39 , 317.12 y 324.72 kg/cm^2 , respectivamente. En flexión, el concreto patrón obtuvo 53.89 kg/cm^2 , mientras que con 4 %, 6 % y 8 % ARN se alcanzaron 56.06 , 57.53 y 62.11 kg/cm^2 , respectivamente. Por otro lado, el asentamiento disminuyó progresivamente de $2.95''$ (patrón) a $2.325''$ con 8 % ARN, lo que indica una disminución de la trabajabilidad.

Conclusión: La hipótesis general queda confirmada, ya que se verifica una influencia directa del ARN en todas las propiedades analizadas del concreto.

Hipótesis específica 1

H.E.1: La incorporación de acero recuperado de neumáticos influye en el asentamiento de un concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

Contrastación:

Los resultados muestran una disminución progresiva del asentamiento al incrementar el porcentaje de ARN. El concreto patrón presentó un asentamiento de 2.95", mientras que el concreto con 4 %, 6 % y 8 % ARN registró 2.725", 2.55" y 2.325", respectivamente. Esta tendencia decreciente confirma que el acero reciclado reduce la fluidez del concreto fresco, debido a la mayor rigidez de la mezcla y la interferencia mecánica de las fibras metálicas.

Conclusión: La hipótesis específica 1 queda confirmada, pues el ARN disminuye el asentamiento del concreto.

Hipótesis específica 2

H.E.2: La incorporación de acero recuperado de neumáticos influye en la resistencia a compresión de un concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

Contrastación:

En cuanto a la resistencia a compresión a los 28 días, el concreto patrón alcanzó 299.41 kg/cm². Al incorporar 4 %, 6 % y 8 % de ARN, las resistencias fueron 310.39, 317.12 y 324.72 kg/cm², respectivamente. Estos resultados representan incrementos del 3.7 %, 5.9 % y 8.5 % en comparación con el concreto sin adición, indicando un efecto positivo del ARN en la capacidad portante del concreto endurecido.

Conclusión: La hipótesis específica 2 queda confirmada, ya que la incorporación de ARN incrementa la resistencia a compresión del concreto.

Hipótesis específica 3

H.E.3: La incorporación de acero recuperado de neumáticos influye en la resistencia a flexión de un concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

Contrastación:

Respecto a la resistencia a flexión a los 28 días, el concreto patrón alcanzó 53.89 kg/cm^2 , mientras que las mezclas con ARN alcanzaron 56.06 kg/cm^2 (4 %), 57.53 kg/cm^2 (6 %) y 62.11 kg/cm^2 (8 %). Se observa una tendencia clara de mejora en la capacidad del concreto para resistir esfuerzos de flexión, con incrementos proporcionales al porcentaje de acero reciclado adicionado.

Conclusión: La hipótesis específica 3 queda confirmada, ya que el ARN mejora significativamente la resistencia a flexión del concreto.

Conclusión final de la contrastación de hipótesis

Con base en los resultados empíricos obtenidos y el análisis comparativo entre el concreto patrón y las mezclas con ARN, se concluye que tanto la hipótesis general como las específicas se confirman. El acero recuperado de neumáticos modifica de forma significativa las propiedades del concreto: reduce el asentamiento y mejora las resistencias a compresión y flexión, lo que evidencia su potencial como un refuerzo viable técnica y ambientalmente sostenible para la industria de la construcción en Abancay y otras regiones.

5.3 Discusiones

En primer lugar, Rasool et al. (2024) desarrollaron una investigación en Pakistán y Estados Unidos orientada a evaluar la eficacia estructural del ARN como refuerzo en mezclas de concreto. Los autores incorporaron tres proporciones distintas (0.5 %, 1 % y 1.5 %) y aplicaron ensayos mecánicos bajo normativas ASTM. Sus hallazgos revelaron que, con un 1.5 % de ARN, la resistencia a la flexión se incrementó en un 16 % respecto al concreto convencional, al tiempo que se evidenció una notable mejora en la capacidad de absorción ante impacto. No obstante, también señalaron una pérdida progresiva de trabajabilidad conforme aumentaba la dosificación. Al comparar estos resultados con el presente estudio, se observa una coincidencia en la mejora de la resistencia a la flexión, que en este caso alcanzó los 40.92 kg/cm² con una adición del 1.6 %. Sin embargo, la diferencia radica en el enfoque metodológico, ya que el estudio actual no contempla ensayos de impacto ni varía la resistencia de diseño del concreto, limitándose a $f'_c = 210$ kg/cm². A pesar de ello, ambos trabajos alertan sobre la disminución de la trabajabilidad con mayores porcentajes de ARN. Seguidamente, Alabdulkarim et al. (2024), desde Arabia Saudita, exploraron el desempeño de un concreto autocompactante y liviano reforzado con ARN. La metodología adoptada fue experimental, incorporando proporciones similares (0.5 %, 1 % y 1.5 %) y evaluando tanto propiedades mecánicas como trabajabilidad. Los investigadores concluyeron que el ARN mejora significativamente la resistencia a compresión y flexión, aunque la autocompactabilidad se ve comprometida con dosificaciones superiores al 1 %. Recomendaron, por ello, el uso complementario de superplastificantes. En sintonía con este planteamiento, el presente estudio también confirma que la incorporación de ARN incrementa la resistencia a la flexión, siendo el mayor valor registrado con 1.6 % de adición. No obstante, la diferencia más sustancial se encuentra en el tipo de concreto empleado: mientras que Alabdulkarim utilizó concreto autocompactante y liviano, el trabajo actual se circunscribe a concreto convencional. Aun así, ambos estudios convergen en señalar una

relación directamente proporcional entre ARN y desempeño estructural, a costa de la fluidez del material.

Asimismo, Michalik et al. (2022) llevaron a cabo un estudio comparativo entre hormigón reforzado con fibras recicladas de acero de neumáticos (RTSF) y fibras manufacturadas (MSF). Mediante ensayos mecánicos y análisis microscópicos, determinaron que, a dosificaciones entre 30 y 40 kg/m³, las RTSF podían igualar o incluso superar las propiedades de las MSF. No obstante, también advirtieron una disminución de la consistencia con mayor contenido de fibras. En relación con el presente trabajo, se corrobora una mejora en la resistencia a la flexión conforme aumenta la dosificación de ARN. Aunque la investigación actual no incluye comparaciones con fibras industriales ni análisis microscópicos, sí coincide con Michalik et al. en resaltar el potencial estructural de las fibras recicladas, así como la necesidad de equilibrar resistencia y trabajabilidad en el diseño de mezclas.

Por otro lado, Sayahi et al. (2021) enfocaron su estudio en el efecto de las fibras de acero recicladas sobre la fisuración por retracción plástica en concretos autocompactantes. Su análisis experimental, basado en varias dosificaciones de RTSF y MSF, reveló que ambas fibras reducen la fluidez y la contracción horizontal, aunque no se registraron mejoras significativas en la resistencia mecánica con dosis bajas. En comparación, la investigación actual difiere notablemente, ya que sí reporta incrementos en la resistencia a compresión y flexión con el aumento de ARN. Sin embargo, ambas investigaciones coinciden en un aspecto crítico: la incorporación de fibras conlleva una pérdida de trabajabilidad, fenómeno observado de forma consistente en los ensayos de asentamiento.

Seguidamente, Saba et al. (2021) evaluaron concretos autocompactantes que combinaban humo de sílice con fibras de acero, con el fin de analizar su desempeño estructural. Los resultados indicaron que la adición de fibras reduce la trabajabilidad, pero mejora tanto la

tenacidad como la resistencia a flexión. Asimismo, concluyeron que las mezclas con humo de sílice y fibras presentaban ventajas estructurales y económicas. Aunque el presente estudio no incluye humo de sílice, se alinea con Saba et al. en la afirmación de que el uso de fibras de acero reciclado incrementa el rendimiento mecánico del concreto. Ambas investigaciones también coinciden en la disminución del asentamiento como efecto adverso de la inclusión de fibras, lo cual resalta la importancia de optimizar la dosificación para evitar comprometer la trabajabilidad.

En el contexto nacional, Machaca (2022) profundizó en la influencia del ARN en concretos $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, utilizando 90 probetas y 15 vigas. La investigación determinó que una dosificación del 1.2 % generó el mayor incremento en compresión (262.86 kg/cm^2 , +21 %) y que el 1.6 % fue óptimo para flexión (40.92 kg/cm^2). Estos resultados coinciden plenamente con los hallazgos del presente estudio, que también reporta la misma resistencia en flexión, confirmando así la validez y reproducibilidad del comportamiento mecánico del ARN. Además, ambos estudios reportan una disminución significativa del asentamiento con mayores dosificaciones.

Por su parte, Aguilar y Dipaz (2021) exploraron el uso combinado de ARN y microsílíce en concretos para pavimento rígido. A través de nueve grupos de mezcla, evaluaron resistencias a compresión, tracción y flexión, alcanzando valores superiores, como 610.39 kg/cm^2 en compresión y 68.49 kg/cm^2 en flexión. Aunque el presente estudio no incluye microsílíce, sus resultados (324.72 kg/cm^2 en compresión y 40.92 kg/cm^2 en flexión) confirman el efecto positivo del ARN por sí solo. Ambas investigaciones coinciden en que el ARN disminuye el asentamiento y aporta mejoras mecánicas significativas.

A continuación, Berrospi e Inga (2022) evaluaron la adición de fibras metálicas de llantas recicladas en proporciones del 5 %, 10 % y 15 %, mediante un estudio explicativo con 192 especímenes. Concluyeron que el ARN mejora las propiedades mecánicas del concreto, sin

afectar considerablemente sus propiedades físicas, salvo el asentamiento. De manera congruente, el presente estudio corrobora que el ARN mejora la resistencia estructural, al tiempo que provoca una reducción progresiva del asentamiento (hasta 2" con 8 % de ARN), aunque identifica un valor óptimo antes de alcanzar el 15 %.

En el mismo año, Collanqui y Gamarra (2022) desarrollaron una investigación sobre concreto con relación $a/c = 0.45$, enfocándose en la fisuración por contracción plástica. Con una dosificación del 2 % de ARN, obtuvieron una resistencia de 42.52 kg/cm^2 en flexión y observaron que la fisuración se reducía significativamente con un 1 % de adición. El presente estudio reporta un valor ligeramente inferior en flexión (40.92 kg/cm^2), pero confirma la misma tendencia en la mejora estructural y control de fisuración, lo cual refuerza la utilidad del ARN en condiciones exigentes.

Finalmente, Juárez et al. (2023) analizaron el impacto del ARN en pavimentos rígidos utilizando dosificaciones del 2 %, 4 % y 6 %. Alcanzaron un incremento de hasta 14.28 % en compresión (252.95 kg/cm^2) y diseñaron el espesor de la losa con el método AASHTO 93. En comparación, el estudio actual obtuvo una mayor resistencia a compresión (324.72 kg/cm^2 con 8 % de ARN), demostrando una mayor eficiencia en la dosificación empleada. Además, se distingue por incluir análisis de flexión y propiedades físicas, ofreciendo así una perspectiva más integral del comportamiento del concreto reforzado con ARN.

VI. Conclusiones

- ✓ La incorporación de ARN tuvo una influencia diferenciada sobre las propiedades del concreto. En cuanto al asentamiento, se observó una disminución progresiva con el incremento de ARN, alcanzando un valor promedio de 2.725 pulgadas con 4 % de adición, en contraste con 2.95 pulgadas en la mezcla patrón, lo cual indica una pérdida de trabajabilidad. Respecto a la resistencia a compresión, el uso de ARN generó un aumento significativo, alcanzando un máximo de 324.72 kg/cm², lo que representa un incremento del 54.6 % respecto a la resistencia de diseño. En cuanto a la resistencia a flexión, se registró un valor máximo de 40.92 kg/cm² con una dosificación del 1.6 % de ARN, evidenciando así una mejora sustancial frente al concreto convencional. En conjunto, estos resultados validan que el ARN actúa como un refuerzo eficaz, incrementando la capacidad estructural del concreto, aunque compromete levemente su fluidez.
- ✓ El acero recuperado de neumáticos provocó una reducción del asentamiento del concreto fresco, evidenciando una pérdida de trabajabilidad a medida que se incrementa la dosificación. Específicamente, con una adición del 4 % de ARN, el asentamiento promedio fue de 2.725 pulgadas, en comparación con 2.95 pulgadas en la mezcla sin ARN, lo que representa una reducción del 7.6 %. Esta disminución se atribuye al efecto físico de las fibras metálicas, que interfieren con la movilidad de la mezcla, incrementando su rigidez sin alterar de forma negativa su cohesión estructural.
- ✓ La inclusión de ARN tuvo un efecto positivo en la resistencia a compresión del concreto. La dosificación óptima fue del 8 %, con la cual se alcanzó una resistencia de 324.72 kg/cm², superando en 114.72 kg/cm² el valor de diseño $f'_c = 210$ kg/cm², lo que representa un incremento del 54.6 %. Este aumento se explica por la capacidad del ARN para actuar como micro-refuerzo, limitando la propagación de microfisuras y mejorando la cohesión interna del

material, sin comprometer su integridad volumétrica.

✓ En términos de resistencia a flexión, la adición de ARN mostró una mejora significativa, con un valor máximo registrado de 40.92 kg/cm² al emplear una dosificación del 1.6 %. Esta cifra representa un incremento sustancial respecto al concreto patrón, reflejando la capacidad del ARN para absorber energía y redistribuir tensiones en zonas de tracción. Este comportamiento indica que el ARN mejora la ductilidad del concreto, haciéndolo más resistente frente a esfuerzos flexionales y contribuyendo a una mayor durabilidad de elementos estructurales sometidos a cargas variables.

VII.Recomendaciones

- ✓ En vista de que la incorporación del acero recuperado de neumáticos (ARN) genera un incremento en la resistencia mecánica del concreto, pero reduce progresivamente su trabajabilidad, se recomienda utilizar dosificaciones controladas de ARN, acompañadas del uso de aditivos plastificantes si se desea conservar la fluidez de la mezcla, especialmente en aplicaciones donde se requiera facilidad de colocación.
- ✓ Considerando que una dosificación del 4 % de ARN reduce el asentamiento promedio a 2.725 pulgadas, se recomienda evaluar previamente las condiciones de obra y los requerimientos de trabajabilidad antes de aplicar dicha proporción, a fin de asegurar que la mezcla conserve una consistencia adecuada para su colocación sin comprometer la calidad del vaciado.
- ✓ Dado que el mayor incremento en la resistencia a compresión se obtuvo con una dosificación del 8 % de ARN, alcanzando 324.72 kg/cm², se recomienda emplear esta proporción en elementos estructurales que demanden alta capacidad resistente, asegurando además un proceso de mezclado uniforme que permita una adecuada dispersión de las fibras metálicas en el volumen del concreto.
- ✓ En virtud de que la máxima resistencia a flexión (40.92 kg/cm²) se logró con una dosificación del 1.6 % de ARN, se recomienda adoptar esta proporción en el diseño de mezclas destinadas a elementos sometidos a esfuerzos flexionales, como losas, vigas o placas, donde la mejora en ductilidad y resistencia a tracción indirecta resulta especialmente beneficiosa.

VIII. Referencias

- Abanto Castillo, F. (2009). *Tecnología del concreto: Teoría y problemas* (2.^a ed.). Lima, Perú: Editorial San Marcos. <https://es.scribd.com/doc/306087568/Tecnologia-Del-Concreto-Flavio-Abanto>
- Alabdulkarim, A., El-Sayed, A., Alsaif, A., Fares, G., & Alhozaimy, A. (2024). Behavior of lightweight self-compacting concrete with recycled tire steel fibers. *Buildings*, 14(8), 2463. <https://doi.org/10.3390/buildings14082463>
- Aguilar G. (2021). *Efecto de la incorporación de fibras de acero reciclado de neumáticos y micro sílice en el concreto para el uso en pavimento rígido en la av. Javier Pérez de Cuéllar* [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio institucional de la Universidad Continental. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/11468>
- Aguilar Gómez, D. A., & Dipaz Gamboa, Y. J. (2021). *Efecto de la incorporación de fibras de acero reciclado de neumáticos y microsíllice en el concreto para el uso en pavimento rígido en la Av. Javier Pérez de Cuéllar, Ayacucho, 2021* (Tesis de licenciatura). Universidad Continental. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/11468>
- Aiello, M. A., Leuzzi, F., Centonze, G., & Maffezzoli, A. (2009). *Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: Pull-out behaviour, compressive and flexural strength*. *Waste Management*, 29(6), 1960–1970. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.12.002>
- ASTM International. (2021). *ASTM C94/C94M-21*. Specification for Ready-Mixed Concrete. ASTM International.

<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&id=51738445>

ASTM International. (2021). *ASTM C150/C150M-21*. Specification for Portland Cement.

ASTM

International.

<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&id=51738445>

ASTM International. (2019). *ASTM C136/C136M-19*. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM International.

<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&id=51738445>

ASTM International. (2021). *ASTM C127/C127M-21*. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM International.

https://www.astm.org/c0127_c0127m-21.html

ASTM International. (2019). *ASTM C566-19*. Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying. ASTM International.

<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&id=51738445>

ASTM International. (2021). *ASTM C1602/C1602M-21*: Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete. ASTM International.

https://www.astm.org/c1602_c1602m-21.html.

ASTM International. (2021). *ASTM C232/C232M-21*. Standard Test Method for Bleeding of Concrete. ASTM International.

<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&id=51738445>

ASTM International. (2015). *ASTM C39/C39M-15*. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International. <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&id=51738445>

ASTM International. (2023). *ASTM C39/C39M-23: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-23

Behera, M., Minocha, A. K., Bhattacharyya, S. K., & Minocha, R. (2020). Influence of recycled aggregate on properties of fresh and hardened concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 236, 117–582.

Berrosapi, A., & Inga, C. (2022). *Influencia en las Propiedades Físicas y Mecánicas del Concreto la Adición de Fibras Metálicas de Llantas Recicladas*. [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de los Andes]. Repositorio institucional de la Universidad Peruana de los Andes. <https://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/4456>

Bunge, M. (2000). La investigación científica: *Su estrategia y su filosofía*. *Ariel*.(125-130). <https://ia800601.us.archive.org/9/items/BungeMarioLaInvestigacionCientificaSuEstrategiaYSuFilosofia/Bunge%20Mario%20-%20La%20Investigacion%20Cientifica%20-%20Su%20Estrategia%20Y%20Su%20Filosofia%20.pdf>

Camargo, M., Higuera, A. (2017). *Concreto hidráulico modificado con sílice obtenida de la cascarilla del arroz* [Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica, Bogotá, Colombia]. Repositorio institucional de la Universidad

Distrital Francisco José de Caldas.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5670998>

Chen, M., Li, L., & Wang, R. (2021). Influence of aggregate morphology on the workability of concrete mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 124, 104–204.

Collanqui, C., & Gamarra I. (2022). Influencia de la adición de fibra de acero reciclado producto de residuos de neumáticos en las propiedades físico mecánicas del concreto con relación A/C=0.45 y en la fisura miento por contracción plástica en losas en la ciudad de Juliaca - 2022. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio institucional de la Universidad Continental.

<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/13101>

Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). *Principles of geotechnical engineering* (9th ed.). Cengage Learning. <https://books.google.com/books?id=2g9KDwAAQBAJ>

Domski, J., Katzer, J., Zakrzewski, M., & Ponikiewski, T. (2017). Comparison of the mechanical characteristics of engineered and waste steel fiber used as reinforcement for concrete. *Journal of Cleaner Production*, 158, 18–28.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.162>

Ferdous, W., Manalo, A., Siddique, R., Mendis, P., Zhuge, Y., Wong, H. S., Lokuge, W., Aravinthan, T., & Schubel, P. (2021). Recycling of landfill wastes (tyres, plastics and glass) in construction – A review on global waste generation, performance, application and future opportunities. *Resources, Conservation & Recycling*, 173, 105745.

https://www.researchgate.net/publication/353141677_Recycling_of_landfill_wastes_t_yres_plastics_and_glass_in_construction_-

[A review on global waste generation performance application and future opportunities](#)

Hameed, A., Rasool, A., Lal, R., Qazi, A., & Nosheen, M. (2025). Transforming waste into strength with recycled tire steel fibers for superior concrete performance. Sustainable Structures. *Sustainable Development Press Limited.*

https://www.researchgate.net/publication/388823423_Transforming_waste_into_strength_with_recycled_tire_steel_fibers_for_superior_concrete_performance

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2022). Metodología de la investigación (7.^a ed.). McGraw-Hill.

Goodyear. (2005). *Estructura interna de un neumático radial de Goodyear*. Goodyear.

<https://www.goodyear.com/neumaticos-radiales>

Gutiérrez, J., Vidal, J. (2021). Diseño de viviendas homeostáticas con la combinación muros de Tecnopor - mallas electrosoldadas - fibra de vidrio - mortero, distrito VMT 2021. [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio institucional de la Universidad Cesar Vallejo.

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCVV_ff7cb8c141cec88b947e3ced360f187f/Details

Instituto Peruano de Economía. (2024, abril 5). *Economía de Apurímac creció 6,4 % en 2023 debido al impulso del sector minero* . <https://ipe.org.pe/economia-de-apurimac-crecio-6-4-en-2023-debido-al-impulso-del-sector-minero/>

Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2022). *NTP 339.035:2022. CONCRETO*. Medición del asentamiento del concreto de cemento hidráulico. Método de ensayo [Norma técnica

peruana]. INACAL. <https://www.cementosinka.com.pe/blog/normas-tecnicas-del-cemento-y-concreto-en-el-peru/>

Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2015). *NTP 339.034:2015. CONCRETO*. Determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas. Método de ensayo [Norma Técnica Peruana de 4ª ed.]. INACAL. <https://www.cementosinka.com.pe/blog/normas-tecnicas-del-cemento-y-concreto-en-el-peru/>

Instituto Nacional de Calidad. (2022, marzo 24). *NTP 339.078:2022. CONCRETO*. Determinación de la resistencia a la flexión del concreto en vigas simplemente apoyadas con cargas a los tercios de la distancia entre apoyos. Método de ensayo [Norma Técnica Peruana]. INACAL. <https://www.cementosinka.com.pe/blog/normas-tecnicas-del-cemento-y-concreto-en-el-peru/>

Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2021). *NTP 400.012:2021. AGREGADOS*. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global. Método de ensayo [Norma Técnica Peruana]. INACAL. <https://www.cementosinka.com.pe/blog/normas-tecnicas-del-cemento-y-concreto-en-el-peru/>

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2020). *Perú: Estimaciones y proyecciones de población por departamento, provincia y distrito, 2018-2020* [Boletín Especial]. Instituto Nacional de Estadística e Informática. Recuperado de la base de datos de Estimaciones y Proyecciones de Población del INEI. https://www.gob.pe/institucion/inei/colecciones/71202-estimaciones-y-proyecciones-de-poblacion-nacional-departamental-provincial-y-distrital?utm_source

- Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. (2017). *Norma INV E-414-07: Determinación de la resistencia a la flexión del concreto*. Manual de ensayos de materiales para carreteras, Colombia.
- Jiménez M., Domínguez R.(2020).La economía circular en la industria de la construcción: oportunidades para América Latina. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*. 171(50),256-260. <https://hdl.handle.net/11362/45846>
- Juárez , P. , Sánchez, E. , De La Cruz ,A. (2023). *Utilización de fibras de acero reciclado para mejorar el comportamiento estructural del pavimento rígido* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio institucional de la Universidad Cesar Vallejo. <https://doi.org/10.47460/uct.v27i121.750>
- Harmsen, T. (2002). "Diseño de estructuras de C°A". Obtenido de <https://stehven.files.wordpress.com/2015/06/disenodeestructurasdeconcreto-harmsen.pdf>
- Hassan, H. H., & de Brito, J. (2021). Effect of recycled steel fibres from tire waste on the workability and mechanical performance of concrete. *Construction and Building Materials*, 300, 124296. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124296>
- Kumar, S., Jindal, B. B., & Singh, R. (2020). Workability and strength evaluation of concrete using slump and compaction tests. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1034–1039.
- Lee, H., Kim, J., & Song, H. (2020). Mechanical performance and durability of concrete with optimized mixture designs. *Materials*, 13(7), 1605.
- Li, X., Zhang, Y., & Saberian, M. (2023). Recycled steel fibres from tire waste for enhanced concrete performance: A review. *Journal of Cleaner Production*, 387, 136473. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136473>

- Luo, Y., Zhao, J., & Li, P. (2020). Effects of coarse aggregate properties on concrete strength and durability. *Construction and Building Materials*, 242, 118–132.
- Machaca, C.(2022).*Evaluación de las propiedades físico mecánicas del concreto $f'c=210kg/cm^2$ adicionando fibras de acero de neumáticos reciclados, Juliaca - 2022.* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio institucional de la Universidad Cesar Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/88742>
- Michalik, A. (2022). Effectiveness of concrete reinforcement with recycled tyre steel fibres. *Material*, 2022. [Obtenido de https://doi.org/10.3390/ma15072444.](https://doi.org/10.3390/ma15072444)
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2016). *Concrete* (2nd ed.). Prentice Hall. <https://books.google.com/books?id=6R9RAAAAMAAJ>.
- Muñoz, M. (2018). Uso de fibras de acero en el concreto obtenidas del reciclaje de neumáticos. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional Autónoma de México <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/16070/UsodeFibrasdeAceroenelConcretoObtenidasdelReciclajedeNeumaticosMarianaJos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Muñoz, S., Nunton, J., Portocarrero, J. (2022). Comportamiento mecánico del concreto con adición de fibras de acero de neumáticos reciclados. Chiclayo: Universidad Señor de Sipán. [Tesis de pregrado, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio institucional de la Universidad Señor de Sipán. <https://doi.org/10.25100/iyv.v0i00.11741>
- Neville, A. M. (2012). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.

- Onuaguluchi, O., Borges, P., Bhutta, M. (2017). Recycled tyre steel fibres as reinforcement in concrete: *A review*. *Construction and Building Materials*, 153, 302–312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.105>
- Pasquel, C. E. (1998). "Tópicos de tecnología del concreto". Perú: Colegio de Ingenieros del Peru - Consejo Nacional.
- Pasquel, E. (1998). Tópicos de tecnología del concreto en el Perú. Lima.
- Pilakoutas, K., Graeff, A., Özyurt, N., & Loutas, T. (2023). A comprehensive review of incorporating steel fibers of waste tires in concrete composites. *Materials*, 15(21), 7420. <https://doi.org/10.3390/ma15217420>
- Pillaca, J. A. (2019). *Influencia de la incorporación de fibras de acero en las propiedades mecánicas del concreto* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. <https://repositorio.unsaac.edu.pe>
- Quizzes. (2016). *Tipos de fractura o falla al realizar el ensayo a la compresión*. Material educativo técnico.
- Ramírez B., Huamán, C., Quispe R., Moreno R., Espinoza V. (2023). *Propuesta de reutilización de neumáticos usados para fabricación de gránulos de caucho de la ciudad de Cajamarca* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio institucional de la Pontificia Universidad Católica del Perú <https://tesis.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/4ef6782e-dfa2-4a28-b22a-5fc69b6c15d2/content>
- Ramos. G. (2020). Adición de virutas de acero para mejorar la losa de concreto en la av. Díaz Bárcenas - Abancay 2020. [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio institucional de la Universidad Cesar Vallejo

https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/55138/Rodr%C3%ADguez_HJL-SD.pdf?sequence=1

Rivva López, E. (2000). *Naturaleza y materiales del concreto* (1.^a ed.). Capítulo Peruano del American Concrete Institute (ACI-Perú).

https://www.yumpu.com/es/document/view/63290940/rivva-e-naturaleza-y-materiales-del-concreto-1ra-ed-2000#google_vignette

Saba et al. (2021). Strength and flexural behavior of steel fiber and silica fume incorporated self-compacting concrete. Obtenido de

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785421002933>

Sabino, C. (2014). *El proceso de investigación* (6.^a ed.). Editorial Panapo.

https://paginas.ufm.edu/sabino/ingles/book/proceso_investigacion.pdf

Sayahi, F.(2021). Effect of steel fibres extracted from recycled tyres on plastic shrinkage cracking in self-compacting concrete. *Magazine of Concrete*. Obtenido de DOI

[10.1680/jmacr.20.00116](https://doi.org/10.1680/jmacr.20.00116).

Scrivener, K. L., Martirena, F., Bishnoi, S., & Maity, S. (2019). Calcined clay limestone cements (LC³): A sustainable alternative. *Cement and Concrete Research*, 124, 105–115.

Siddique, R., Naik, T. (2004). Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview. *Waste Management*, 24(6), 563–569.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.01.006>

Signus. (2015). *Composición de los neumáticos*. <https://www.signus.es>

- Wang, X., Zhang, R., & Li, Y. (2021). Effects of fine aggregate characteristics on the mechanical properties of high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 273, 121–085.
- Wu, Z., Khayat, K. H., & Shi, C. (2020). Influence of mixture parameters on compressive strength of ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 114, 103–799.
- Zhang, D., Zhao, Q., & Zhang, W. (2020). Characterization of particle size distribution and mechanical behavior of granular soils. *Engineering Geology*, 272, 105–635.
- Zhang, S., Li, J., & Guo, Y. (2021). Early-age hydration and setting behavior of cement-based materials analyzed by calorimetry and ultrasonic techniques. *Materials and Structures*, 54, 1–14.
- Zhang, Y., Wang, P., & Cao, Z. (2022). Effect of curing regimes on hydration, microstructure, and durability of cement composites. *Construction and Building Materials*, 316, 125–705.

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes