

CAPITULO I

CAPITULO I

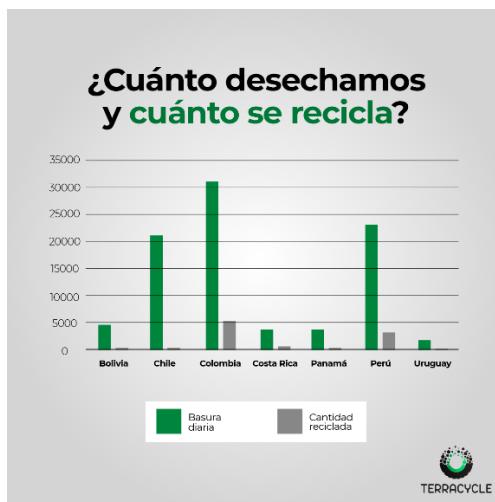
1.1 Introducción

1.1.1 Problema

1.1.1.1 Planteamiento del problema

En Bolivia, la gestión de residuos sólidos urbanos sigue siendo una tarea crítica con múltiples desafíos. Según datos de la empresa recicladora Terracycle, se generan aproximadamente 5.000 toneladas de basura diariamente, pero solo una fracción mínima es reciclada. Esta situación refleja una profunda brecha entre la generación de residuos y su aprovechamiento, lo cual agrava los impactos ambientales, sanitarios y económicos del país.

Figura 1
Generación diaria de residuos y reciclaje en países de América Latina



Fuente: Empresa recicladora Terracycle

Además, según datos de Terracycle, en Bolivia se utilizan casi 3 millones de llantas al año, muchas de las cuales terminan desechadas sin un tratamiento adecuado. Estas llantas contienen componentes valiosos como acero y fibras textiles, que pueden ser recuperados y reutilizados en nuevas aplicaciones. Su acumulación representa un serio problema ambiental por su volumen, durabilidad y dificultad de degradación. Incorporar materiales derivados de llantas recicladas en el hormigón, como fibras metálicas y sintéticas, no solo permitiría reducir este tipo de residuos sino también

mejorar las propiedades estructurales del material, contribuyendo a una construcción más sostenible en el contexto boliviano.

Figura 2
Uso anual de llantas en Bolivia



Fuente: Empresa recicladora Terracycle

1.1.1.2 Formulación del problema

¿De qué manera influye la adición de fibra de acero y fibras textiles reciclados producto de residuos de neumáticos en las propiedades flexión del hormigón con relación a/c = 0.55?

1.1.1.3 Sistematización del problema

¿Cuál es el porcentaje de fibras de acero reciclado y fibras textiles de neumáticos necesario para obtener un diseño de mezcla ideal, al momento de elaborar hormigón?

¿Cuáles son las ventajas y desventajas del uso de fibras de acero y textil reciclado de neumáticos en comparación con el hormigón normal?

¿En qué medida las fibras de acero reciclado de neumáticos contribuyen al control de la fisuración en el hormigón no armado?

1.1.2 Objetivos

1.1.2.1 Objetivo general

- Evaluar la resistencia a la flexión del hormigón con la incorporación de fibras de acero y fibras textiles recicladas de neumáticos en distintos porcentajes respecto al volumen del hormigón, mediante la elaboración de mezclas, ensayos de flexión y tracción indirecta, con el fin de impulsar una alternativa de hormigón sustentable.

1.1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar físicamente las fibras de acero-textil recicladas de neumáticos (longitud, diámetro, densidad, etc.), mediante mediciones y ensayos de laboratorio, para contar con datos precisos de sus propiedades.
- Caracterizar los agregados fino y grueso realizando ensayos normalizados según ASTM, requeridos por el método ACI 211.1, para garantizar la calidad de los materiales utilizados en el hormigón.
- Diseñar la mezcla patrón de hormigón (sin fibras) utilizando el método ACI 211.1 para alcanzar una resistencia a la compresión de $f'c = 25$ MPa.
- Diseñar mezclas de hormigón incorporando diferentes porcentajes de fibras de acero y fibras textiles recicladas (0.5%, 1%, 1.5% y 2%) siguiendo el método ACI 211.1 y adaptando la dosificación para la adición de fibras, con el fin de evaluar su influencia en la resistencia a la flexión.
- Analizar la influencia de la adición de fibras en la trabajabilidad y manejabilidad de las mezclas mediante observación directa y aplicación del ensayo de revenimiento, para determinar posibles variaciones en el proceso de colocación
- Determinar la resistencia a la flexión de las mezclas de hormigón patrón y con fibras realizando ensayos de flexión y tracción indirecta a los 7, 14 y 28 días de curado, para medir el desempeño mecánico del material.
- Comparar la resistencia a la flexión de las mezclas de hormigón con diferentes porcentajes de fibras de acero y fibras textiles recicladas con la mezcla patrón

sin fibras, mediante análisis estadístico de los resultados obtenidos, para determinar el aumento o disminución de la resistencia y evaluar la eficacia de la adición de fibras.

- Establecer una dosificación recomendada de fibras de acero y fibras textiles recicladas en hormigón, a partir del procesamiento y análisis comparativo de los resultados, para lograr un equilibrio entre resistencia a la flexión, trabajabilidad y viabilidad económica

1.1.3 Justificación

1.1.3.1 Justificación académica

La presente investigación aporta al campo de la ingeniería civil y los materiales de construcción, ampliando el conocimiento sobre el comportamiento del hormigón reforzado con fibras recicladas. Este trabajo complementa estudios previos al analizar específicamente el efecto combinado de fibras de acero y fibras textiles recicladas de neumáticos, contribuyendo a la formación de criterios técnicos para futuras investigaciones y favoreciendo la actualización de contenidos académicos relacionados con hormigones especiales y sostenibilidad en la construcción.

1.1.3.2 Justificación técnica

Esta investigación se desarrolla con la finalidad de distinguir el comportamiento del hormigón al adicionar fibras de acero-textil reciclado de neumáticos con agregados de la zona que son utilizados en las distintas construcciones civiles de la ciudad de Tarija-Bolivia, y todo sustentado en base a ensayos técnicos de laboratorio con el fin de obtener resultados confiables. La propuesta de utilizar materiales reciclados permite no solo mejorar ciertas propiedades mecánicas del hormigón, sino también disminuir la dependencia de recursos tradicionales, planteando alternativas viables para la industria de la construcción.

1.1.3.3 Justificación social

Socialmente, esta investigación responde a la creciente necesidad de gestionar de manera responsable los residuos sólidos, como neumáticos fuera de uso, que representan un serio problema ambiental por su volumen y lento proceso de

degradación. Al demostrar la posibilidad de reutilizar estos residuos en hormigón, el trabajo promueve prácticas constructivas más sostenibles, contribuyendo a la reducción de contaminación y fomentando una conciencia ambiental en la sociedad.

Es importante destacar que, para aprovechar al máximo el potencial de las fibras de acero reciclado combinado con fibra textil, es necesario continuar con la investigación y el desarrollo de esta tecnología, así como fomentar la capacitación y sensibilización de los profesionales de la construcción y la sociedad en general sobre sus ventajas y aplicaciones.

1.1.4 Alcance del estudio

1.1.4.1 Tipo de estudio

La investigación se caracteriza por su enfoque cuantitativo, lo que implica la recopilación y análisis de datos para probar la hipótesis planteada. Esto se realiza mediante la evaluación del comportamiento de las vigas a flexión y la verificación de su cumplimiento con los parámetros establecidos en la norma correspondiente.

1.1.4.2 Variables

1.1.4.2.1 Variable independiente

Distintos porcentajes de fibras hibridas de acero-textil.

- 0.5% de fibras de acero y textil en relación con el volumen del hormigón.
- 1% de fibras de acero y textil en relación con el volumen del hormigón.
- 1.5% de fibras de acero y textil en relación con el volumen del hormigón.
- 2% de fibras de acero y textil en relación con el volumen del hormigón.

1.1.4.2.2 Variable dependiente

Resistencia a la flexión.

Tabla 1
Operacionalización de variables

Tipo de variable	Variable de estudio	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Unidades
Dependiente	Comportamiento mecánico del hormigón	La capacidad del hormigón para resistir fuerzas aplicadas	Características físicas de los agregados	Granulometría	%
				Peso específico	Kg/m3
				Peso Unitario	Kg/m3
			Características físicas del hormigón fresco	Asentamiento	pulgada
			Características mecánicas del hormigón endurecido	Flexión	Mpa
Independiente	Fibra de acero y textil de neumático reciclado	Son materiales obtenidos del procesamiento de neumáticos desechados	Características físicas de la fibra de acero de neumático reciclado	Cantidad de fibras	% y Kg

Fuente: Elaboración propia

1.1.4.3 Hipótesis

El hormigón con adición de fibra de acero y fibra textil reciclado de neumáticos en relación del volumen del hormigón, en diferentes porcentajes tendrá un incremento dentro de un rango de 5 a 20% de la resistencia a flexión con respecto al hormigón de control.

1.1.4.4 Restricciones

- Los cálculos de dosificación de este proyecto de investigación, se realizará en base a una resistencia a compresión del hormigón con $f'c = 25$ Mpa.
- La investigación se realizará variando únicamente la cantidad de fibra de acero y lana de textil reciclado en porcentajes de 0.5%, 1%, 1.5% y 2%, considerando constante los demás componentes.
- La fibra de acero y residuo de textil será extraída de los neumáticos por una empresa dedicada a la fabricación de artículos de goma e insumos de caucho reciclado (Terracycle).
- Estas probetas no cuentan con armadura de acero.
- No se llevarán a la práctica ensayos de propiedades físicas del cemento

CAPITULO II

CAPITULO II

2.1 Marco teórico

2.1.1 Hormigón reforzado con fibras

2.1.1.1 Definiciones

A continuación, se indican algunas definiciones del hormigón reforzado con fibras, dadas por diversas bibliografías y normas:

Según el American Concrete Institute (ACI), el hormigón reforzado con fibras se define como "un hormigón realizado con cementos hidráulicos que contiene agregado fino o fino y grueso y fibras discontinuas. Mallas continuas o barras largas quedan excluidas de la definición" (ACI, s.f.).

La Norma RILEM define este material como "un hormigón realizado con cementos hidráulicos con o sin agregados de varios tamaños, que incorpora refuerzos con fibras discretas" (RILEM, s.f.).

El Boletín Oficial CNR N. 166 Parte IV explica que "la utilización de fibras en el interior de la matriz tiene como finalidad la formación de un material diverso en el cual el conglomerado, que ya puede ser considerado un material diferente constituido por esqueleto lítico dispersado en una matriz de pasta y cemento hidratada, está unido a un agente reforzante formado por un material fibroso de otra naturaleza" (CNR, s.f.).

Según la instrucción de hormigón estructural española "EHE-08" se define como hormigones reforzados con fibras (HRF) aquellos que incluyen en su matriz fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa, con el fin de mejorar algunas prestaciones ya sean en estado fresco, primeras edades o en estado endurecido

2.1.1.2 Uso de la Fibra en la Construcción

Desde hace mucho tiempo las fibras fueron usadas como material de construcción. No hace mucho hubo un crecimiento de interés por su incorporación al concreto

promezclado, prefabricado. Los factores principales que controlan el desempeño del material compuesto son:

1. Propiedades físicas de las fibras y de la matriz.
2. Resistencia de adherencia entre la fibra y la matriz.

Las fibras se adicionan en bajos volúmenes, de frecuencia menos del 1%, y han demostrado eficiencia en el control del fisuramiento por contracción, llegando a disminuir la abertura de las fisuras.

2.1.1.3 Tipos de fibras

2.1.1.3.1 Por su material

Por otro lado, de acuerdo con su naturaleza, las fibras se clasifican en:

- Fibras de acero.
- Fibras poliméricas.
- Fibras de vidrio resistentes a los álcalis.

2.1.1.3.1.1 Fibras de acero

Estas fibras deberán ser conformes con la norma UNE-EN 14889-1 y, según el material base utilizado en su fabricación, se clasifican en:

Grupo I: alambres estirados en frío.

Grupo II: láminas cortadas.

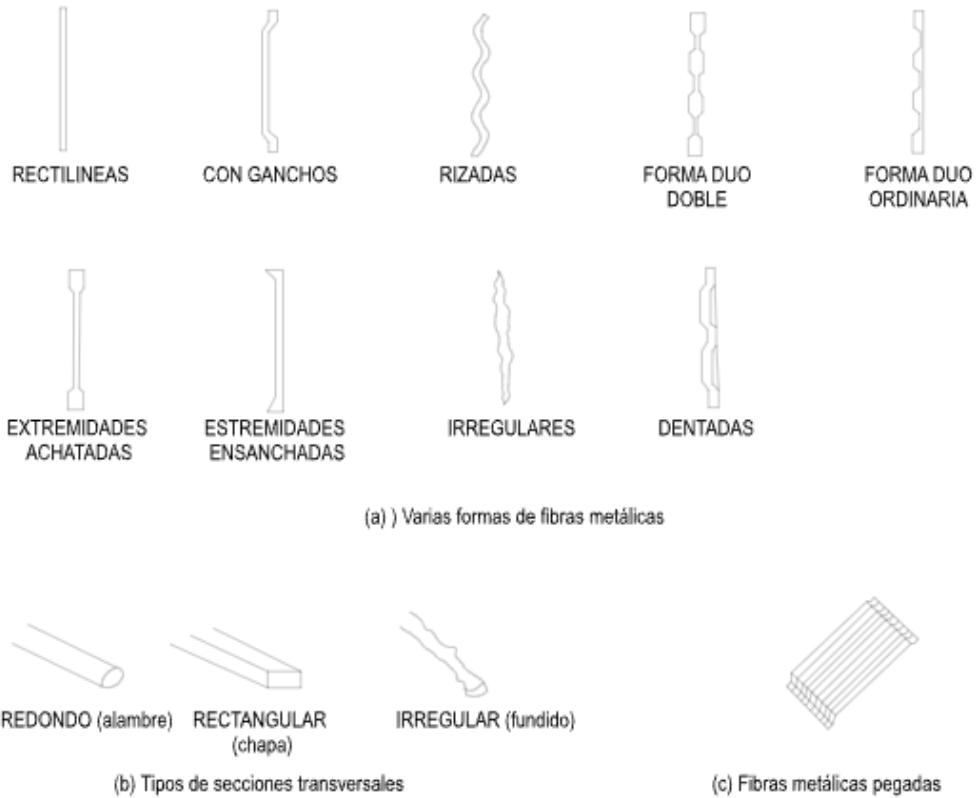
Grupo III: extractos fundidos.

Grupo IV: conformados en frío.

Grupo V: aserrados de bloques de acero.

La forma de la fibra tiene una incidencia importante en las características adherentes de la fibra con el hormigón y puede ser muy variada: rectas, onduladas, corrugadas, conformadas en extremos de distintas formas, etc.

Figura 3
Ejemplo de fibras de diferentes formas.



Fuente: Elaboración propia

2.1.1.3.1.2 Fibras poliméricas

Están formadas por un material polimérico (polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, alcohol de polivinilo, acrílico, nylon, poliéster) extrusionado y posteriormente cortado. Estas pueden ser adicionadas homogéneamente al hormigón, mortero o pasta. Se rigen por la norma UNE-EN 14889-2.

2.1.1.3.2 Por su forma física

se clasifican en:

2.1.1.3.2.1 Clase I: Microfibras < 0,30 mm de diámetro

Las microfibras se emplean para reducir la fisuración por retracción plástica del hormigón, especialmente en pavimentos y soleras, pero no pueden asumir ninguna función estructural.

a) mono-filamentosas → Son fibras formadas por un solo filamento continuo, generalmente liso y con un diámetro uniforme a lo largo de toda su longitud. Ejemplos: fibras de acero lisas, fibras sintéticas tipo nylon o polipropileno monofilamento.

- Se parecen a un “hilo” individual.
- Ventaja: fácil de medir y caracterizar.
- Inconveniente: menor anclaje mecánico que las fibrilosas, salvo que tengan superficie rugosa.

b) fibrilosas → Son fibras que no son un filamento único, sino que están formadas por múltiples microfilamentos entrelazados o ramificados, creando una estructura parecida a una “red” o “pelusa”.

- Ventaja: mejor adherencia a la matriz de hormigón por sus ramificaciones.
- Inconveniente: muy irregulares, difíciles de medir en diámetro y longitud exacta.

2.1.1.3.2.2 Clase II: Macrofibras > 0,30 mm de diámetro

Las macrofibras pueden colaborar estructuralmente, siempre que su longitud esté comprendida entre 20 mm y 60 mm, y que la longitud de las fibras sea como mínimo 3 veces el tamaño máximo del árido.

2.1.1.3.3 Por su función

De una manera general se pueden clasificar como **fibras estructurales**, aquellas que proporcionan una mayor energía de rotura al hormigón en masa (en el caso de las fibras estructurales, la contribución de las mismas puede ser considerada en el cálculo de la respuesta de la sección de hormigón), o como **fibras no estructurales**, a aquellas que sin considerar en el cálculo esta energía suponen una mejora ante determinadas propiedades como por ejemplo el control de la fisuración por retracción, incremento de

la resistencia al fuego, abrasión, impacto y otros. (Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08), Anejo 14: Hormigón fibroreforzado, 2008)

A continuación, se muestran una tabla con las fibras más utilizadas y algunas de sus características más relevantes:

Tabla 2

Tipos de fibras y principales propiedades físicas y mecánicas

Tipo de Fibra	Diámetro Equivalente (mm)	Densidad (kg/m ³)	Resistencia a Tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alargamiento de Rotura (%)
Acrílico	0.02-0.35	1100	200-400	2	1.1
Asbesto	0.0015-0.02	3200	600-1000	83-138	1-2
Algodón	0.2-0.6	1500	400-700	4.8	3-10
Vidrio	0.005-0.15	2500	1000-2600	70-80	1.5-3.5
Grafito	0.008-0.009	1900	1000-2600	230-415	0.5-1
Aramidá	0.01	1450	3500-3600	65-133	2.1-4
Nylon	0.02-0.4	1100	760-820	4.1	16-20
Poliéster	0.02-0.4	1400	720-860	8.3	11-13
Polipropileno	0.02-1	900-950	200-760	3.5-15	5-25
Polivinil alcohol	0.027-0.660	1300	900-1600	23-40	7-8
Carbón	-	1400	4000	230-240	1.4-1.8
Rayón	0.02-0.38	1500	400-600	6.9	10-25
Basalto	0.0106	2593	990	7.6	2.56
Poliétileno	0.025-1	960	200-300	5.0	3
Sisal	0.08-0.3	760-1100	228-800	11-27	2.1-4.2
Coco	0.11-0.53	680-1020	108-250	2.5-4.5	14-41
Yute	0.1-0.2	1030	250-350	26-32	1.5-1.9
Acero	0.15-1	7840	345-3000	200	4-10

Fuente: (ACI 544)

2.1.2 Hormigón reforzado con fibras de acero y fibras textiles

2.1.2.1 Componentes del hormigón reforzado con fibras

2.1.2.1.1 Cemento

El cemento es el componente más activo del hormigón y, que generalmente, tiene el mayor costo unitario. Por ello, y considerando que las propiedades del hormigón dependen tanto de la cantidad como la calidad de sus componentes, en forma económica las propiedades deseadas para una mezcla dada. En el mercado boliviano existe variedad de cementos para ser empleados por el usuario y la mayoría de ellos proporcionan adecuados niveles de resistencia y durabilidad en las estructuras de hormigón.

Algunos de los cementos disponibles proporcionan niveles más altos para determinadas propiedades que aquellos exigidos por las especificaciones de la obra, por lo que

siempre debe indicarse en estas los requisitos exigidos para el cemento. Imponer requisitos que no son necesarios es antieconómico y, además, puede perjudicar características importantes del hormigón.

La totalidad de los cementos empleados en Bolivia son cementos portland que cumplen con los requisitos que especifica la Norma Boliviana NB 011 y ASTM C150; o cementos combinados, que cumplen con lo indicado con la Norma ASTM C595. (Antezama, 2012)

2.1.2.1.1.1 Cementos Portland

Con esta denominación existen tres tipos:

2.1.2.1.1.1.1 Cementos Portland, tipo I

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: Clinker Portland en proporción no menor del 95% en masa y de cualquiera de los componentes adicionales definidos en esta norma, o mezclas de ellos, en proporción no mayor del 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que deberá añadirse al mismo con la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos

2.1.2.1.1.1.1.2 Cementos Portland con puzolana, tipo IP

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: Clinker Portland en proporción no menor del 70% ni mayor del 94% en masa, de puzolana natural en proporción no menor del 6% ni mayor del 30% en masa y de otros de los componentes adicionales definidos en esta norma, en proporción comprendida entre el 0% y el 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que deberá añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos.

2.1.2.1.1.1.1.3 Cementos Portland con filler calizo, tipo IF

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: Clinker Portland en proporción no menor del 80% ni mayor del 94% en masa, filler calizo en proporción no menor del 6% ni mayor del 15% en masa y de otros de los componentes adicionales definidos en esta misma norma, en proporción comprendida entre el 0% y

el 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que deberá añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos.

2.1.2.1.1.2 Cementos puzolánicos, tipo P

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: Clinker Portland en proporción no menor del 60% en masa, de puzolanas naturales, cenizas volantes u otros materiales puzolánicos en proporción total no mayor del 40% en masa y de otros de los constituyentes definidos en esta norma, en proporción total no mayor del 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que deberá añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos. Estos cementos deberán cumplir con el ensayo de puzolanicidad, de acuerdo con la norma NB 642-95. (Norma Boliviana NB 011-Cemento, 1995)

Tabla 3
Clasificación y composición de los cementos

Tipos de cemento			Proporción en masa % (1)			
			Componentes principales			Componentes adicionales (2) (3)
Denominación	Designación	Tipo	Clinker	Puzolana Natural	Filler Calizo (3)	
Cemento Portland	Cemento Portland	I	95 a 100			0 a 5
	Cemento Portland con puzolana	IP	70 a 94	6 a 30	-	0 a 5
	Cemento Portland con filler calizo	IF	80 a 94	-	6 a 15	0 a 5
Cemento puzolánico		P	≥ 60	≤ 40	-	0 a 5

Fuente: (Norma Boliviana NB 011-Cemento, 1995)

2.1.2.1.2 Agregados

Porque al menos tres cuartas partes del volumen del concreto están ocupadas por agregado, no es de extrañar de que la calidad de éste sea de suma importancia. Los agregados no sólo pueden limitar la resistencia del concreto, puesto que agregados débiles no pueden constituir un concreto resistente, sino que además sus propiedades afectan en gran medida tanto la durabilidad como el comportamiento estructural del concreto. Originalmente, los agregados se consideraban un material inerte, que se repartía en toda la pasta de cemento, más que nada por razones económicas. Sin embargo, es posible asumir un punto de vista opuesto y pensar que los agregados son un material de construcción unido a un todo cohesivo por medio de la pasta de cemento, como sucede en las construcciones de mampostería. De hecho, los agregados no son realmente inertes y sus propiedades físicas, térmicas y, a veces, químicas, influyen en el comportamiento del concreto. (Neville A. , 1999)

2.1.2.1.2.1 Agregado fino

El agregado fino consistirá en arena natural, arena manufacturada o una combinación de ambas siendo la mayoría de sus partículas menores que 5 mm. Los agregados finos deben cumplir ciertas reglas para darles un uso ingenieril óptimo: deben consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y de otros materiales finos que pudieran afectar la Hidratación y la adherencia de la pasta de cemento. (ASTM C 33 –03)

Las partículas de agregado que sean desmenuzables o susceptibles de resquebrajarse son indeseables para realizar el tamizado del agregado fino debe cumplir los requerimientos de la tabla 4.

Tabla 4
Requerimiento de tamizado en agregados finos.

Tamaño de la malla	Porcentaje que pasa en peso
9.52 mm	100
4.75 mm	95 a 100
2.36 mm	80 a 100
1.18 mm	50 a 85
0.6 mm	25 a 60
0.3 mm	5 a 30
0.15 mm	0 a 10

Fuente: (ASTM C 33 –03)

2.1.2.1.2.2 Agregado Grueso

Los agregados gruesos consisten en una grava o una combinación de gravas o agregado triturado cuyas partículas sean predominantemente mayores que 5 mm y generalmente entre 9.5 mm y 38 mm. Los agregados gruesos deben cumplir ciertas reglas para darles un uso ingenieril óptimo: deben consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y de otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento. Las partículas de agregado que sean desmenuzables o susceptibles de resquebrajarse son indeseables. (ASTM C 33 –03).

Tabla 5
Requerimiento de tamizado en agregados gruesos.

Nº de tamaño	Tamaño Maximo Nominal (Tamices con abertura cuadrada)	Cantidades mas finas que cada tamiz de laboratorio (Abertura cuadrada), porcentaje de masa												
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37.5 mm	25 mm	19 mm	12.5 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm
1	90 a 37.5	100	90 a 100	...	25 a 60	...	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...	...
2	63 a 37.5 mm	...	...	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...	...
3	50 a 25 mm	...	...	...	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...
357	50 a 4.75 mm	...	...	...	100	95 a 100	...	35 a 70	...	10 a 30	...	0 a 5	...	...
4	37.5 a 19 mm	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...
467	37.5 a 4.75 mm	...	...	...	...	100	95 a 100	...	35 a 70	...	10 a 30	0 a 5	...	...
5	25 a 12.5 mm	...	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	...	...	...
56	25 a 9.5 mm	...	...	...	...	...	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	...	...
57	25 a 4.75 mm	...	...	...	...	...	100	95 a 100	...	25 a 60	...	0 a 10	0 a 5	...
6	19 a 9.5 mm	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	...	...
67	19 a 4.75 mm	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	...	20 a 55	0 a 10	0 a 5	...
7	12.5 a 4.75 mm	...	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	...
8	9.5 a 2.36 mm	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 a 100	10 a 30	0 a 5	0 a 5

Fuente: (ASTM C 33 –03)

2.1.2.1.3 Agua

2.1.2.1.3.1 Agua de Mezclado

El agua empleada en el mezclado del concreto debe estar limpia y libre de cantidades perjudiciales de aceites, ácidos, álcalis, sales, materia orgánica u otras sustancias nocivas para el concreto o el refuerzo.

Casi cualquier agua natural que se pueda beber (potable) y que no tiene un sabor u olor marcado, puede utilizarse como agua de mezclado en la elaboración de concreto. Cuando las impurezas en el agua de mezclado son excesivas, pueden afectar no sólo el tiempo de fraguado, la resistencia del concreto y la estabilidad volumétrica (variación dimensional), sino que también pueden provocar eflorescencia o corrosión en el refuerzo. Siempre que sea posible, debe evitarse el agua con altas concentraciones de sólidos disueltos. (ASTM C 33 –03)

2.1.2.1.3.2 Agua de Curado

El aumento de la resistencia del hormigón continuará con el pasar del tiempo mientras se encuentre cemento sin hidratar, con la condición de que el hormigón permanezca húmedo o tenga una humedad relativa superior a aproximadamente el 80%, y permanezca favorablemente su temperatura, por lo que una vez que el hormigón haya fraguado, es necesario el suministro de agua para garantizar la completa hidratación de las partículas de cemento.

El objeto del curado es mantener el hormigón saturado, o lo más próximo posible a la saturación, hasta que los espacios que inicialmente estaban saturados de agua se llenen hasta un nivel deseado con los productos de la hidratación del cemento

2.1.2.1.4 Fibra de acero-textil reciclado de neumáticos

2.1.2.1.4.1 Composición de un neumático típico

Las llantas fuera de uso representan una fuente importante de materiales reutilizables, entre ellos el acero y las fibras textiles (como poliéster o nylon). Según información de Terracycle, la composición promedio de una llanta es la siguiente:

Figura 4

Composición típica de un neumático



Fuente: Empresa recicladora Terracycle

2.1.2.1.4.2 Proceso de reciclaje de neumáticos: Obtención de fibras

La empresa dedicada al reciclaje de neumáticos Terracycle, realiza un proceso que consiste en la extracción del caucho, el cual es el principal componente valorizado y reutilizado en diversos productos. Sin embargo, durante este proceso, los otros componentes presentes en los neumáticos, tales como fibras textiles y fibras de acero, no son aprovechados por la empresa y se consideran residuos.

Para fines de esta investigación, se propone el aprovechamiento de estas fibras textiles y de acero, que usualmente son descartadas, incorporándolas como fibras reforzantes en el hormigón.

Paso 1: Recolección y acopio de neumáticos fuera de uso

Terracycle recolecta neumáticos desechados a través de rutas de acopio en colaboración con municipios y empresas privadas. Actualmente, procesan entre 50 y 60 llantas por día, contribuyendo significativamente a la reducción de residuos en la región.

Paso 2: Trituración y separación de componentes

Los neumáticos recolectados son sometidos a un proceso de trituración que permite separar sus componentes principales:

- **Caucho granulado:** obtenido en granulometrías de 0.5 a 4 mm, utilizado en la fabricación de productos como baldosas, suelas de zapatos y revestimientos para pavimentos.
- **Viruta de acero:** acero de alta resistencia triturado según la norma ASTM 1080
- **Fibras textiles:** compuesta principalmente de poliéster.

Paso 3: Comercialización de materiales reciclados

Terracycle vende estos materiales reciclados a empresas que los utilizan como materia prima en diversos productos, promoviendo así la economía circular y la sostenibilidad en la región

Figura 5
Proceso de reciclaje de neumáticos



Fuente: Empresa recicladora Terracycle

2.1.2.1.4.3 Incorporación de fibras de acero y textil recicladas en mezclas de hormigón

Se ha observado que la incorporación de las fibras modifica el comportamiento no lineal del hormigón especialmente a tracción, cambiando el comportamiento frágil del hormigón convencional a dúctil, también impidiendo la apertura y propagación de fisuras aumentando la capacidad de mantener deformaciones sostenidas bajo acciones sin llegar al colapso, lo que se podría interpretar como un aumento de la tenacidad (habilidad que tiene el material para absorber energía durante la deformación plástica sin que se produzca la fractura) resultando el hormigón reforzado con fibras (HRF) muy adecuado para sobrellevar acciones dinámicas o prevenir situaciones donde se requiera el control de la fisuración. Este incremento de la tenacidad es una de las características más valoradas del hormigón reforzado con fibras (HRF).

Son filamentos de dimensiones mínimas que tienen un parecido al alambre, estos son obtenidos de los neumáticos que ya no se usan, ya recolectados los neumáticos estos se trozan en función a la finalidad del su empleo, la cantidad de filamentos de acero existente en este representan aproximadamente un 13 % del peso total del neumático,

por otro lado, los neumáticos pertenecientes a vehículos de carga pesada y camiones la cantidad de acero existente es de aproximadamente un 25 %, esto indica que se tiene una fuente grande de ingreso para la obtención de fibras las que pueden ser usadas en diferentes fines. Las fibras de acero generalmente son usadas de entre 0.2 a 1 % de fracción volumen; estas dosificaciones son equivalentes desde un 15 a 78 kg/m³ aproximadamente, en otros casos puede añadirse en mayor cantidad de acuerdo con el uso que se le dará, por ejemplo, se usa más de un 2 % de fracción volumen para ser empleadas en cajas fuertes y bóvedas. (GREEN, 2022)

2.1.2.1.4.4 Aplicaciones de hormigón con fibras

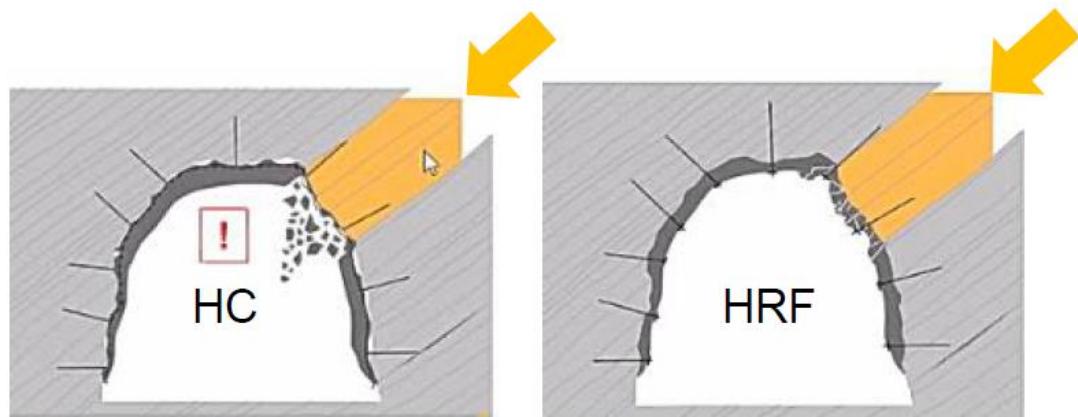
2.1.2.1.4.4.1 Túneles

Según (Zerbino, 2020), el hormigón reforzado con fibras (HRF) resulta particularmente eficiente en estructuras con alto grado de redundancia estructural, razón por la que se le implementa ampliamente en la construcción y refuerzo de: pavimentos y pisos industriales. Sin embargo, su aplicación también abarca la industria del premoldeado, la tunelería, la estabilización y contención de suelos, entre otras. En un gran número de estructuras, el HRF se ve sometido a cargas dinámicas de tipo impacto, y es su buen desempeño ante este tipo de solicitudes lo que le ha dado un lugar privilegiado dentro de la industria de la construcción. En la excavación de túneles, tradicionalmente se implementaron mallas o entramados de barras de acero en combinación de hormigón proyectado convencional (HC) para lograr el sostenimiento primario; como se ve en la Figura 6, esta solución generaba vacíos (sombras) detrás de la pared de hormigón, que eran desfavorables para la estructura frente a la relajación del suelo, pero también, dada la baja capacidad postfisuración del HC, cuando se presentaban desprendimientos súbitos de terreno, el impacto desintegraba parcialmente la pared y traía consigo muchos conflictos (Sika, 2000). Para resolver esta situación, se comenzó a emplear HRF proyectado directamente sobre la excavación, sin malla de refuerzo. La solución ha sido muy eficiente, ya que, por una parte, evita los espacios vacíos tras muro y por otra, debido a la buena performance del HRF en impacto, los colapsos se inhibieron

(Rey, 2020). Un caso similar al de los túneles ocurre en otras obras de contención de suelos.

Debido a las ventajas que representa el uso de fibras en el hormigón, tanto desde el punto de vista constructivo, económico y mecánico, su popularidad va en ascenso y su implementación se ha vuelto casi obligatoria en muchas aplicaciones. Entre las ventajas que brindan las fibras resaltan la facilidad para incorporarlas a la masa del hormigón, la reducción de los tiempos de obra, debido a que en ciertos casos permiten bajar las cuantías de acero, y según el tipo de fibra, grandes beneficios al hormigón en estado fresco y endurecido.

Figura 6
Sostenimiento primario de túneles con hormigón convencional (HC) y con hormigón reforzado con fibras (HRF)



Fuente: (Rey, 2020)

Figura 7
Aplicación de hormigón reforzado con fibras en túneles



Fuente: Universidad Nacional Autónoma de México

2.1.2.1.4.4.2 Pisos industriales

Los pisos de naves industriales también son elementos de hormigón típicamente sometidos a impacto, durante el tiempo de construcción del galpón y en el tiempo en servicio de la obra. En principio las fibras en este tipo de obras se emplearon con fines de aumentar el espaciamiento entre juntas y entre otros aspectos, reducir los efectos de la contracción del hormigón; sin embargo, el buen desempeño en impacto de los HRF lo han hecho apto para estas estructuras. En la Figura 7 se muestra el piso de un depósito para almacenamiento de grandes bobinas de acero (15 ton), construido con un hormigón que contiene fibras (Pombo, Altamirano, Giaccio, & Zerbino, 2020) .En este caso, la estructura del piso se apoyó sobre sobre una subbase de baja capacidad portante. La incorporación de fibras permitió mejorar la performance de la losa respecto a una previa que fue construida con hormigón simple. Debido al efecto de las fibras fue posible reducir el espesor de la losa y lograr deformaciones sin la aparición de grandes aberturas de fisuras

Figura 8
Depósito para almacenamiento de grandes bobinas de acero



Fuente: (Pombo, Altamirano, Giaccio, & Zerbino, 2020)

2.1.3 Características y Propiedades de los Agregados.

2.1.3.1 Análisis Granulométrico y Modulo de Finura de los Agregados (ASTM C-136)

Este método de ensayo se utiliza para determinar la distribución por tamaño de las partículas de los áridos finos y gruesos mediante el uso de tamices.

Algunas especificaciones para los áridos, que tienen referencia con este método de ensayo, contienen requerimientos granulométricos que incluyen ambas fracciones, áridos finos y gruesos. Se incluyen las instrucciones para el análisis granulométrico de estos árido.

Este método de ensayo se usa principalmente para determinar la granulometría de los materiales propuestos para ser utilizados como áridos o que están siendo empleados como áridos. Los resultados se usan para determinar la concordancia de la distribución del tamaño de las partículas con los requerimientos de las especificaciones aplicables y para proporcionar la información necesaria para controlar la producción de diversos productos de los áridos y de mezclas que contengan áridos. La información también puede ser de utilidad para establecer relaciones concernientes a la porosidad y al macizo. (ASTM C-136)

Módulo de finura: Es un indicador aproximado del tamaño medio de los agregados. Cuando este valor es bajo quiere decir que el agregado es fino, cuando es alto es señal de agregado grueso. El módulo de finura no distingue las granulometrías, pero es caso de agregados que estén dentro de los porcentajes especificados en las normas granulométricas, sirve para controlar la uniformidad de los mismos. (Antezama, 2012)

En el agregado fino hay dos elementos que deben ser considerados, por un lado, el módulo de finura (MF), y por el otro la continuidad en los tamaños, ya que algunas arenas pueden tener módulos de finuras aceptables (entre 2.2 y 3.1) y carecer de alguna clase granulométrica. Si consideramos únicamente el módulo de finura, pueden obtenerse dos condiciones desfavorables: una de ellas existe cuando el módulo de finura es mayor a 3.1 (arena gruesa), en donde puede ocurrir que las mezclas sean poco trabajables, faltando cohesión entre sus componentes y requiriendo mayores consumos de cemento para mejorar su trabajabilidad; la otra condición es cuando el módulo de finura es menor a 2.2 (arena fina), en este caso puede ocurrir que los concretos sean pastosos y que haya mayores consumos de cemento y agua para una resistencia determinada, y también una mayor probabilidad que ocurran agrietamientos de tipo contracción por secado.

Esta última consideración se basa en el hecho que cuanto menor es el módulo de fineza, dentro de los límites indicados, mayor es el valor lubricante del agregado fino, pudiéndose emplear menor cantidad de este y mayor cantidad de agregado total en la mezcla sin que este deje de ser trabajable. (Uribe, 1991)

Los tamices especificados que deben usarse en la determinación del módulo de finura son:

No. 100, No. 50, No. 30, No. 16, No. 8, No. 4, $\frac{3}{8}$ ", $\frac{3}{4}$ ", $1\frac{1}{2}$ ", 3" y de 6" y el módulo de finura será según la ecuación 1:

$$MF = \frac{\sum \% retenido_acumulado (6 + 3 + 1\frac{1}{2} + \frac{3}{4} + \frac{3}{8} + N^o 4 + N^o 8 + N^o 16 + N^o 30 + N^o 50 + N^o 100)}{100}$$

2.1.3.2 Determinación de la Densidad Aparente ("peso unitario") e Índice de Huecos en los Agregados para Hormigón (ASTM C-29)

Este método de ensayo permite determinar la densidad aparente ("peso unitario") de un agregado tanto en su condición compactada o suelta y calcular los huecos entre las partículas en los agregados finos, gruesos o mezclas de agregados, basada en la misma determinación. Este método se aplica a los agregados que no exceden las 5 pulg [125 mm] de tamaño máximo nominal.

Densidad aparente - de un agregado, la masa de una unidad de volumen de los agregados a granel, en la que el volumen incluye el volumen de las partículas individuales y el volumen de los huecos de aire entre las partículas. Se expresa en lb/ft³ [kg/m³].

Peso unitario, - peso(masa) por unidad de volumen. (Término desaprobado - usar de preferencia **densidad aparente**.)

Estas definiciones dependen de los siguientes parámetros principales:

- La gravedad específica de los agregados.
- El tamaño de los granos, descritos por la curva granulométrica.
- La forma y textura de los granos.
- El grado de compactación, la manera de la cual es realizado el acomodo.
- El efecto pared ejercido por el recipiente donde se realiza la prueba.

Se conoce que, para medir estos valores, el agregado se debe encontrar en condición seca, pues tendrá el efecto de incrementar el valor del peso unitario del agregado grueso y generará el efecto de abundamiento del agregado fino (Barriga P. , 2007)

2.1.3.3 Método para determinar el peso específico y absorción del agregado grueso (ASTM C-127)

Este método de prueba cubre la determinación de la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso (no incluye el volumen de vacíos entre las partículas), la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción del agregado grueso. Dependiendo del procedimiento usado, la densidad kg/m³.

La mayoría de los agregados naturales tienen una densidad relativa del orden de 2.6 a 2.7, y el rango de valores aparece en la tabla 12. Los valores para agregados artificiales se extienden desde mucho más abajo hasta mucho más arriba de este. (Barriga P. , 2007)

La masa mínima de la muestra de prueba a ser usada está dada en la Tabla 6.

Tabla 6
Peso mínimo de la muestra de prueba.

Tamaño máximo nominal mm	Peso mínimo de la muestra de prueba kg
12.5 o menor	2.0
19	3.0
25	4.0
37.5	5.0
50	8.0
63	12.0
75	18.0
90	25.0
100	40.0
112	50.0
125	75.0
150	125.0

Fuente: (ASTM C 127)

2.1.3.4 Método para Determinar el Peso Específico y Absorción del Agregado Fino (ASTM C-128)

Este método de ensayo determina la densidad promedio de una cantidad de partículas de áridos finos, la densidad relativa y la absorción de los áridos finos. Dependiendo del procedimiento usado, la densidad en kg/m³ (lb/ft³) es expresada como secada al horno, saturada superficialmente seca o como densidad aparente. La densidad y la densidad relativa se determinan después de secar los áridos.

Absorción de los Agregados.

Es el incremento en la masa del agregado debido al agua en los poros del material, pero sin incluir el agua adherida a la superficie exterior de las partículas, expresado con un porcentaje de la masa seca. El agregado se considera como “seco” cuando se ha mantenido a una temperatura de 110 °C por suficiente tiempo para remover toda el agua no combinada.

La porosidad de los agregados, su impermeabilidad y absorción influyen en las propiedades como la adherencia entre el agregado y los materiales cementicos, la resistencia del concreto a la congelación y al deshielo, así como la estabilidad química y la resistencia a la abrasión. (Barriga P. , 2007)

2.1.3.5 Contenido de Humedad en Agregados (ASTM C-566)

Este método de ensayo cubre la determinación de la densidad del porcentaje de humedad evaporable en una muestra de agregado por el secado tanto de la humedad superficial como la humedad dentro de los poros del agregado. Algunos agregados pueden contener agua que esta químicamente combinada con los minerales en el agregado. Esta agua no es evaporable y no está incluida en el porcentaje determinado por el método.

Este método de ensayo es suficientemente exacto para usos corrientes, tal como el ajuste de cantidades de ingredientes para el hormigón de una amasada.

Las partículas del agregado grueso, especialmente aquellas mayores a 50 mm (2 pulg.) pueden requerir grandes periodos de tiempo para que la humedad que se encuentre dentro del agregado salga a la superficie del mismo.

Si se desea que no haya movimiento de agua que penetre en los agregados, sus poros deben estar llenos de agua; es decir, que el agregado se debe encontrar en un estado saturado. Por otra parte, cualquier cantidad de agua que se encuentre en la superficie de los agregados contribuirá a aumentar el agua de la mezcla y ocupará un volumen excedente al de las partículas del agregado. Por lo tanto, el estado básico del agregado debe ser el de saturado y superficialmente seco. (Neville A. M., '1999)

Muestreo

Obtener una muestra de acuerdo con Norma ASTM D75.

Asegurar una muestra representativa de agregado para contenido de humedad y teniendo una masa no menor que la cantidad de la Tabla 7. Proteger la muestra contra pérdidas de humedad previa a la determinación de la masa.

Tabla 7

Muestra representativa de agregados

Tamaño de muestra para agregado	
Tamaño máximo nominal del agregado	Masa de la muestra de agregado
mm	kg
4.75	0.5
9.5	1.5
12.5	2
19	3
25	4
37.5	6
50	8

63	10
75	13
90	16
100	25
150	50

Fuente: (ASTM C566-19)

2.1.4 Dosisificación del Hormigón

2.1.4.1 Procedimiento de diseño de mezcla de hormigón (ACI 211.1)

El proceso de selección de los adecuados agregados para el hormigón, determinando cantidades y requerimientos específicos de manejabilidad, resistencia y dureza. Actualmente se usa mezclas diseñadas para cuyas especificaciones existen valores límite respecto a un rango de propiedades que deben cumplirse las cuales son:

- Máxima relación agua/cemento.
- Contenido mínimo de cemento.
- Contenido de aire.
- Revenimiento.
- Tamaño máximo nominal del agregado.
- Resistencia mínima.
- Manejabilidad.

Para lograr características específicas de la mezcla se debe determinar la cantidad de los agregados por conocer propiedades del hormigón fresco, propiedades mecánicas del hormigón endurecido y la inclusión, exclusión o límites de agregados específicos.

Procedimiento:

Resistencia de Diseño cuando no hay datos que permitan determinar la Desviación Estándar (Paso 1)

Resistencia de Diseño cuando no hay datos que permitan determinar la Desviación Estándar se determina de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 8

Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra.

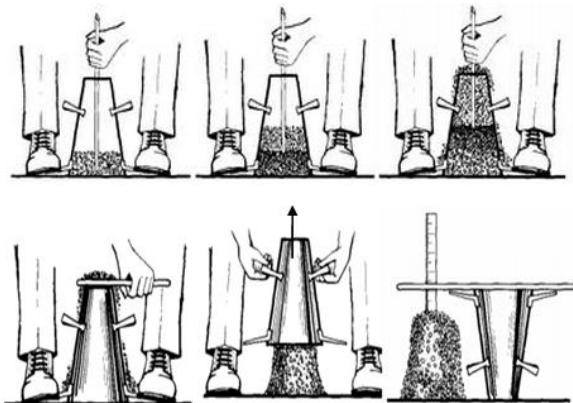
Resistencia especificada a la compresión, Mpa	Resistencia promedio requerida a la compresión, Mpa
$f' c < 35$	$f'_{cr} = f'c + 7.0$
$20 \leq f' c \leq 35$	$f'_{cr} = f'c + 8.5$
$f' c > 35$	$f'_{cr} = 1.10f'c + 5.0$

Fuente: (ACI 211.1)

Elección de Revenimiento (Paso 2)

Figura 9

Ensayo Cono de Abrams



Fuente: (ASTM C143)

Si el revenimiento no se ha especificado, su valor apropiado para el trabajo puede ser seleccionado a partir de la Tabla 9. Los rangos del revenimiento que se muestran aplican cuando se usa vibración para consolidar el hormigón. Deben emplearse mezclas de la consistencia más dura posible sin perder de vista que se puedan colocar con un buen rendimiento.

Tabla 9*Revenimientos recomendados para varios tipos de construcción.*

Tipos de Construcción	Revenimiento, cm	
	Máximo	Mínimo
Muros de cimentación y zapatas reforzadas	7.5	2.5
Zapas, campanas y muros de subestructura	7.5	2.5
Vigas y muros reforzados	10	2.5
Columnas para edificación	10	2.5
Pavimentos y losas	7.5	2.5
Concreto masivo	5	2.5

Fuente: (ACI 211.1).

Elección del Tamaño Máximo Nominal del Agregado (Paso 3)

Los tamaños más grandes de agregados bien graduados tienen menos vacíos que los tamaños más pequeños. Por esto, los hormigones con agregados de tamaño mayores requieren menos mortero por volumen unitario de hormigón. Por regla general, el tamaño máximo nominal de agregado debe ser el mayor disponible económicamente y guardar relación con las dimensiones de la estructura. En ningún caso el tamaño máximo nominal debe exceder de:

- a) 1/5 de la menor dimensión entre los costados de las cimbras.
- b) 1/3 del espesor de las losas.
- c) 3/4 del espaciamiento mínimo libre entre varillas o alambres individuales de refuerzo, paquetes de varillas, cables o ductos de pretensado.

➤ Estimación de la Cantidad de Agua y Contenido de Aire (Paso 4)

La cantidad de agua por volumen unitario de hormigón requerida para producir determinado revenimiento depende del tamaño máximo, de la forma de la partícula, la

granulometría de los agregados y de la cantidad de aire incluido (aire adicionado a través de aditivos químicos), no le afecta significativamente el contenido de cemento. La Tabla 10 provee valores estimados del agua de mezclado requerida para hormigones hechos con varios tamaños máximos de agregados, con y sin aire incluido.

Tabla 10
Requerimiento aproximado de agua de mezcla.

Revenimiento cm	Agua, kg/m ³ para el concreto de agregado de tamaño máximo nominal (mm) indicado							
	9.5*	12.5*	19*	25*	38*	50* ^{*,+}	75 ^{+,j}	150 ^{+,j}
CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO								
2.5 A 5	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124
15 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	-
Cantidad aproximada de aire atrapado en concreto, %	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2
CONCRETO CON AIRE INCLUIDO								
2.5 A 5	108	175	165	160	145	140	135	120
7.5 a 10	200	190	180	175	160	155	150	135
15 a 17.5	215	205	190	185	170	165	160	-
Promedio recomendado del contenido total de aire, porcentaje de acuerdo con el nivel de exposición								
Exposición ligera	4.4	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5**, ^{++,}	1.0**, ^{++,}
Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5**, ^{++,}	3.0**, ^{++,}
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5**, ^{++,}	4.0**, ^{++,}

Fuente: (ACI 211.1)

Selección de Relación Agua/Cemento (Paso 5)

La relación A/C requerida se determina no sólo por los requisitos de resistencia, sino también por otros factores como la durabilidad y las propiedades del acabado. Puesto que diferentes agregados y cementos producen, generalmente, distintas resistencias

empleando la misma relación A/C, es muy deseable establecer una relación entre la resistencia y la relación A/C para los materiales que de hecho van a emplearse. En ausencia de estos datos, valores aproximados y relativamente conservadores para hormigón elaborado con cemento Portland. Con materiales comunes, las relaciones A/C tabuladas deben producir las resistencias indicadas, con base en pruebas a los 28 días de especímenes curados bajo condiciones estándar de laboratorio. La resistencia promedio seleccionada debe por supuesto exceder de la resistencia especificada por un margen suficiente para mantener dentro de los límites especificados las pruebas con bajos valores.

Tabla 11

Relación agua/cemento (A/C) y la resistencia a la compresión del hormigón.

Resistencia a la compresión a los 28 días, kg/cm ²	Relación agua/cemento (A/C) por peso	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	---
350	0.48	0.4
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Fuente: (ACI 211.1).

Cálculo del Contenido de Cemento (Paso 6)

El contenido de cemento se calcula con la cantidad de agua, determinada en el paso cuatro, y la relación agua cemento, obtenida en el paso cinco; cuando se requiera un contenido mínimo de cemento o los requisitos de durabilidad lo especifiquen, la mezcla se deberá basar en un criterio que conduzca a una cantidad mayor de cemento.

Estimación del Contenido de Grava (Paso 7)

Los agregados de esencialmente el mismo tamaño máximo nominal y granulometría producen hormigones de trabajabilidad satisfactoria cuando se emplea un volumen dado de agregado grueso por volumen unitario de hormigón, con base en el Peso

Unitario Seco Varillado. En la Tabla 12 aparecen valores apropiados para estos volúmenes de agregado. Puede observarse que, para igual trabajabilidad, el volumen de agregado grueso en volumen unitario de hormigón depende únicamente de su tamaño máximo y del módulo de finura del agregado fino. En la Tabla 12 se muestra el volumen de agregado en metros cúbicos, con base al varillado en seco, para un metro cúbico de hormigón. Este volumen se convierte a peso seco del agregado grueso requerido en un metro cúbico de hormigón, multiplicándolo por el Peso Unitario Varillado en seco por metro cúbico de agregado grueso.

Tabla 12
Volumen de agregado grueso por volumen unitario de hormigón

Tamaño máximo nominal de agregado, (mm)	Volumen de agregado grueso* varillado en seco, por volumen unitario de hormigón para distintos módulos de finura de arena			
	2.4	2.6	2.8	3
10	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
20	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
40	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
70	0.82	0.80	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: (ACI 211.1)

Estimación del Contenido de Arena (paso 8)

El agregado fino, cuya cantidad se determina por diferencia. Puede emplearse cualquiera de los dos procedimientos siguientes:

- a) Método de Peso del hormigón por unidad de volumen.
- b) Método de volumen absoluto ocupado por los ingredientes del hormigón.

Procedimiento:

a) Método de Peso del hormigón por unidad de volumen

Si el peso del hormigón por volumen unitario se supone o puede estimarse por experiencia, el peso requerido del agregado fino es, simplemente, la diferencia entre el peso del hormigón fresco y el peso total de los demás componentes. A menudo se conoce con bastante precisión el peso unitario del hormigón, por experiencia previa con los materiales. En ausencia de dicha información, puede emplearse la tabla 13 para hacer un cálculo tentativo. Aun si el cálculo del peso del hormigón por metro cúbico es aproximado, las proporciones de la mezcla serán suficientemente precisas para permitir un ajuste fácil con base en mezclas de prueba.

Tabla 13
Primera estimación del peso del hormigón fresco.

Tamaño máximo nominal de agregado, (mm)	Primer estimación del peso del hormigón fresco, kg/m ³	
	hormigón sin aire incluido	hormigón con aire incluido
10	2.285	2.190
12.5	2.315	2.235
20	2.355	2.280
25	2.375	2.315
40	2.420	2.355
50	2.445	2.375
70	2.465	2.400
150	2.505	2.435

Fuente: (ACI 211.1)

b) Método de volumen absoluto ocupado por los ingredientes del hormigón

Un procedimiento más exacto para calcular la cantidad requerida de agregados finos implica el empleo de volúmenes desplazados por los componentes. En este caso, el volumen total desplazado por los componentes conocidos (agua, aire, cemento y

agregado grueso) se resta del volumen unitario de hormigón para obtener el volumen requerido de agregado fino.

El volumen ocupado por cualquier componente en el hormigón es igual a su peso dividido entre la densidad de este material (siendo ésta el producto de la Gravedad Específica del agua por el Peso Específico del material).

Ajustes por Humedad de los Agregados (Paso 9)

Las cantidades de agregado que realmente deben pesarse para el hormigón deben considerar la humedad del agregado. Los agregados están generalmente húmedos y sus pesos secos deben incrementarse con el porcentaje de agua que contienen ya sea absorbida o libre en la superficie. Por lo tanto, el agua de mezclado será corregida dependiendo de los valores de humedad y absorción que tengan los agregados, así:

Si Absorción (%) > Humedad (%), el agregado absorberá agua del agua de mezclado obtenido de la Tabla 20, por lo tanto, hay necesidad de agregar una cantidad de agua equivalente a la diferencia entre la absorción y la humedad de los agregados a fin de evitar que este consumo adicional de agua se refleje en mezclas poco manejables.

Si Absorción (%) < Humedad (%), el agregado aportará agua al agua de mezclado, por lo tanto, hay necesidad de disminuir el agua de mezclado en una cantidad equivalente a la diferencia entre la humedad y la absorción a fin de evitar que la mezcla a elaborar sobrepase el revenimiento previsto.

Si Absorción (%) = Humedad (%), no se debe realizar ningún ajuste ya que los valores de la Tabla 13 son calculados bajo esta condición.

2.1.5 Características mecánicas del hormigón reforzado con fibras de acero y fibras textiles

2.1.5.1 Resistencia a tracción indirecta (ASTM C496)

Este método de ensayo consiste en aplicar una fuerza de compresión diametral a lo largo de la longitud del espécimen cilíndrico de concreto a una velocidad que está

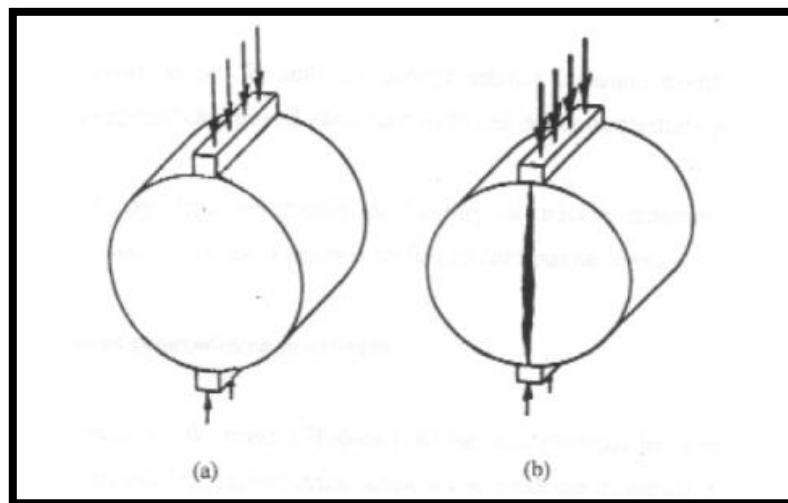
dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla. Esta carga induce esfuerzos de tracción sobre el plano que contiene la carga aplicada y esfuerzos de compresión relativamente altos en el área inmediatamente alrededor de la carga aplicada. Ocurre más bien la falla por tracción que la falla por compresión porque las áreas de aplicación de carga están en un estado de compresión triaxial, permitiéndoles de ese modo soportar esfuerzos de compresión mucho más altos que los que estarían indicados por un resultado de ensayo de resistencia a la compresión uniaxial.

Listones de apoyo, finos, de madera prensada son utilizados para distribuir la carga aplicada a lo largo de la longitud del cilindro.

La máxima carga sustentada por el espécimen es dividida por factores geométricos apropiados para obtener la resistencia a la tracción indirecta.

Figura 10

(a) Configuración de la carga y (b) rotura del ensayo de tracción indirecta



Fuente: (ASTM C496)

$$f_t = \frac{2P}{\pi * L * D}$$

f_t = resistencia a la tracción indirecta (MPa)

P = carga máxima aplicada al espécimen (N)

L = longitud del cilindro (mm)

D = diámetro del cilindro (mm)

π = constante pi ≈ 3.1416

2.1.5.2 Resistencia a flexión (ASTM C78)

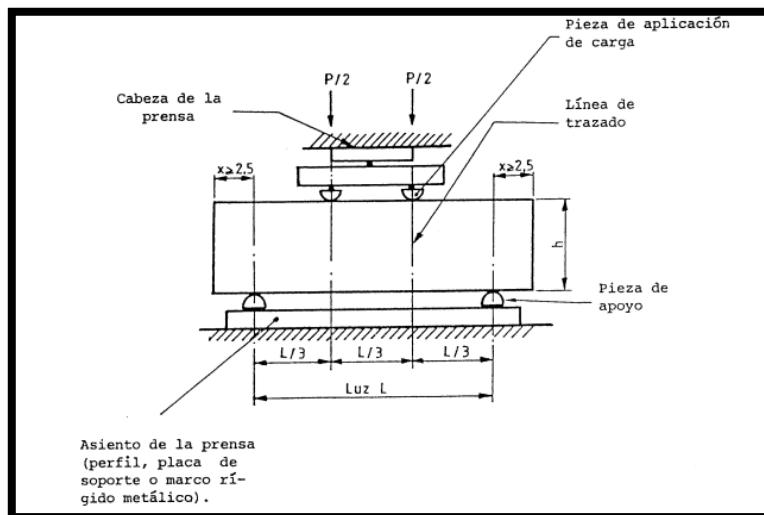
Este método establece los procedimientos para efectuar el ensaye de tracción por flexión a la rotura de probetas prismáticas de hormigón simplemente apoyadas.

Este método se aplicará al ensaye de tracción por flexión de probetas y se ajustará al procedimiento correspondiente, según la dimensión básica de la probeta. Tenga presente que los dos procedimientos que se describen a continuación no son alternativas y sus resultados no son comparables.

- Para probetas de dimensión básica 150 mm, aplique cargas P/2 en los límites de tercio central de la luz de ensaye.

Figura 11

Esquema de ensayo de tracción por flexión con carga P/2 aplicada en los límites del tercio central de la luz



Fuente: (ASTM C78)

- a) Si la fractura de la probeta se produce en el tercio central de la luz de ensaye, calcule la resistencia por flexión como la tensión de rotura según la formula siguiente:

$$f_t = \frac{PxL}{bxh^2}$$

Donde:

ft: Tensión de rotura. (Mpa)

P: Carga máxima aplicada (N)

L: Luz de ensaye de probeta (mm)

b: Ancho promedio de la probeta en la sección de rotura (mm)

h: Altura promedio de la probeta en la sección de rotura (mm)

- b) Si la fractura se produce fuera del tercio central de la luz de ensayo; en la zona comprendida entre la línea de aplicación de carga y una distancia de 0,05L de esa línea, calcule la resistencia a la tracción por flexión como la tensión de rotura según la formula siguiente:

$$f_t = \frac{3xPxa}{bxh^2}$$

Donde:

ft: Tensión de rotura. (Mpa)

P: Carga máxima aplicada (N)

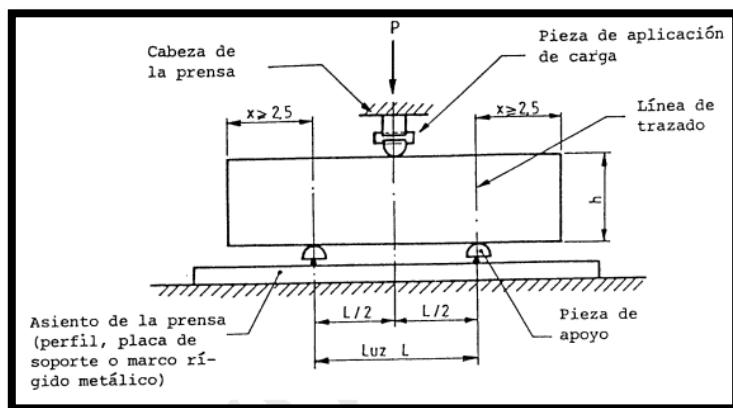
a: distancia entre la sección de rotura y el apoyo más próximo, medida lo largo de la línea central de la superficie inferior de la probeta (mm)

b: Ancho promedio de la probeta en la sección de rotura (mm)

- h: Altura promedio de la probeta en la sección de rotura (mm)
- c) Si la fractura se produce fuera del tercio central de la luz de ensaye y más allá de la zona indicada en b), deseche los resultados del ensaye.
 - d) Expresar los resultados en Mpa aproximado a 0,1 Mpa.
- Para probetas de dimensión básica 100 mm aplique la carga P en el centro de la luz de ensaye.

Figura12

Esquema de ensayo de tracción por flexión con carga P aplicada en el centro de la luz



Fuente: (ASTM C78)

- a) Calcule la resistencia a la tracción por flexión como la tensión de la rotura según la formula siguiente:

$$f_t = \frac{3PxL}{2xbxh^2}$$

Donde:

ft: Tensión de rotura. (Mpa)

P: Carga máxima aplicada (N)

L: Luz de ensaye de probeta (mm)

b: Ancho promedio de la probeta en la sección de rotura (mm)

h: Altura promedio de la probeta en la sección de rotura (mm)

b) Expresar los resultados en Mpa aproximado a 0,1 Mpa.

2.1.6 Guía para evaluación de resultados de la prueba de resistencia del concreto (ACI 214R-11).

Esta guía proporciona una introducción a la evaluación de resultados de las pruebas de resistencia del hormigón. Los procedimientos descritos son aplicables a los resultados de la prueba de resistencia a la compresión requeridos por ACI 301, ACI 318 y especificaciones y códigos similares. Los conceptos estadísticos descritos son aplicables para el análisis de otros resultados comunes de pruebas de hormigón, **incluida la flexión resistencia**, revenimiento, contenido de aire, densidad, módulo de elasticidad, y otras pruebas utilizadas para evaluar el concreto y los ingredientes materiales. Esta guía asume que los resultados de las pruebas concretas ajustarse a una distribución normal.

2.1.6.1 Indicadores Estadísticos

De aquí en adelante se define como una prueba, el promedio de la resistencia de 2 cilindros, hechos de la misma mezcla de concreto a la edad especificada.

Para un análisis estadístico es recomendable utilizar al menos 30 pruebas, sin embargo, existe la posibilidad de utilizar menos de 30 datos, siempre que se considere un factor corrección en la desviación estándar, dada por la tabla 5.3.1.2 del Código ACI-318.

Para los efectos del análisis estadístico, debe definirse las siguientes variables de control, que se utilizan.

$f_{cr} \geq$ resistencia promedio requerida, para asegurarse de que sólo aquella porción permisible de pruebas caerá por debajo de la resistencia especificada.

$f_c \geq$ Resistencia especificada.

s = Desviación estándar.

t = Multiplicador constante para la desviación estándar, que depende del número de pruebas que se espera caigan por debajo de $f'c$.

V = Coeficiente de variación.

2.1.6.2 Control De Calidad

De acuerdo con la sección 5.6.3.3 del ACI- 318R, el nivel de resistencia de una clase individual de concreto será considerado satisfactorio si cumple con los siguientes requerimientos:

El promedio aritmético de cualquiera de tres pruebas consecutivas es igual o superior a la resistencia especificada $f'c$.

Ningún resultado individual de la prueba de resistencia (promedio de dos cilindros) será menor que $f'c$ por más de 3.5 Mpa, si $f'c$ es menor o igual a 35 Mpa o por más de 0.10 $f'c$, si es mayor de 35 Mpa

Por otra parte, de acuerdo con los criterios del Comité ACI 214R, las variaciones en la resistencia pueden ser evaluadas mediante un análisis estadístico, tomando en cuenta la desviación estándar y el coeficiente de variación, los cuales se pueden asociar el grado de control del concreto en el proyecto.

En este caso, la desviación estándar y coeficiente de variación para una resistencia especificada $f'c \leq 35$ Mpa (5000 psi), para control en laboratorio y campo de concreto, son los expuestos en la tabla 14.

Tabla 14

Estándares de control de concreto para $f'c \leq$ de 35 Mpa (5000 psi).

DISPERSIÓN TOTAL					
Clase de operación	Desviación Estándar para diferentes grados de control (Mpa)				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Suficiente	Deficiente
Concreto en Obra	< 2.8	2.8 a 3.4	3.4 a 4.1	4.1 a 4.8	> 4.8
Concreto en laboratorio	< 1.4	1.4 a 1.7	1.7 a 2.1	2.1 a 2.4	> 2.4
DISPERSIÓN ENTRE TESTIGOS					
Clase de operación	Coeficiente de variación V para diferentes grados de control (%)				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Suficiente	Deficiente
Concreto en Obra	< 3	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	5.0 a 6.0	> 6
Concreto en laboratorio	< 2	2.0 a 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	> 5

Fuente: (ACI 214, 2011).

2.1.6.3 Pruebas estadísticas

En la investigación científica y experimental es necesario recurrir a pruebas estadísticas que permitan comparar resultados y determinar si las diferencias observadas son significativas o producto del azar. Entre las pruebas más utilizadas se encuentran:

- **Prueba Z:** aplicada generalmente cuando se trabaja con muestras grandes ($n>30$) y la desviación estándar poblacional es conocida.
- **Prueba t de Student:** utilizada en muestras pequeñas ($n<30$) o cuando no se conoce la varianza poblacional, estimándose a partir de la muestra. Puede aplicarse en tres modalidades:

1:t para una muestra: compara la media de una muestra con un valor teórico o de referencia.

2:t para dos muestras independientes: compara las medias de dos grupos diferentes e independientes entre sí.

3:t para muestras relacionadas o pareadas: compara dos mediciones realizadas sobre el mismo grupo o unidad experimental, evaluando si la diferencia media entre ambas condiciones es significativa.

- **Prueba ANOVA:** se emplea cuando se desea comparar más de dos medias simultáneamente, analizando la variación entre grupos.
- **Pruebas no paramétricas** (ej. prueba de Wilcoxon, prueba de Mann-Whitney): se aplican cuando los datos no cumplen con la normalidad o cuando se trata de variables ordinales.

En el presente trabajo se eligió la prueba t de Student para muestras relacionadas, debido a que:

1. El tamaño de muestra fue de 23 probetas por condición, lo cual se considera una muestra pequeña ($n<30$).

2. No se conocía la desviación estándar poblacional, por lo que correspondía emplear un estimador a partir de los datos experimentales.
3. Las comparaciones se realizaron entre el hormigón patrón y el hormigón con fibras, bajo las mismas condiciones de edad de curado (7, 14 y 28 días), lo que genera pares de datos dependientes.
4. El objetivo fue determinar si las diferencias en las resistencias obtenidas eran estadísticamente significativas.

Por estas razones, la prueba t de Student para muestras relacionadas fue la herramienta estadística más adecuada para este estudio.

2.1.6.3.1 Prueba t de Student para muestras relacionadas

La prueba t de Student para muestras relacionadas es una técnica estadística paramétrica que permite comparar dos conjuntos de datos que provienen de las mismas unidades experimentales, medidas en dos condiciones distintas. Su objetivo es verificar si la diferencia entre las medias de ambos conjuntos es estadísticamente significativa o si se debe únicamente al azar.

Esta prueba se utiliza cuando los datos son dependientes o emparejados, es decir, cuando cada observación en un grupo tiene su correspondencia directa en el otro (por ejemplo, la resistencia del mismo material evaluada con y sin adición de fibras bajo las mismas condiciones de curado).

Matemáticamente, la prueba se basa en el análisis de las diferencias entre pares, evaluando si la media de dichas diferencias es igual a cero. El estadístico t se obtiene con la siguiente fórmula:

$$t = \frac{D - \mu_o}{s_D - \sqrt{n}}$$

donde:

D = media de las diferencias,

s_D = desviación estándar de las diferencias,

n = número de pares,

μ_D = valor hipotético de la media

La decisión se toma comparando el p-valor obtenido con un nivel de significancia (α), generalmente 0.05. Si $p \leq \alpha$, se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que existe una diferencia significativa entre las medias.

CAPITULO III

CAPÍTULO III

3.1 Marco metodológico

3.1.1 Tipo de Investigación

La investigación realizada es una investigación de tipo experimental.

3.1.2 Población y Muestra

Población: Estuvo representada por probetas prismáticas y cilíndricas. La población de estudio está constituida por el hormigón de resistencia H-25, en su versión patrón y con adición de diferentes dosificaciones de fibras recicladas (acero y textiles).

De acuerdo con la Norma Boliviana CBH 87, el valor mínimo de la resistencia de proyecto ($f'ck$) para el hormigón no debe ser inferior a 12.5 MPa. Asimismo, en el punto 3.6 “Clasificación de los hormigones de acuerdo con su resistencia”, se establece la siguiente serie normativa:

“Los hormigones se tipifican, de acuerdo con su resistencia de proyecto a compresión a los 28 días, en probetas cilíndricas normales, según la serie: H12.5, H15, H17.5, H20, H25, H30, H35, H40, H45, H50, H55.

Los tipos H12.5 a H25 se emplean generalmente en estructuras de edificación, y los restantes de la serie encuentran su principal aplicación en obras importantes de ingeniería y en prefabricación.”

Con base en lo anterior, se seleccionó un hormigón H25 ($f'ck = 25$ MPa) por ser el tipo más representativo y utilizado en estructuras de edificación y elementos de uso general, como pisos, losas sobre suelo y pavimentos industriales.

Para comprobar que se trate de un H-25 ensayo a compresión:

Tabla 15
Ensayo a compresión del hormigón H-25

Edad (días)	Cantidad de probetas	Tipo de probeta
7	2	Cilíndrica
14	2	Cilíndrica
28	2	Cilíndrica
Total	6	Cilíndricas

Fuente: Elaboración propia

Para análisis a flexión:

Tabla 16
Ensayo a flexión del hormigón H-25 y sus variantes con fibras

Mezcla	7 días	14 días	28 días	Total probetas prismáticas
H-25 (sin fibras)	4	4	15	23
H-25 + 0.5% de fibras	4	4	15	23
H-25 + 1.0% de fibras	4	4	15	23
H-25 + 1.5% de fibras	4	4	15	23
H-25 + 2.0% de fibras	4	4	15	23
Total general				115

Fuente: Elaboración propia

Como estudio adicional tracción indirecta:

Tabla 17
Ensayo de Tracción Indirecta del hormigón H-25 y sus variantes con fibras

Mezcla	7 días	14 días	28 días	Total probetas cilíndricas
H-25 (sin fibras)	4	4	10	18
H-25 + 0.5% de fibras	4	4	10	18
H-25 + 1.0% de fibras	4	4	10	18
H-25 + 1.5% de fibras	4	4	10	18
H-25 + 2.0% de fibras	4	4	10	18
Total general				90

Fuente: Elaboración propia

Muestra Total: La muestra estuvo conformada por 210 probetas.

3.1.3 Diseño de mezcla

El estudio se centró en un diseño de mezcla un hormigón H-25

3.1.4 metodología utilizada (fases)

La metodología se organizó en fases para alcanzar los objetivos propuestos:

3.1.4.1 Fase I: Recolección de materiales

En esta fase se identificaron y adquirieron todos los materiales necesarios para la investigación, asegurando que cumplieran con las especificaciones normativas. Los materiales principales incluyen:

Cemento: Cemento IP-30 EL PUENTE el “30” indica su resistencia mínima a compresión a los 28 días, es decir 30 MPa (equivalente a un hormigón H30).

Agregados (grueso y fino): Los agregados utilizados en este estudio se recolectaron de la Chancadora de Tolomosa la cual extrae el material del río Tolomosa en Tarija, Bolivia, es un río que forma parte de la cuenca del río Bermejo.

Figura 13

Planta chancadora de áridos Tolomosa



Fuente: Google Earth.

Fibras recicladas de neumáticos: Las fibras textiles recicladas de neumáticos empleadas en esta investigación fueron obtenidas en las instalaciones de la empresa Terracycle Bolivia, ubicada en Av. Cuatro Esquinas y Calle Cabrera, Zona Sirpita, Cochabamba, Bolivia.

Figura 14

Empresa recicladora TERRACYCLE



Fuente: Google Earth.

3.1.4.2 Fase II: Caracterización de los agregados

Esta fase se centró en determinar las propiedades físicas y mecánicas de los agregados, esenciales para el diseño del hormigón. Entre los ensayos realizados se incluyen:

Tabla 18
Ensayos y normativas para caracterización de agregados

ENSAYOS	NORMATIVA
Análisis Granulométrico del Agregado Grueso	ASTM C-136
Análisis Granulométrico del Agregado Fino.	ASTM C-136
Densidad Aparente “Peso Unitario” del Agregado Grueso.	ASTM C- 29
Densidad Aparente “Peso Unitario” del Agregado Fino	ASTM C- 29
Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso.	ASTM C-127
Peso Específico y Absorción del Agregado Fino.	ASTM C-128
Contenido de Humedad de los Agregados	ASTM C 566

Fuente: Elaboración propia

3.1.4.2.1 Caracterización de agregado grueso

3.1.4.2.1.1 Granulometría agregado grueso C-136

Se recolectaron muestras representativas de tres chancadoras diferentes: Santa Ana, San Mateo y Tolomosa. A continuación, se muestra el procedimiento que se aplicó para las tres muestras.

Procedimiento:

- Se debe realizar cuarteo de todo el material a utilizar, luego obtener una muestra representativa.
- Las muestras recolectadas fueron sometidas a un proceso de secado en horno a una temperatura de 105°C a 110°C durante un período de 24 horas para eliminar la humedad contenida en el material.
- Una vez secadas las muestras, se pesaron 10 kg de material, los cuales se introdujeron en la serie de tamices.
- Se realizó un proceso de agitación mecánica en el equipo de tamizado durante un tiempo de aproximadamente 10 minutos y luego se realizó un tamizado manual para asegurar que las partículas se distribuyan adecuadamente.
- Una vez completado el tamizado, se pesaron las cantidades de material que quedaron en cada tamiz.

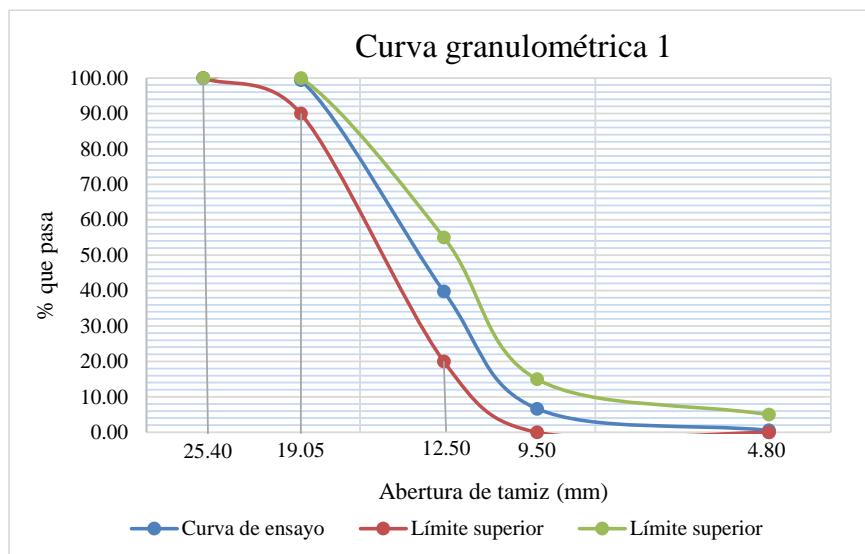
Cálculo

Tabla 19
Granulometría agregado grueso

Peso Total (gr.) =			10,000.00				
Tamiz	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Retenido Acumulado	% q. pasa del total	% Que pasa s/g Especif. ASTM		
		(gr)	(%)				
2 1/2"	63.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
2"	50.80	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
1 1/2"	38.10	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
1"	25.40	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
3/4"	19.05	56.00	56.00	0.56	99.44	90.00	100.00
1/2"	12.50	5,970.00	6,026.00	60.26	39.74	20.00	55.00
3/8"	9.50	3,309.00	9,335.00	93.35	6.65	0.00	15.00
Nº4	4.80	611.90	9,946.90	99.47	0.53	0.00	5.00
BASE	0.00	53.10	10,000.00	100.00	0.00		
		SUMA =	10,000.00				
		PÉRDIDAS =	0.00				
		TM=	1"				
		TMN=	3/4"				

Fuente: Elaboración propia

Figura 15
Curva granulométrica del agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

Análisis:

Finalmente, se compararon las distribuciones granulométricas obtenidas para las tres chancadoras (Santa Ana, San Mateo y Tolomosa). Los resultados que mostraron la chancadora Tolomosa presentó:

- ✓ El agregado grueso analizado cumple con todos los requisitos granulométricos establecidos por la Norma ASTM C-33.
- ✓ La distribución de tamaños es uniforme y controlada.

3.1.4.2.1.2 Granulometría agregado fino

En el caso del agregado fino, se utilizaron muestras de las tres chancadoras (Santa Ana, San Mateo y Tolomosa). A continuación, se muestra el procedimiento que se aplicó para las tres muestras.

Materiales

- Balanza sensible al 0,1 gramo
- Juego de tamices
- Horno de temperatura constante
- Brocha para limpiar tamices
- Vibrador mecánico para tamices

Procedimiento

- El procedimiento de lavado consistió en someter el agregado fino a un proceso de lavado en agua, utilizando una malla fina para evitar la pérdida de material.
- Las muestras recolectadas fueron sometidas a un proceso de secado en horno a una temperatura de 105°C a 110°C durante un período de 24 horas para eliminar la humedad contenida en el material.
- Una vez secadas las muestras, se pesaron 1kg de material, los cuales se introdujeron en la serie de tamices.
- Se realizó un proceso de agitación mecánica en el equipo de tamizado durante un tiempo de aproximadamente 10 minutos y luego se realizó un tamizado manual para asegurar que las partículas se distribuyan adecuadamente.

- Una vez completado el tamizado, se pesaron las cantidades de material que quedaron en cada tamiz.

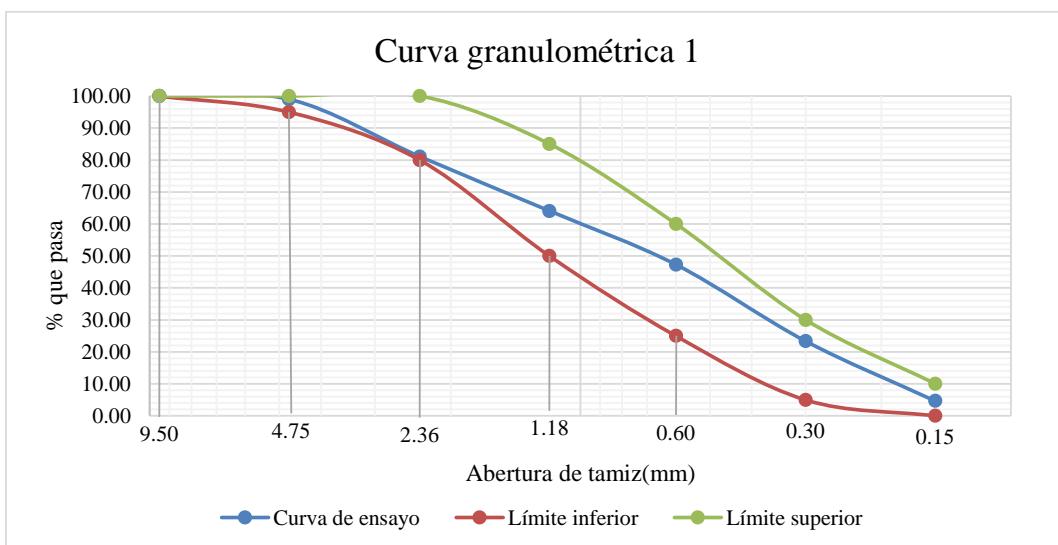
Cálculos

Tabla 20
Granulometría agregado fino

Peso Total (g)		1000.00					
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% q. pasa del total	Especificación ASTM C-33	
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
Nº4	4.75	10.10	10.10	1.01	98.99	95	100
Nº8	2.36	179.20	189.30	18.93	81.07	80	100
Nº16	1.18	170.00	359.30	35.93	64.07	50	85
Nº30	0.60	167.80	527.10	52.71	47.29	25	60
Nº50	0.30	239.30	766.40	76.64	23.36	5	30
Nº100	0.15	187.20	953.60	95.36	4.64	0	10
BASE		46.40	1000.00	100.00	0.00		
	SUMA	1000.00					
	PÉRDIDAS	0.00					
	MF =	2.81					

Fuente: Elaboración propia

Figura 16
Curva granulométrica del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

Análisis

Para esta investigación, se utilizó arena proveniente de la chancadora de Tolomosa. Los resultados que mostraron la chancadora Tolomosa presentó:

- ✓ La granulometría del agregado fino cumple perfectamente con los límites de la Norma ASTM C-33 en todos los tamices.
- ✓ El Módulo de Finura cumple con la norma. Un valor de 2.81 está en el rango ideal de una arena media, proporcionando un buen equilibrio entre trabajabilidad y economía de cemento

MF Obtenido: MF=2.81

Requisito ASTM C-33 (Punto 6.2): El MF debe estar entre 2.3 y 3.1.

$$2.3 \leq MF \leq 3.1$$

3.1.4.2.1.3 Densidad Aparente “Peso Unitario” del Agregado Grueso.

El ensayo de densidad aparente del agregado grueso permite calcular no solo el peso unitario, sino también el porcentaje de huecos entre las partículas. Esta evaluación se realiza tanto en estado suelto como en estado compactado, lo que ofrece una visión completa de cómo se comporta el agregado en distintas condiciones.

3.1.4.2.1.3.1 Peso Unitario Suelto

Materiales

- Balanza sensible al 0,5% del peso de la muestra
- Una varilla de 5/8" de diámetro y unos 60 cm de largo
- Un juego de recipientes cilíndricos. El tamaño del molde cilíndrico que se debe usar depende del tamaño de las partículas.

Para agregados con partículas de un diámetro $\leq 1/2"$ se utiliza un molde de 1/10 de pie cubico.

Para agregados con partículas de un diámetro entre $1/2"$ y $1\frac{1}{2}"$ se utiliza un molde de 1/2 de pie cubico.

Para agregados con partículas de un diámetro $\geq 1\frac{1}{2}"$ se utiliza un molde de 1 pie cubico.

Procedimiento

- Como primer paso se debe realizar la calibración del molde, llenar el molde con agua a 16,7 °C y registrar el peso. El volumen del molde se determina dividiendo el peso del agua requerido para llenar el respectivo molde por el peso unitario del agua a la misma temperatura.
- Se realiza el cuarteo del material y se obtiene una muestra representativa del agregado a humedad ambiente
- Se pesa el molde sin material en una balanza y se anota ese dato.
- Se vierte la muestra del material en el molde, sin compactar de forma natural.
- Una vez lleno el molde, se nivela con la varilla.
- Se pesa el molde más la muestra de material en una balanza. El peso total se registra.
- Se repitió este procedimiento unas tres veces.

Cálculos

Tabla 21
Peso Unitario Suelto de la grava

Muestra Nº	Peso Recipiente (Kg)	Volumen Recipiente (m3)	Peso Recipiente + Muestra Suelta (Kg)	Peso Muestra Suelta (Kg)	Peso Unitario Suelto (KN/m3)
1.00	5.84	0.01	18.87	13.03	12.89
2.00	5.84	0.01	18.94	13.10	12.95
3.00	5.84	0.01	18.90	13.06	12.92
					Promedio 12.92

Fuente: Elaboración propia

3.1.4.2.1.3.2 Peso Unitario Compactado

Materiales

- Balanza sensible al 0,5% del peso de la muestra
- Una varilla de 5/8" de diámetro y unos 60 cm de largo
- Un juego de recipientes cilíndricos. El tamaño del molde cilíndrico que se debe usar depende del tamaño de las partículas.

Para agregados con partículas de un diámetro $\leq 1/2"$ se utiliza un molde de 1/10 de pie cubico.

Para agregados con partículas de un diámetro entre $1/2"$ y $1 \frac{1}{2}"$ se utiliza un molde de 1/2 de pie cubico.

Para agregados con partículas de un diámetro $\geq 1 \frac{1}{2}"$ se utiliza un molde de 1 pie cubico.

Procedimiento

- Como primer paso se debe realizar la calibración del molde, llenar el molde con agua a $16,7^{\circ}\text{C}$ y registrar el peso. El volumen del molde se determina dividiendo el peso del agua requerido para llenar el respectivo molde por el peso unitario del agua a la misma temperatura.
- Se realiza el cuarteo del material y se obtiene una muestra representativa del agregado a humedad ambiente
- Se pesa el molde sin material en una balanza y se anota ese dato.
- Se vierte la muestra de material en el molde, compactándola en tres capas aproximadamente iguales. Entre cada capa, se utiliza una varilla para compactar el material, aplicando 25 golpes por capa según lo establecido por la norma.
- Una vez lleno el molde, se nivela con la varilla.
- Se pesa el molde más la muestra de material en una balanza. El peso total se registra.
- Se repitió este procedimiento unas tres veces.

Cálculos

Tabla 22
Peso Unitario Compactado del agregado grueso

Muestra Nº	Peso Recipiente (Kg)	Volumen Recipiente (m3)	Peso Recipiente + Muestra Compactada (Kg)	Peso Muestra Compactada (Kg)	Peso Unitario Compactado (KN/m3)
1.00	5.84	0.01	19.97	14.13	13.97
2.00	5.84	0.01	20.04	14.20	14.04
3.00	5.84	0.01	20.00	14.16	14.00
Promedio					14.00

Fuente: Elaboración propia

3.1.4.2.1.4 Densidad Aparente “Peso Unitario” del Agregado Fino.

3.1.4.2.1.4.1 Peso Unitario Suelto

Materiales

- Balanza sensible al 0,5% del peso de la muestra
- Una varilla de 5/8" de diámetro y unos 60 cm de largo
- Un juego de recipientes cilíndricos. El tamaño del molde cilíndrico que se debe usar depende del tamaño de las partículas.

Para agregados con partículas de un diámetro $\leq 1/2"$ se utiliza un molde de 1/10 de pie cubico.

Para agregados con partículas de un diámetro entre 1/2" y 1 1/2" se utiliza un molde de 1/2 de pie cubico.

Para agregados con partículas de un diámetro $\geq 1 \frac{1}{2}"$ se utiliza un molde de 1 pie cubico.

Procedimiento

- Como primer paso se debe realizar la calibración del molde, llenar el molde con agua a 16,7 °C y registrar el peso. El volumen del molde se determina dividiendo el peso del agua requerido para llenar el respectivo molde por el peso unitario del agua a la misma temperatura.

- Se realiza el cuarteo del material y se obtiene una muestra representativa del agregado a humedad ambiente
- Se pesa el molde sin material en una balanza y se anota ese dato.
- Se vierte la muestra del material en el molde, sin compactar de forma natural.
- Una vez lleno el molde, se nivela con la varilla.
- Se pesa el molde más la muestra de material en una balanza. El peso total se registra.
- Se repitió este procedimiento unas tres veces.

Cálculos

Tabla 23
Peso Unitario Suelto agregado fino

Muestra Nº	Peso Recipiente (Kg)	Volumen Recipiente (m3)	Peso Recipiente + Muestra Suelta (Kg)	Peso Muestra Suelta (Kg)	Peso Unitario Suelto (KN/m3)
1	2.60	0.0030	7.23	4.63	15.17
2	2.60	0.0030	7.40	4.80	15.73
3	2.60	0.0030	7.48	4.88	15.97
					Promedio 15.62

Fuente: Elaboración propia

3.1.4.2.1.4.2 Peso Unitario Compactado

Materiales

- Balanza sensible al 0,5% del peso de la muestra
- Una varilla de 5/8" de diámetro y unos 60 cm de largo
- Un juego de recipientes cilíndricos. El tamaño del molde cilíndrico que se debe usar depende del tamaño de las partículas.

Para agregados con partículas de un diámetro $\leq 1/2"$ se utiliza un molde de 1/10 de pie cubico.

Para agregados con partículas de un diámetro entre $1/2"$ y $1\frac{1}{2}"$ se utiliza un molde de 1/2 de pie cubico.

Para agregados con partículas de un diámetro $\geq 1\frac{1}{2}"$ se utiliza un molde de 1 pie cubico.

Procedimiento

- Como primer paso se debe realizar la calibración del molde, llenar el molde con agua a 16,7 °C y registrar el peso. El volumen del molde se determina dividiendo el peso del agua requerido para llenar el respectivo molde por el peso unitario del agua a la misma temperatura.
- Se realiza el cuarteo del material y se obtiene una muestra representativa del agregado a humedad ambiente
- Se pesa el molde sin material en una balanza y se anota ese dato.
- Se vierte la muestra de material en el molde, compactándola en tres capas aproximadamente iguales. Entre cada capa, se utiliza una varilla para compactar el material, aplicando 25 golpes por capa según lo establecido por la norma.
- Una vez lleno el molde, se nivela con la varilla.
- Se pesa el molde más la muestra de material en una balanza. El peso total se registra.
- Se repitió este procedimiento unas tres veces.

Cálculos

Tabla 24
Peso Unitario Compactado agregado fino

Muestra Nº	Peso Recipientе (Kg)	Volumen Recipientе (m3)	Peso Recipiente + Muestra Compactada (Kg)	Peso Muestra Compactada (Kg)	Peso Unitario Compactado (KN/m3)
1	2.60	0.0030	7.67	5.07	16.61
2	2.60	0.0030	7.67	5.07	16.61
3	2.60	0.0030	7.65	5.05	16.55
Promedio					16.59

Fuente: Elaboración propia

3.1.4.2.1.5 Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso.

Materiales

- Una balanza que tenga 5 kg de capacidad ó más y sensibilidad de 0,5 gr.
- Cesto cilíndrico de tela metálica de 20cm de diámetro y de 20 cm de altura.
- Un recipiente en el que se puede sumergir la cesta de alambre y un aparato para suspender la cesta cuando se sumerge, con el fin de obtener el peso de la muestra sumergida.

Procedimiento

- Se lava el agregado grueso a fin de remover impureza como limo arcilla o materia orgánica que cubra la superficie de las partículas
- Se sumerge la grava con agua por un periodo de 24 horas hasta obtener la saturación completa de las partículas.
- Se saca la muestra del agua y se secan las partículas con una toalla hasta que la película de agua haya desaparecido de la superficie.
- Se deberá evitar la evaporación durante esta operación.
- Se obtiene 5 kg de la muestra con sus partículas saturadas.
- Colocar de manera rápida la muestra en el canastillo porta muestra.
- La muestra se vuelve a sumergir después de ser pesada y se determina el peso de la muestra sumergida
- Retirar la muestra del canastillo y vaciar completamente a la fuente o recipiente, cuidando de no dejar partículas atrapadas en el canastillo y llevar al horno.
- Se seca la muestra en un horno a temperatura constante (105^0C) posteriormente se deja enfriar y se pesa en la balanza.
- Registrar el peso de la muestra (grava) seca.

Cálculos

Tabla 25
Peso específico y absorción del agregado grueso.

Muestra Nº	Peso Muestra Secada "A" (gr)	Peso muestra Saturada con Sup. seca "B" (gr)	Peso muestra Sat. dentro del agua "C" (gr)	Peso Específico A granel (gr/cm³)	Peso Específico S.S.S. (gr/cm³)	Peso Específico Aparente (gr/cm³)	% de ABS.
1	4.94	5.00	3.09	25.31	25.63	26.16	1.26
2	4.94	5.00	3.10	25.45	25.76	26.29	1.23
3	4.94	5.00	3.09	25.34	25.67	26.23	1.31
PROMEDIO				25.38	25.70	26.23	1.27

Fuente: Elaboración propia

3.1.4.2.1.6 Peso Específico y Absorción del Agregado fino.

Materiales

- Balanza con capacidad de 1kg y sensibilidad de 0,1 gr.
- Matraz de 500 ml de capacidad
- Molde cónico y una varilla.

Procedimiento

- Se selecciona una muestra de aproximadamente 2kg, luego se coloca en un recipiente se sumerge en agua durante 24 horas para garantizar que la arena quede completamente saturada.
- Pasada las 24 horas escurrir el agua, y poner la muestra en un recipiente, para luego secar con ayuda de secadoras y espátula, asegurarse que sea un secado uniforme y superficial.
- Se debe secar hasta obtener la arena en condición suelta, para reconocer el estado ideal se coloca el molde cónico en una superficie totalmente plana y lisa, se sujetó el molde y se llena con el árido en capas dando 25 golpes con el pisón en caída libre. Enrasar en la última capa.
- Cuando el árido caiga suavemente sobre su talud natural, significará que el árido a alcanzado su condición saturada superficialmente seca.
- Registrar el peso de los 3 matraz que serán usados

- Se colocan 500 gr. de la muestra de arena en el matraz y luego se llena este con agua hasta el tope.
- Con el fin de eliminar burbujas de aire presentes en el matraz, se rueda el matraz sobre sí mismo
- Llenar de agua el matraz hasta los 500 ml y registrar el peso de matraz más material
- Vaciar el contenido del matraz en un recipiente y secar en el horno de temperatura constante (105°C)
- Registrar el peso de la muestra (arena) seca

Cálculos

Tabla 26
Peso específico y absorción del agregado fino.

Muestra Nº	Peso Muestra (Kg)	Peso Matráz (Kg)	Muestra + Matráz + Agua (Kg)	Agua Agregado al Matráz "W" (L) ó (Kg)	Peso Muestra seca "A" (Kg)	Volumen de Matráz "V" (L)	P. E. A granel (Kg/m ³)	P. E. Saturado con Supseca (Kg/m ³)	P. E. Aparente (Kg/m ³)	% DE Absorción
1	0.5	0.17	1.00	0.33	0.49	0.50	28.76	29.19	30.07	1.46
2	0.5	0.19	0.99	0.30	0.49	0.50	23.83	24.15	24.65	1.36
3	0.5	0.25	1.03	0.28	0.49	0.50	22.06	22.35	22.73	1.30
						PROMEDIO	24.88	25.23	25.82	1.37

Fuente: Elaboración propia

3.1.4.3 Fase III: Caracterización de la fibra reciclada

En esta fase se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas de las fibras de acero y de las fibras textiles recicladas de neumático debido que no se tenía ficha técnica.

El material reciclado de neumáticos fuera de uso contiene dos tipos de fibras con funciones diferenciadas en el hormigón:

- Fibras de acero
- Fibras textiles

3.1.4.3.1 Determinación de la composición

Determinar la proporción en peso de fibras de acero y fibras textiles presentes en la muestra reciclada.

Materiales:

- Balanza digital de alta precisión
- Muestra de fibra acero-textil reciclada

Procedimiento:

Dado que no se disponía de datos previos sobre la composición del material reciclado, se realizó una separación manual exhaustiva de ambos tipos de fibra. Cada fracción fue pesada individualmente utilizando balanza digital de alta precisión.

Resultados

Tabla 27

Composición en peso de fibras recicladas separadas manualmente

Material	Peso (g)	Porcentaje en peso (%)
Fibra de acero	80.5	80.50
Fibra textil	19.5	19.50
Total	100	100.00

Fuente: Elaboración propia

3.1.4.3.2 Caracterización de la fibra acero

3.1.4.3.2.1 Determinación de la densidad

Determinar experimentalmente la densidad de las fibras de acero para identificar el tipo de material y compararlo con valores teóricos.

Materiales

- Probeta graduada
- Agua destilada
- Balanza de alta precisión
- Fibras de acero recicladas

Procedimiento

Paso 1: Determinación del volumen (Principio de Arquímedes)

- Se llenó una probeta graduada con agua y se registró el volumen inicial (V_0)
- Se introdujo una muestra de fibras de acero en la probeta
- Se registró el volumen final del agua desplazada (V_f)
- El volumen de las fibras se calculó como: $V = V_f - V_0$

Paso 2: Determinación de la masa

Se pesó la muestra de fibras utilizando balanza de alta precisión antes de la inmersión

Paso 3: Cálculo de la densidad

Se aplicó la fórmula: $\rho = \text{masa} / \text{volumen}$

Resultados

Tabla 28
Comparación entre la densidad experimental y teórica del acero

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad experimental	7,718.51	kg/m ³
Densidad teórica de acero	7,840.00	kg/m ³

Fuente: Elaboración propia

Análisis: La densidad experimental es ligeramente inferior al valor teórico, lo cual se atribuye a la presencia de residuos de caucho adheridos a la superficie de las fibras, que alteran tanto la masa como el volumen desplazado.

3.1.4.3.2.2 Determinación del diámetro

Caracterizar el diámetro promedio de las fibras de acero recicladas.

Materiales

- Micrómetro digital de precisión (apreciación: 0.0001 mm)
- Fibras de acero recicladas

Procedimiento

- Se seleccionaron 6 fibras de forma aleatoria, representativas del lote
- En cada fibra se realizaron 3 mediciones distribuidas a lo largo de su longitud:

- Extremo inicial
- Zona central
- Extremo final
- Se calculó el diámetro promedio de cada fibra
- Se determinó el diámetro global promedio del lote

Resultados

Tabla 29
Medición del diámetro de fibras de acero recicladas con micrómetro

N° de fibra	Diámetro 1	Diámetro 2	Diámetro 3	Diámetro promedio	Diámetro promedio
	pulg	pulg	pulg	pulg	mm
1	0.0019	0.0018	0.002	0.0019	0.0483
2	0.0018	0.0017	0.0016	0.0017	0.0432
3	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0305
4	0.0014	0.0015	0.0016	0.0015	0.0381
5	0.0013	0.0012	0.0014	0.0013	0.0330
6	0.0019	0.0018	0.002	0.0019	0.0483
				Promedio	0.0402

Fuente: Elaboración propia

diámetro promedio: 0.0402 mm

Las mediciones mostraron consistencia a lo largo de cada fibra

3.1.4.3.2.3 Determinación de la longitud

Caracterizar la distribución de longitudes de las fibras de acero recicladas.

Materiales

- Vernier (calibrador)
- Regla metálica graduada en milímetros
- Muestra de fibras de acero

Procedimiento

- Se extrajeron manualmente 190 fibras del material reciclado
- Se midió la longitud recta de cada fibra desde un extremo hasta el otro

- Se registraron todas las mediciones
- Se realizó un análisis estadístico mediante tabla de frecuencias:
- Determinación del rango: $R = L_{\text{máx}} - L_{\text{mín}} = 7.4 - 0.2 = 7.2 \text{ cm}$
- Cálculo del número de clases: $N_C = 1 + 3.322 \times \log(190) = 8.57 \approx 9$
- Ancho de clase: $A_C = 7.2/9 = 0.8 \text{ cm}$

Resultados

Tabla 30
Distribución de longitudes de fibras de acero recicladas (en cm)

Intervalo (cm)	Frecuencia	Frecuencia acumulada	%
[0,2 – 1,0)	15	15	7.9
[1,0 – 1,8)	23	38	12.1
[1,8 – 2,6)	40	78	21.1
[2,6 – 3,4)	48	126	25.3
[3,4 – 4,2)	38	164	20
[4,2 – 5,0)	21	185	11.1
[5,0 – 5,8)	3	188	1.6
[5,8 – 6,6)	1	189	0.5
[6,6 – 7,4)	1	190	0.5
	190	Total	100.1

Fuente: Elaboración propia

3.1.4.3.3 Caracterización de la fibra textil

3.1.4.3.3.1 Determinación de la densidad

Determinar experimentalmente la densidad de las fibras textiles para identificar el tipo de material y compararlo con valores teóricos.

Materiales

- Probeta graduada
- Agua destilada
- Balanza de alta precisión
- Fibras textiles recicladas

Procedimiento

Paso 1: Determinación del volumen (Principio de Arquímedes)

- Se llenó una probeta graduada con agua y se registró el volumen inicial (V_0)
- Se introdujo una muestra de fibras textiles en la probeta
- **Consideración especial:** Dado que las fibras textiles tienen naturaleza absorbente, se dejaron sumergidas durante 24 horas para permitir la saturación completa del material
- Se registró el volumen final del agua desplazada (V_f)
- El volumen de las fibras se calculó como: $V = V_f - V_0$

Paso 2: Determinación de la masa

Se pesó la muestra de fibras utilizando balanza de alta precisión antes de la inmersión

Paso 3: Cálculo de la densidad

Se aplicó la fórmula: $\rho = \text{masa} / \text{volumen}$

Resultados

Tabla 31
Resultados del ensayo de densidad de las fibras textiles

Número de muestra	Volumen inicial del agua (mL)	Volumen final de agua (mL)	Volumen desplazado (cm ³)	Densidad calculada (g/cm ³)	Densidad calculada (Kg/m ³)
1	160	164.2	4.2	1.321	1,321.02
2	160	163.8	3.8	1.330	1,330.00
3	160	164.2	4.2	1.346	1,346.43
4	160	164.3	4.3	1.344	1,343.60
5	160	164.2	4.2	1.320	1,320.40
Promedio					1,332.29

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32
Comparación entre la densidad experimental y teórica de la fibra textil

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad experimental	1,332.29	kg/m ³
Densidad teórica de nylón	1,130-1,150	kg/m ³
Densidad teórica de poliéster	1,380-1,410	kg/m ³

Fuente: Elaboración propia

Análisis: El valor experimental se encuentra entre los rangos del Nylon y del Poliéster, lo que indica que las fibras textiles recicladas están compuestas por una mezcla de ambos polímeros en proporciones variables.

3.1.4.3.3.2 Determinación de geometría (diámetro y longitud)

No fue posible determinar valores representativos de diámetro ni longitud para las fibras textiles debido a:

- **Naturaleza irregular:** Los fragmentos recuperados presentan geometrías no uniformes
- Heterogeneidad dimensional: Cada fragmento posee dimensiones distintas sin un patrón definido
- **Ausencia de sección circular:** Las fibras no presentan una sección transversal uniforme que permita definir un diámetro

3.1.4.3.4 Caracterización del conjunto acero-textil

3.1.4.3.4.1 Determinación de la densidad ponderada

Calcular la densidad equivalente del conjunto de fibras considerando su composición y densidades individuales.

Datos de entrada

$$\rho_{acero} = 7,718.51 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{textil} = 1,332.29 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Proporción acero} = 80.50\%$$

$$\text{Proporción textil} = 19.50\%$$

Cálculo

Aplicando la relación de densidades ponderadas:

$$\rho_{conjunto} = 100 / [(80.5/7718.51) + (19.5/1332.29)]$$

Resultado

Densidad del conjunto acero-textil: 3,989.62 kg/m³

Este valor es fundamental para el cálculo de dosificaciones de hormigón reforzado con fibras recicladas.

3.1.4.3.4.2 Propiedades mecánicas de referencia

Debido a la corta longitud de las fibras y su estado disperso, no fue posible realizar ensayos directos de resistencia a tracción en laboratorio. Por tanto, se adoptaron valores de referencia bibliográfica para materiales similares:

Tabla 33
Propiedades mecánicas de las fibras utilizadas en el estudio

Tipo de fibra	Resistencia a tracción	Unidades
Fibra de acero	345-3,000	Mpa
Fibras textiles (Nylon /Poliéster)	720-860	Mpa

Fuente: Elaboración propia

Esta metodología es aceptada cuando las condiciones experimentales impiden la caracterización mecánica directa del material reciclado.

3.1.4.4 Fase IV: Elaboración de las probetas.

Tras realizar los ensayos previos a la dosificación, se confirma que los agregados son adecuados para ser utilizados en la preparación del hormigón, ya que cumplen con los parámetros y valores establecidos por las normas correspondientes. Con esta verificación, se procede a definir la dosificación necesaria para obtener un hormigón con una resistencia a la compresión de 25 MPa. a los 28 días.

Paso 1: Determinación de resistencia requerida (f'_{cr})

Para el proyecto se definió una resistencia especificada de $f'_c = 25$ Mpa.

$$f'_{cr} = f'_c + 8,5$$

$$f'_{cr} = 25 + 8.5 = 33.5 \text{ N/mm}^2$$

Paso 2: Determinación de la relación agua/cemento (a/c)

$$f'_c \quad \quad \quad a/c$$

$$28 \quad = \quad 0.57$$

$$33.5 = a/c$$

$$35 = 0.50$$

Interpolando:

$$a/c=0.50$$

Paso 3: Determinación de la cantidad de agua

Asentamiento de 3 pulgadas consistencia plástica

Tamaño máximo 3/4

$$Agua = 205 l/m^3$$

$$Aire atrapado = 2\%$$

Paso 4: Calculo de la cantidad de cemento

$$Cantidad de cemento = \frac{205}{0,5} = 410 kg/m^3$$

Paso 5: Cálculo del Peso Agregado Grueso (Gr)

$$2.8 \quad 0.62$$

$$2.93 = Vr/v$$

$$3 \quad 2,60$$

Realizando la interpolación nos da:

$$Vr/v=0,607$$

Determinar la cantidad de grava, multiplicando Vr/V y P.U.C

$$Gr = 0,607 * 1428 = 866,531 kg/m^3$$

Paso 6: Determinación de la Cantidad de Arena (Ar) por el Método de los Volúmenes Absolutos.

$$Ar = \left(1m^3 - \left(\left(\frac{c}{Pe * (c)} \right) + \left(\frac{Gr}{Pe * (Gr)} \right) + \left(\frac{\%Aire}{Pe * (c)} \right) \right) \right) * Pe * (Ar)$$

Donde:

Ar.: Arena (Kg/m3)

C.: Masa del cemento (Kg).

Pe (C).: Peso específico del Cemento (Kg/m3).

Gr.: Masa de la grava (Kg).

Pe (Gr).: Peso específico de la grava (Kg/m3).

Ag.: Masa del agua (Kg).

Pe (Ag).: Peso específico del agua (asumimos 1000 Kg/m3).

%Aire: aire atrapado (%).

Pe (Ar).: Peso específico de la arena (Kg/m3).

Reemplazando:

$$Ar = \left(1m^3 - \left(\left(\frac{c}{Pe * (c)} \right) + \left(\frac{Gr}{Pe * (Gr)} \right) + (Agua) \right) \right) * Pe * (Ar)$$

$$Ar = \left(1m^3 - \left(\left(\frac{410}{315} \right) + \left(\frac{866,53}{2588} \right) + 205 \right) \right) * 2537 = \frac{837,27kg}{m^3}$$

Tabla 34
Cantidad de material para 1 m³ de hormigón patrón, para el diseño de mezcla

<i>Cemento</i>	410,00	kg/m ³
<i>Agua</i>	205,00	Lt/m ³
<i>Grava</i>	866,53	Kg/m ³
<i>Arena</i>	837,27	Kg/m ³

Fuente: Elaboración propia

Tabla 35
Proporciones de mezcla

<i>Cemento</i>	<i>Arena</i>	<i>Grava</i>
1,0	2,04	2,11

Fuente: Elaboración propia

Las actividades incluyeron:

Paso 1: Preparación de materiales

- En base al cálculo previo de la dosificación para 1 m³ de hormigón, se determinó el peso exacto de cada uno de los componentes.
- Dado que se trabajó con materiales en estado seco, se colocó la grava y la arena en el horno 24 horas antes del mezclado, con el fin de eliminar la humedad natural.
- Posteriormente, ambos materiales fueron retirados del horno con varias horas de anticipación a la dosificación, permitiendo que reposaran a temperatura ambiente. Este paso fue importante para evitar que el calor aumente la absorción de agua durante la mezcla.
- Finalmente, se procedió a pesar cada componente arena, grava, cemento, agua y, por último, las fibras. En el caso de las fibras se trató de homogenizar la cantidad de fibra de acero y fibra textil.

Paso 2: Mezclado

- Se introdujeron los agregados (arena y grava) en la mezcladora y se mezclaron en seco durante aproximadamente un minuto, con el objetivo de lograr una distribución uniforme de los materiales.
- Primero se incorporó la mitad de agua calculada y luego de forma progresiva mientras continuaba la mezcla, lo cual permitió una hidratación controlada del cemento y evitó la formación de grumos.
- Las fibras recicladas fueron añadidas manualmente. Antes de su incorporación, se desmenuzaron cuidadosamente con los dedos para evitar la formación de aglomeraciones o "erizos", asegurando así una dispersión homogénea en la mezcla.

Paso 3: Asentamiento

- Previo a cada ensayo, todas las superficies de contacto con el hormigón fresco se humedecieron para prevenir la absorción de agua de la mezcla y facilitar la extracción del molde.
- El molde cónico se colocó de manera estable y centrada sobre la placa base preparada. Para asegurar su inmovilidad durante el proceso de llenado y compactación, se ejerció presión sobre los estribos inferiores del cono.
- El molde se llenó con la muestra representativa de concreto fresco en tres capas de volumen aproximadamente igual. Cada capa fue compactada de la siguiente manera:
- El molde se llenó con la muestra representativa de hormigón fresco en tres capas, en cada capa se aplicó 25 golpes uniformemente distribuidos de la varilla de compactación.
- Inmediatamente después del enrasado, el molde cónico fue retirado de la masa de hormigón. Esta operación se ejecutó levantando el molde verticalmente de forma lenta, uniforme y sin movimientos laterales o de torsión, en un tiempo

comprendido entre 3 y 7 segundos. El molde se colocó invertido al lado de la masa de hormigón asentada.

- El asentamiento (o revenimiento) se determinó midiendo la distancia vertical entre la parte inferior de la varilla de compactación y el centro de la superficie superior de la masa de hormigón asentada

Paso 4: Preparación de moldes

- Para el desarrollo de este proyecto de investigación, se emplearon probetas cilíndricas de dimensiones 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, destinadas a ensayos de compresión y tracción indirecta. Asimismo, se utilizaron probetas prismáticas con medidas de 15 cm x 15 cm x 150 cm para la realización de ensayos de flexión
- Una vez asegurados los moldes se aplicó una película de aceite en las paredes para evitar que el hormigón se adhiera y el desmoldado sea más fácil.

Paso 5: Llenado y compactación

- Para el caso de probetas cilíndricas se realizó la compactación manual, se colocó el concreto en 3 capas uniformes. Cada capa fue compactada con 25 golpes con una varilla manual para eliminar vacíos. Posteriormente, se utilizó un combo de goma para realizar una compactación adicional. Tras completar el llenado y compactación, se niveló la superficie del concreto con una plancha para obtener un acabado uniforme.
- Y para las probetas prismáticas se colocó el hormigón fresco en capas uniformes de aproximadamente 5 a 7 cm de espesor. Cada capa se compactó utilizando una vibradora, insertándola verticalmente durante 5 a 10 segundos asegurando así la eliminación de vacíos y una consolidación uniforme. Este proceso se repitió para cada capa hasta completar el llenado de la probeta. Finalmente, se niveló la superficie con una regla para obtener un acabado uniforme antes de proceder al curado.

Paso 6: Curado

- Se espero 24 h antes de desmoldar.

Una vez desmoldadas, se colocó las probetas en el tanque de agua a 20 ± 2 °C.

3.1.4.5 Fase V: Ensayos mecánicos y análisis estadístico

Finalmente, se realizaron los ensayos de laboratorio para determinar las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras.

Los ensayos principales fueron:

- ✓ Resistencia a la flexión, conforme a la norma ASTM C78, evaluando la carga de rotura.
- ✓ Resistencia a la tracción indirecta (prueba brasileña), según ASTM C496, como ensayo complementario a la flexión para analizar la respuesta del concreto ante esfuerzos de tensión.
- ✓ Posteriormente, los resultados se procesaron mediante estadística descriptiva e inferencial, calculando promedios, desviaciones estándar y coeficientes de variación.
- ✓ Asimismo, se aplicaron pruebas de significancia (t de Student) para comparar los diferentes porcentajes de fibras y determinar su influencia estadísticamente significativa sobre la resistencia del hormigón.

3.2 Análisis y resultados

El eje central del estudio está enfocado en el comportamiento a flexión del hormigón con incorporación de fibras recicladas (acero y textiles de neumáticos), por lo cual se realizaron ensayos sobre probetas prismáticas a los 7, 14 y 28 días.

Complementariamente, se efectuaron ensayos de tracción indirecta (ensayo brasileño) en cilindros, con el fin de analizar su correlación con los resultados de flexión. Asimismo, se realizaron probetas de compresión a los mismos intervalos de curado únicamente para verificar que la mezcla patrón cumpla con los requisitos del hormigón H25. Los resultados detallados de cada uno de estos ensayos se presentan en secciones posteriores:

3.2.1 Resultados del Ensayo de flexión en probetas de hormigón con diferentes porcentajes de fibras.

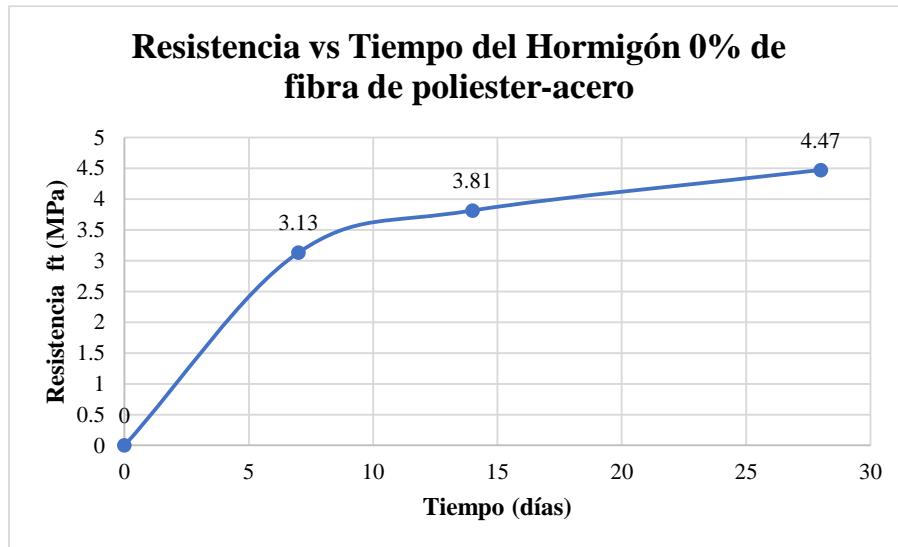
Tabla 36

Resultados del ensayo de flexión en probetas de hormigón con adición de 0.5% de fibra a 7, 14 y 28 días

Nº	Identificac.	Fecha Vaciado	Fecha Rotura	Edad	Dim. "h"	Dim. "b"	Dim. "L"	Peso	Densidad H	Densidad prom	Carga "P"	Carga "P"	Tipo de rotura	Flexión (ft)	Res. Flexión (ft)
				(días)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg)	kg/m3)	(KN)	(N)			(MPa)	28 días ()
1	V1	15/10/2024	22/10/2024	7	150	155	500	29.56	2,542.80	2,558.15	22.10	22,100.00	1/3 central	3.17	4.40
2	V2	15/10/2024	22/10/2024	7	155	155	500	30.00	2,497.40		22.70	22,700.00	1/3 central	3.05	4.23
3	V3	15/10/2024	22/10/2024	7	150	150	490	29.33	2,660.32		22.20	22,200.00	1/3 central	3.22	4.47
4	V4	15/10/2024	22/10/2024	7	150	155	505	29.73	2,532.10		21.30	21,300.00	1/3 central	3.08	4.28
5	V5	18/10/2024	1/11/2024	14	160	155	505	29.50	2,355.48	2,460.42	30.70	30,700.00	1/3 central	3.91	4.60
6	V6	18/10/2024	1/11/2024	14	155	155	510	30.40	2,481.08		26.70	26,700.00	1/3 central	3.66	4.30
7	V7	18/10/2024	1/11/2024	14	150	150	505	29.00	2,552.26		25.10	25,100.00	1/3 central	3.76	4.42
8	V8	18/10/2024	1/11/2024	14	155	150	505	28.80	2,452.89		28.10	28,100.00	1/3 central	3.94	4.63
9	V9	9/10/2024	6/11/2024	28	150	150	500	29.72	2,641.33	2,426.87	29.90	29,900.00	1/3 central	4.43	4.43
10	V10	9/10/2024	6/11/2024	28	150	150	500	29.01	2,578.67		30.20	30,200.00	1/3 central	4.47	4.47
11	V11	9/10/2024	6/11/2024	28	155	155	500	28.72	2,390.84		32.90	32,900.00	1/3 central	4.42	4.42
12	V12	9/10/2024	6/11/2024	28	155	150	510	28.97	2,442.76		31.90	31,900.00	1/3 central	4.51	4.51
13	V13	9/10/2024	6/11/2024	28	150	155	510	28.57	2,409.02		30.60	30,600.00	1/3 central	4.47	4.47
14	V14	9/10/2024	6/11/2024	28	155	155	500	28.76	2,393.76		33.10	33,100.00	1/3 central	4.44	4.44
15	V15	9/10/2024	6/11/2024	28	155	155	505	28.37	2,338.32		32.30	32,300.00	1/3 central	4.38	4.38
16	V16	9/10/2024	6/11/2024	28	155	155	495	29.94	2,517.58		34.60	34,600.00	1/3 central	4.60	4.60
17	V17	9/10/2024	6/11/2024	28	150	160	510	29.56	2,415.03		33.50	33,500.00	1/3 central	4.75	4.75
18	V18	9/10/2024	6/11/2024	28	155	155	505	28.17	2,321.43		32.80	32,800.00	1/3 central	4.45	4.45
19	V19	9/10/2024	6/11/2024	28	155	155	510	29.13	2,377.43		33.00	33,000.00	1/3 central	4.52	4.52
20	V20	9/10/2024	6/11/2024	28	150	150	510	28.64	2,495.86		29.60	29,600.00	1/3 central	4.47	4.47
21	V21	9/10/2024	6/11/2024	28	150	150	510	28.25	2,461.87		29.70	29,700.00	1/3 central	4.49	4.49
22	V22	9/10/2024	6/11/2024	28	150	160	510	28.27	2,309.64		31.70	31,700.00	1/3 central	4.49	4.49
23	V23	9/10/2024	6/11/2024	28	155	155	505	28.02	2,309.48		30.80	30,800.00	1/3 central	4.18	4.18

Fuente: elaboración propia

Figura 17
Evolución de la resistencia a la flexión del hormigón patrón en el tiempo



Fuente: elaboración propia

Interpretación: Considerando que el hormigón generalmente alcanza entre el 99% y el 100% de su resistencia total a los 28 días, podemos utilizar la resistencia media obtenida a los 28 días (4.47 MPa) como referencia para evaluar el desarrollo de la resistencia en etapas anteriores. A los 7 días, el hormigón patrón ha alcanzado aproximadamente el 70.02% de su resistencia final de 28 días y a los 14 días, el hormigón patrón ha alcanzado aproximadamente el 85.24% de su resistencia final de 28 día

Tabla 37

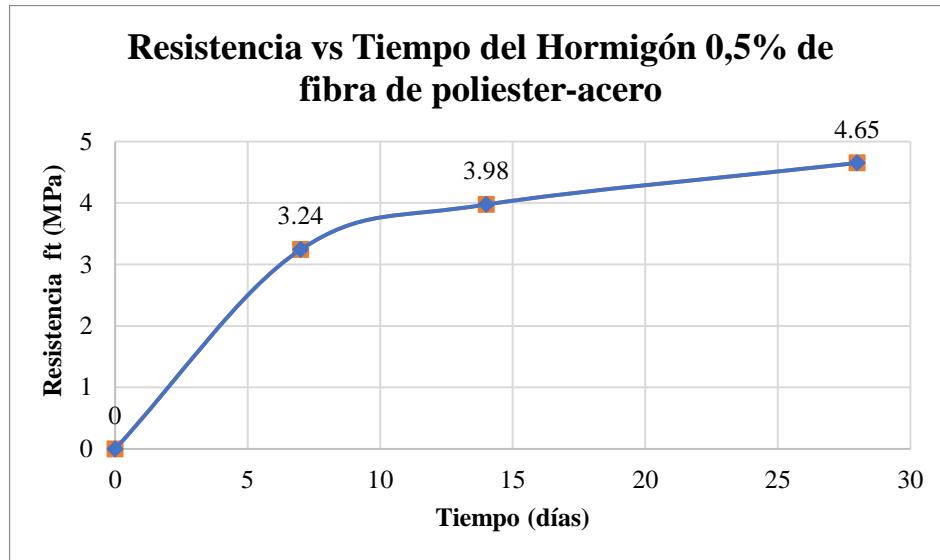
Resultados del ensayo de flexión en probetas de hormigón con adición de 0.5% de fibra a 7, 14 y 28 días

Nº	Identificac.	Fecha Vaciado	Fecha Rotura	Edad	Dim. "h"	Dim. "b"	Dim. "L"	Peso	Densidad H	Densidad prom	Carga "P"	Carga "P"	Tipo de rotura	Flexión (ft)	R. flexión prom.	Res. Flexión (ft)
				(días)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg)	kg/m3)	kg/m3)	(KN)	(N)		(Mpa)	(Mpa)	28 días (Mpa)
1	V1	18/10/2024	25/10/2024	7	150	160	505	27.67	2,283.00	2,273.66	24.40	24,400.00	1/3 central	3.42	3.24	4.75
2	V2	18/10/2024	25/10/2024	7	153	155	505	26.98	2,252.41		22.80	22,800.00	1/3 central	3.17		4.41
3	V3	18/10/2024	25/10/2024	7	150	155	505	27.34	2,328.54		22.10	22,100.00	1/3 central	3.20		4.44
4	V4	18/10/2024	25/10/2024	7	155	155	515	27.60	2,230.69		23.00	23,000.00	1/3 central	3.18		4.42
5	V5	15/10/2024	29/10/2024	14	150	155	510	27.68	2,334.39	2,224.45	28.00	28,000.00	1/3 central	4.09	3.98	4.82
6	V6	15/10/2024	29/10/2024	14	160	155	510	27.62	2,183.74		30.10	30,100.00	1/3 central	3.87		4.55
7	V7	15/10/2024	29/10/2024	14	155	155	505	27.31	2,250.96		29.00	29,000.00	1/3 central	3.93		4.63
8	V8	15/10/2024	29/10/2024	14	160	160	505	27.52	2,128.71		32.50	32,500.00	1/3 central	4.01		4.71
9	V9	8/10/2024	5/11/2024	28	155	150	500	28.75	2,473.12	2,354.14	33.20	33,200.00	1/3 central	4.61	4.65	4.61
10	V10	8/10/2024	5/11/2024	28	150	155	505	28.59	2,434.58		31.80	31,800.00	1/3 central	4.60		4.60
11	V11	8/10/2024	5/11/2024	28	150	150	505	27.08	2,383.28		31.60	31,600.00	1/3 central	4.73		4.73
12	V12	8/10/2024	5/11/2024	28	150	155	505	28.89	2,460.13		31.90	31,900.00	1/3 central	4.62		4.62
13	V13	8/10/2024	5/11/2024	28	150	155	510	27.24	2,297.28		31.50	31,500.00	1/3 central	4.61		4.61
14	V14	8/10/2024	5/11/2024	28	150	155	500	28.25	2,430.11		32.90	32,900.00	1/3 central	4.72		4.72
15	V15	8/10/2024	5/11/2024	28	150	150	505	26.18	2,304.07		31.00	31,000.00	1/3 central	4.64		4.64
16	V16	8/10/2024	5/11/2024	28	155	155	505	28.06	2,312.77		33.90	33,900.00	1/3 central	4.60		4.60
17	V17	8/10/2024	5/11/2024	28	150	155	500	28.07	2,414.62		32.80	32,800.00	1/3 central	4.70		4.70
18	V18	8/10/2024	5/11/2024	28	150	150	510	28.18	2,455.34		30.90	30,900.00	1/3 central	4.67		4.67
19	V19	8/10/2024	5/11/2024	28	150	160	510	27.45	2,242.24		33.20	33,200.00	1/3 central	4.70		4.70
20	V20	8/10/2024	5/11/2024	28	150	155	510	27.06	2,281.68		31.90	31,900.00	1/3 central	4.66		4.66
21	V21	8/10/2024	5/11/2024	28	155	155	505	27.85	2,295.46		34.00	34,000.00	1/3 central	4.61		4.61
22	V22	8/10/2024	5/11/2024	28	150	155	505	27.94	2,379.22		32.20	32,200.00	1/3 central	4.66		4.66
23	V23	8/10/2024	5/11/2024	28	155	160	510	27.17	2,148.17		35.20	35,200.00	1/3 central	4.67		4.67

Fuente: elaboración propia

Figura18

Evolución de la resistencia a la flexión del hormigón con adición de 0.5% de fibra en el tiempo



Fuente: elaboración propia

Interpretación: Considerando que el hormigón generalmente alcanza entre el 99% y el 100% de su resistencia total a los 28 días, podemos utilizar la resistencia media obtenida a los 28 días (4.65 MPa) como referencia para evaluar el desarrollo de la resistencia en etapas anteriores. A los 7 días, el hormigón con adición de 0.5% de fibra ha alcanzado aproximadamente el 69,72% de su resistencia final de 28 días y a los 14 días, el hormigón con adición de 0.5% de fibra ha alcanzado aproximadamente el 85.44% de su resistencia final de 28 días.

Tabla 38

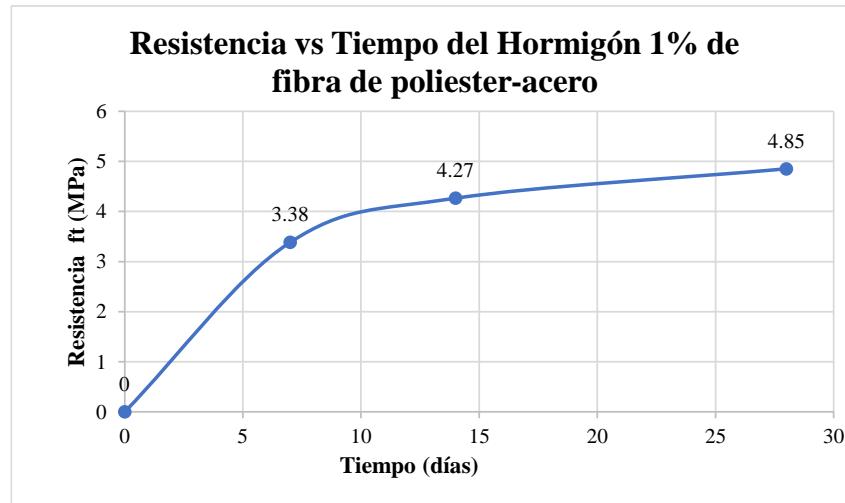
Resultados del ensayo de flexión en probetas de hormigón con adición de 1% de fibra a 7, 14 y 28 días

Nº	Identificac.	Fecha Vaciado	Fecha Rotura	Edad	Dim. "h"	Dim. "b"	Dim. "L"	Peso	Densidad H	Densidad prom	Carga "P"	Carga "P"	Tipo de rotura	Flexión (ft)	R. Flexión prom.	Res. Flexión (ft)
				(días)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg)	kg/m3)	(KN)	(N)		(Mpa)	(Mpa)	28 días (Mpa)	
1	V1	15/10/2024	22/10/2024	7	155	160	510	28.44	2,248.58	2,348.23	24.60	24,600.00	1/3 central	3.26	3.38	4.53
2	V2	15/10/2024	22/10/2024	7	155	160	505	28.78	2,297.99		25.40	25,400.00	1/3 central	3.34		4.63
3	V3	15/10/2024	22/10/2024	7	150	160	510	27.44	2,241.83		26.00	26,000.00	1/3 central	3.68		5.11
4	V4	15/10/2024	22/10/2024	7	150	150	490	28.72	2,604.54		22.40	22,400.00	1/3 central	3.25		4.51
5	V5	18/10/2024	1/11/2024	14	155	155	500	29.80	2,480.75	2,380.95	31.30	31,300.00	1/3 central	4.20	4.27	4.94
6	V6	18/10/2024	1/11/2024	14	155	155	505	28.30	2,332.55		32.40	32,400.00	1/3 central	4.39		5.17
7	V7	18/10/2024	1/11/2024	14	155	150	510	27.50	2,319.21		30.00	30,000.00	1/3 central	4.25		4.99
8	V8	18/10/2024	1/11/2024	14	155	155	510	29.30	2,391.30		30.80	30,800.00	1/3 central	4.22		4.96
9	V9	9/10/2024	6/11/2024	28	150	155	515	28.18	2,353.48	2,372.70	32.30	32,300.00	1/3 central	4.77	4.85	4.77
10	V10	9/10/2024	6/11/2024	28	150	155	510	27.17	2,291.38		33.10	33,100.00	1/3 central	4.84		4.84
11	V11	9/10/2024	6/11/2024	28	150	160	510	27.48	2,244.69		34.70	34,700.00	1/3 central	4.92		4.92
12	V12	9/10/2024	6/11/2024	28	150	160	510	27.88	2,277.37		33.90	33,900.00	1/3 central	4.80		4.80
13	V13	9/10/2024	6/11/2024	28	150	155	495	27.36	2,377.32		34.30	34,300.00	1/3 central	4.87		4.87
14	V14	9/10/2024	6/11/2024	28	150	155	505	27.37	2,331.10		33.40	33,400.00	1/3 central	4.84		4.84
15	V15	9/10/2024	6/11/2024	28	150	155	505	29.17	2,483.98		34.20	34,200.00	1/3 central	4.95		4.95
16	V16	9/10/2024	6/11/2024	28	150	155	495	27.79	2,414.68		34.50	34,500.00	1/3 central	4.90		4.90
17	V17	9/10/2024	6/11/2024	28	150	150	505	29.05	2,556.66		31.90	31,900.00	1/3 central	4.77		4.77
18	V18	9/10/2024	6/11/2024	28	150	150	505	27.52	2,421.56		32.40	32,400.00	1/3 central	4.85		4.85
19	V19	9/10/2024	6/11/2024	28	155	155	495	27.22	2,288.44		36.00	36,000.00	1/3 central	4.79		4.79
20	V20	9/10/2024	6/11/2024	28	150	155	505	29.15	2,482.27		33.70	33,700.00	1/3 central	4.88		4.88
21	V21	9/10/2024	6/11/2024	28	150	155	505	28.11	2,394.12		34.00	34,000.00	1/3 central	4.92		4.92
22	V22	9/10/2024	6/11/2024	28	150	160	505	28.15	2,322.61		34.90	34,900.00	1/3 central	4.90		4.90
23	V23	9/10/2024	6/11/2024	28	150	155	510	27.88	2,350.83		32.80	32,800.00	1/3 central	4.80		4.80

Fuente: elaboración propia

Figura19

Evolución de la resistencia a la flexión del hormigón con adición de 1% de fibra en el tiempo



Fuente: elaboración propia

Interpretación: Considerando que el hormigón generalmente alcanza entre el 99% y el 100% de su resistencia total a los 28 días, podemos utilizar la resistencia media obtenida a los 28 días (4.85 MPa) como referencia para evaluar el desarrollo de la resistencia en etapas anteriores. A los 7 días, el hormigón con adición de 1% de fibra ha alcanzado aproximadamente el 69,74% de su resistencia final de 28 días y a los 14 días, el hormigón con adición de 1% de fibra ha alcanzado aproximadamente el 87,90% de su resistencia final de 28 días.

Tabla 39

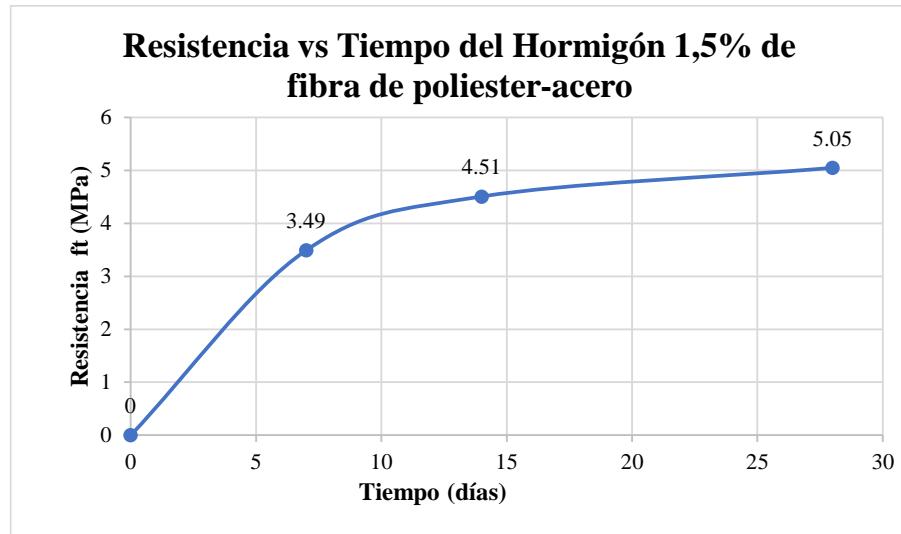
Resultados del ensayo de flexión en probetas de hormigón con adición de 1.5% de fibra a 7, 14 y 28 días

Nº	Identificac.	Fecha Vaciado	Fecha Rotura	Edad	Dim. "h"	Dim. "b"	Dim. "L"	Peso	Densidad H	Densidad prom	Carga "P"	Carga "P"	Tipo de rotura	Flexión (ft)	R. flexión prom.	Res. Flexión (ft)
				(días)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg)	kg/m3)	kg/m3)	(KN)	(N)		(Mpa)	(Mpa)	28 días (Mpa)
1	V1	15/10/2024	22/10/2024	7	155	150	505	29.56	2,517.62	2,477.07	24.70	24,700.00	1/3 central	3.46	3.49	4.80
2	V2	15/10/2024	22/10/2024	7	155	150	505	30.00	2,555.09		25.30	25,300.00	1/3 central	3.55		4.92
3	V3	15/10/2024	22/10/2024	7	150	150	505	29.33	2,581.30		24.00	24,000.00	1/3 central	3.59		4.99
4	V4	15/10/2024	22/10/2024	7	150	155	510	26.73	2,254.27		23.00	23,000.00	1/3 central	3.36		4.67
5	V5	15/10/2024	29/10/2024	14	160	155	505	26.50	2,115.94	2,397.34	35.70	35,700.00	1/3 central	4.54	4.51	5.35
6	V6	15/10/2024	29/10/2024	14	155	155	510	32.40	2,644.30		32.70	32,700.00	1/3 central	4.48		5.27
7	V7	15/10/2024	29/10/2024	14	150	150	505	27.00	2,376.24		30.10	30,100.00	1/3 central	4.50		5.30
8	V8	15/10/2024	29/10/2024	14	155	150	505	28.80	2,452.89		32.10	32,100.00	1/3 central	4.50		5.29
9	V9	3/10/2024	31/10/2024	28	155	155	500	27.72	2,307.18	2,354.24	36.80	36,800.00	1/3 central	4.94	5.05	4.94
10	V10	3/10/2024	31/10/2024	28	150	155	500	28.01	2,409.46		34.30	34,300.00	1/3 central	4.92		4.92
11	V11	3/10/2024	31/10/2024	28	155	150	510	28.72	2,422.10		35.10	35,100.00	1/3 central	4.97		4.97
12	V12	3/10/2024	31/10/2024	28	150	155	510	27.97	2,358.42		36.40	36,400.00	1/3 central	5.32		5.32
13	V13	3/10/2024	31/10/2024	28	150	150	505	27.57	2,425.96		33.10	33,100.00	1/3 central	4.95		4.95
14	V14	10/10/2024	7/11/2024	28	155	150	500	28.76	2,473.55		36.20	36,200.00	1/3 central	5.02		5.02
15	V15	10/10/2024	7/11/2024	28	155	155	505	28.37	2,338.32		36.40	36,400.00	1/3 central	4.94		4.94
16	V16	10/10/2024	7/11/2024	28	150	155	505	26.94	2,294.47		35.10	35,100.00	1/3 central	5.08		5.08
17	V17	10/10/2024	7/11/2024	28	155	160	505	27.56	2,200.57		39.30	39,300.00	1/3 central	5.16		5.16
18	V18	10/10/2024	7/11/2024	28	150	155	505	27.17	2,313.64		35.40	35,400.00	1/3 central	5.13		5.13
19	V19	10/10/2024	7/11/2024	28	155	150	500	27.13	2,333.76		35.80	35,800.00	1/3 central	4.97		4.97
20	V20	10/10/2024	7/11/2024	28	155	155	510	28.64	2,337.43		37.00	37,000.00	1/3 central	5.07		5.07
21	V21	10/10/2024	7/11/2024	28	150	150	505	28.25	2,486.25		34.90	34,900.00	1/3 central	5.22		5.22
22	V22	10/10/2024	7/11/2024	28	160	155	500	28.27	2,279.84		39.60	39,600.00	1/3 central	4.99		4.99
23	V23	10/10/2024	7/11/2024	28	155	155	500	28.02	2,332.57		37.40	37,400.00	1/3 central	5.02		5.02

Fuente: elaboración propia

Figura20

Evolución de la resistencia a la flexión del hormigón con adición de 1.5% de fibra en el tiempo



Fuente: elaboración propia

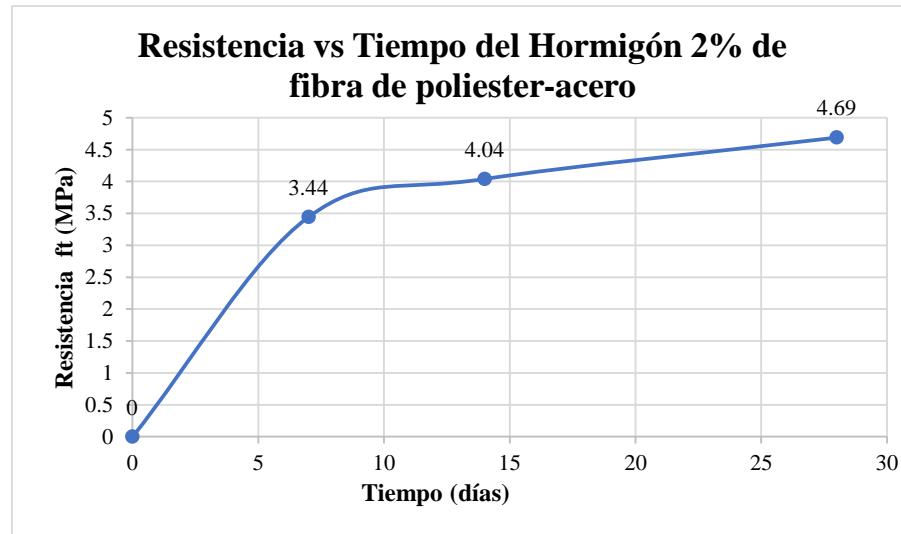
Interpretación: Considerando que el hormigón generalmente alcanza entre el 99% y el 100% de su resistencia total a los 28 días, podemos utilizar la resistencia media obtenida a los 28 días (5.05 MPa) como referencia para evaluar el desarrollo de la resistencia en etapas anteriores. A los 7 días, el hormigón con adición de 1.5% de fibra ha alcanzado aproximadamente el 69.19% de su resistencia final de 28 días y a los 14 días, el hormigón con adición de 1.5% de fibra ha alcanzado aproximadamente el 89.29% de su resistencia final de 28 días

Tabla 40
Resultados del ensayo de flexión en probetas de hormigón con adición de 2% de fibra a 7, 14 y 28 días

Nº	Identificac.	Fecha Vaciado	Fecha Rotura	Edad	Dim. "h"	Dim. "b"	Dim. "L"	Peso	Densidad H	Densidad prom	Carga "P"	Carga "P"	Tipo de rotura	Flexión (ft)	R. flexión prom.	Res. Flexión (ft)
				(días)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg)	kg/m3)	kg/m3)	(KN)	(N)		(Mpa)	(Mpa)	28 días (Mpa)
1	V1	18/10/2024	25/10/2024	7	155	150	500	29.56	2,542.80	2,535.07	24.30	24,300.00	1/3 central	3.37	3.44	4.68
2	V2	18/10/2024	25/10/2024	7	150	150	510	30.00	2,614.38		22.20	22,200.00	1/3 central	3.35		4.66
3	V3	18/10/2024	25/10/2024	7	150	150	500	29.33	2,607.11		23.50	23,500.00	1/3 central	3.48		4.83
4	V4	18/10/2024	25/10/2024	7	150	150	500	26.73	2,376.00		24.10	24,100.00	1/3 central	3.57		4.96
5	V5	15/10/2024	29/10/2024	14	150	155	515	26.50	2,213.17	2,445.67	27.80	27,800.00	1/3 central	4.11	4.04	4.83
6	V6	15/10/2024	29/10/2024	14	150	155	510	32.40	2,732.45		27.90	27,900.00	1/3 central	4.08		4.80
7	V7	15/10/2024	29/10/2024	14	155	150	510	27.00	2,277.04		27.60	27,600.00	1/3 central	3.91		4.60
8	V8	15/10/2024	29/10/2024	14	150	150	500	28.80	2,560.00		27.50	27,500.00	1/3 central	4.07		4.79
9	V9	8/10/2024	5/11/2024	28	150	155	505	27.72	2,360.48	2,363.46	32.40	32,400.00	1/3 central	4.69	4.69	4.69
10	V10	8/10/2024	5/11/2024	28	150	155	505	28.01	2,385.61		31.20	31,200.00	1/3 central	4.52		4.52
11	V11	8/10/2024	5/11/2024	28	150	155	510	28.72	2,422.10		31.80	31,800.00	1/3 central	4.65		4.65
12	V12	8/10/2024	5/11/2024	28	150	155	505	27.97	2,381.77		33.80	33,800.00	1/3 central	4.89		4.89
13	V13	8/10/2024	5/11/2024	28	155	150	505	27.57	2,347.71		34.90	34,900.00	1/3 central	4.89		4.89
14	V14	8/10/2024	5/11/2024	28	150	160	505	28.76	2,372.52		34.90	34,900.00	1/3 central	4.90		4.90
15	V15	8/10/2024	5/11/2024	28	150	150	490	28.37	2,573.24		31.10	31,100.00	1/3 central	4.52	4.69	4.52
16	V16	8/10/2024	5/11/2024	28	155	155	505	26.94	2,220.46		34.40	34,400.00	1/3 central	4.67		4.67
17	V17	8/10/2024	5/11/2024	28	150	155	510	27.56	2,324.27		33.40	33,400.00	1/3 central	4.88		4.88
18	V18	8/10/2024	5/11/2024	28	155	155	510	27.17	2,217.05		33.10	33,100.00	1/3 central	4.53		4.53
19	V19	8/10/2024	5/11/2024	28	155	155	495	27.13	2,281.29		33.90	33,900.00	1/3 central	4.51		4.51
20	V20	8/10/2024	5/11/2024	28	155	150	505	28.64	2,439.26		32.90	32,900.00	1/3 central	4.61		4.61
21	V21	8/10/2024	5/11/2024	28	150	160	510	28.25	2,308.01		34.60	34,600.00	1/3 central	4.90		4.90
22	V22	8/10/2024	5/11/2024	28	150	155	505	28.27	2,407.75		31.50	31,500.00	1/3 central	4.56		4.56
23	V23	8/10/2024	5/11/2024	28	155	150	500	28.02	2,410.32		33.40	33,400.00	1/3 central	4.63		4.63

Fuente: elaboración propia

Figura21
Evolución de la resistencia a la flexión del hormigón con adición de 2% de fibra en el tiempo



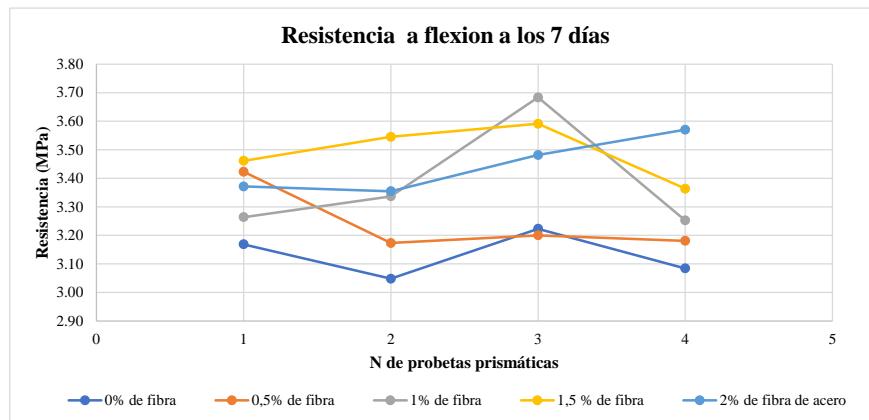
Fuente: elaboración propia

Interpretación: Considerando que el hormigón generalmente alcanza entre el 99% y el 100% de su resistencia total a los 28 días, podemos utilizar la resistencia media obtenida a los 28 días (4.69 MPa) como referencia para evaluar el desarrollo de la resistencia en etapas anteriores. A los 7 días, el hormigón con adición de 2% de fibra ha alcanzado aproximadamente el 73.49% de su resistencia final de 28 días y a los 14 días, el hormigón con adición de 2% de fibra ha alcanzado aproximadamente el 86.17% de su resistencia final de 28 días

3.2.2 Comparación de la resistencia a la flexión del hormigón patrón y hormigón a distintos porcentajes de fibras a los 7, 14 y 28 días

Figura22

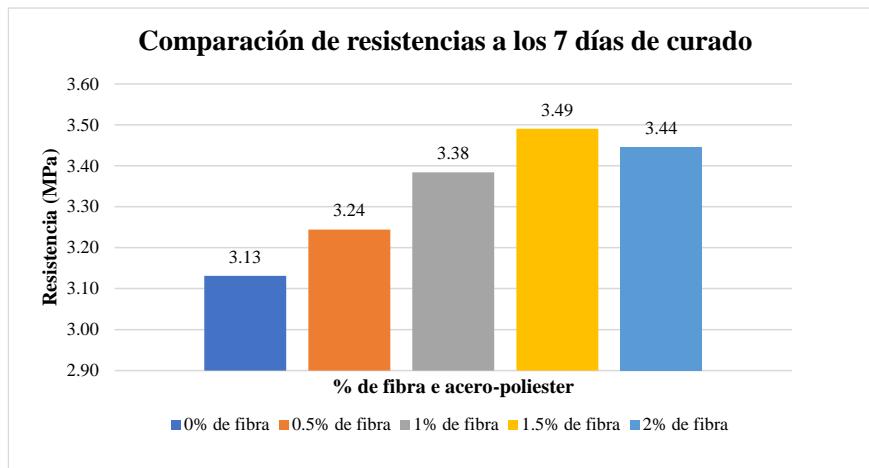
Influencia del contenido de fibras en la resistencia a la flexión del hormigón a los 7 Días



Fuente: elaboración propia

Figura23

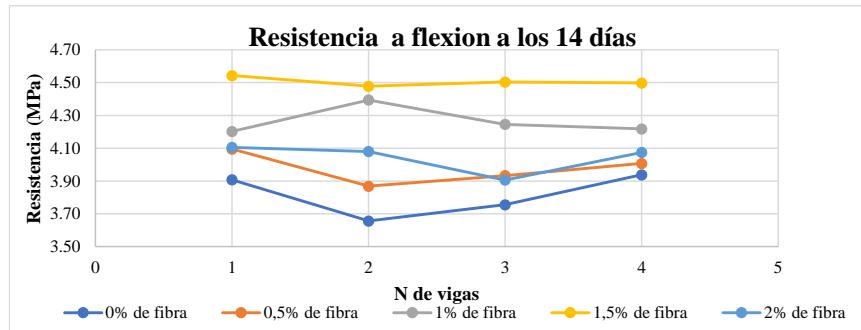
Comparación de resistencia a la flexión a los 7 días con distintos porcentajes de fibra



Fuente: elaboración propia

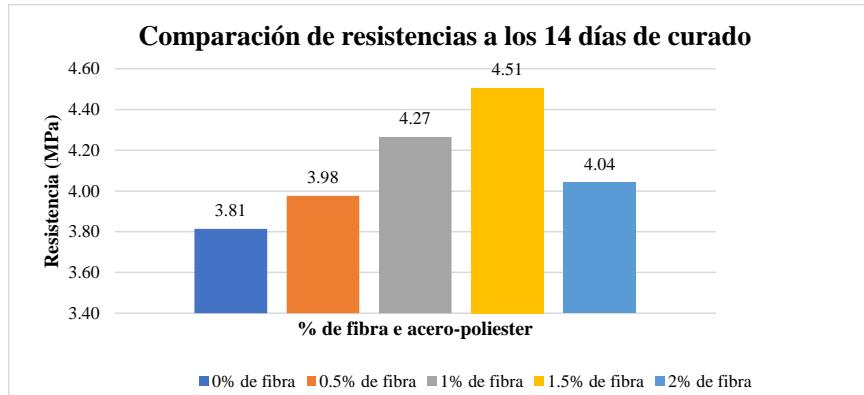
Interpretación: En los gráficos 22 y 23 representa el ensayo a flexión en probetas prismáticas donde muestra que la adición de fibras mejora la resistencia a la flexión del hormigón a los 7 días, especialmente hasta un 1.5% de fibra (3.49 Mpa), donde se observa el rendimiento óptimo. El ligero descenso en la resistencia al 2% (3,44Mpa) podría deberse a una sobresaturación de fibras, que afecta la trabajabilidad.

Figura 24
Influencia del contenido de fibras en la resistencia a la flexión del hormigón a los 14 Días



Fuente: elaboración propia

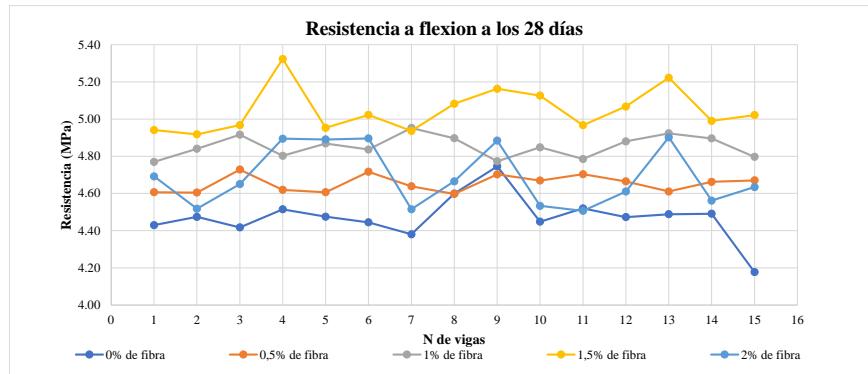
Figura 25
Comparación de resistencia a la flexión a los 14 días con distintos porcentajes de fibra



Fuente: elaboración propia

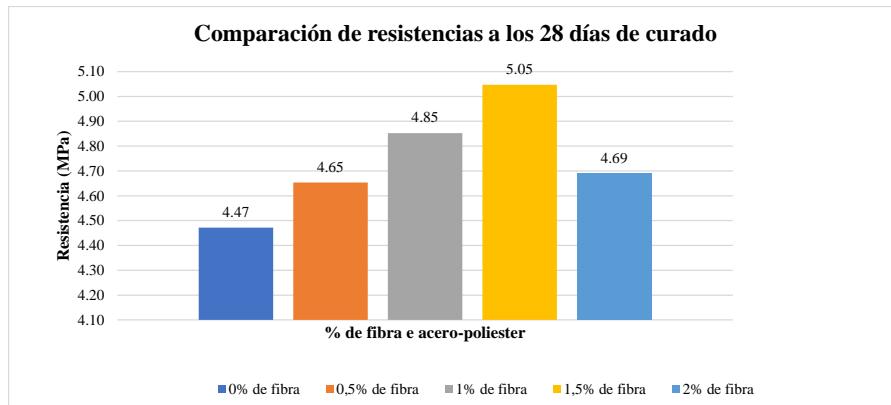
Interpretación: En los gráficos 24 y 25 representa el ensayo a flexión en probetas prismáticas donde muestra que la adición de fibras mejora la resistencia a la flexión del hormigón a los 7 días, especialmente hasta un 1.5% de fibra (4.51 Mpa), donde se observa el rendimiento óptimo. El ligero descenso en la resistencia al 2% (4.04Mpa) podría deberse a una sobresaturación de fibras, que afecta la trabajabilidad.

Figura 26
Influencia del contenido de fibras en la resistencia a la flexión del hormigón a los 28 días



Fuente: elaboración propia

Figura 27
Comparación de resistencia a la flexión a los 14 días con distintos porcentajes de fibra

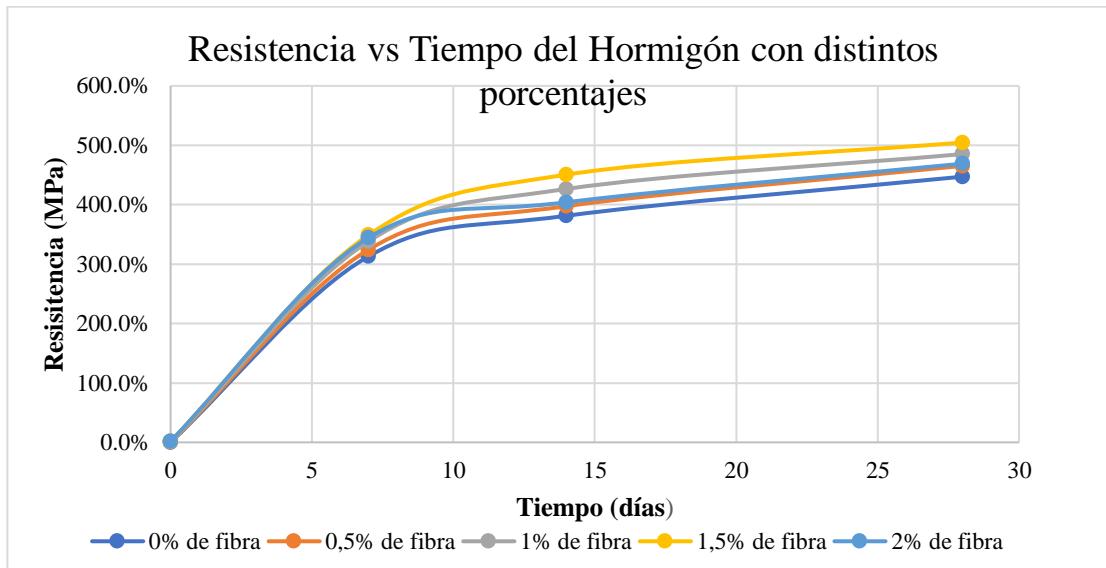


Fuente: elaboración propia

Interpretación: En los gráficos 26 y 27 representa el ensayo a flexión en probetas prismáticas donde muestra que la adición de fibras mejora la resistencia a la flexión del hormigón a los 7 días, especialmente hasta un 1.5% de fibra (4,51 Mpa), donde se observa el rendimiento óptimo. El ligero descenso en la resistencia al 2% (4,04Mpa) podría deberse a una sobresaturación de fibras, que afecta la trabajabilidad.

Figura 28

Comparación de las resistencias a compresión del hormigón con distintos porcentajes de vidrio.



Fuente: elaboración propia

Figura 29

Resumen final de resistencia a la flexión a 7, 14 y 28 días

Nº	Contenido de fibra acero-textil	7 días	14 días	28 días	Tipo de rotura
		(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	
1	Patrón (0%)	3.131	3.814	4.472	1/3 central
2	0.50%	3.244	3.976	4.653	1/3 central
3	1%	3.38	4.265	4.852	1/3 central
4	1.50%	3.44	4.506	5.047	1/3 central
5	2%	3.44	4.041	4.690	1/3 central

Fuente: elaboración propia

Las 115 probetas prismáticas ensayadas(vigas), incluyendo la de hormigón patrón como la de hormigón con fibra, manifestaron su fractura de manera en el tercio central de la luz, el cual corresponde a la zona de máximo momento flector constante. Este patrón de falla uniforme y repetitivo a lo largo de una muestra tan significativa no solo valida la correcta aplicación de la carga y el cumplimiento de las normativas del

ensayo, sino que también ratifica la homogeneidad de las probetas y la fiabilidad de los datos obtenidos.

Los resultados muestran un incremento progresivo de la resistencia a la flexión desde los 7 hasta los 28 días, evidenciando el desarrollo esperado de la resistencia del hormigón en el tiempo. La mayor resistencia a 28 días se alcanzó con un 1.5 % de fibras, logrando una mejora del 12.86 % respecto al hormigón patrón. Con 2 % de fibras, aunque se observó un aumento respecto al patrón, este no fue proporcionalmente mayor debido a problemas de trabajabilidad y compactación.

En conjunto, los resultados confirman la hipótesis de que la adición de fibras recicladas de acero-textil mejora la resistencia a la flexión del hormigón, especialmente en porcentajes de hasta 1.5 %.

3.2.3 Validación de datos de resistencia a flexión

Los procedimientos de evaluación de resultados de pruebas de resistencia del hormigón, detallados en el presente trabajo de investigación, si bien se fundamentan en los requisitos de resistencia a la compresión establecidos por normas como ACI 301 y ACI 318, extienden su aplicabilidad a una gama más amplia de propiedades del hormigón, incluyendo de manera explícita la resistencia a la flexión.

Para hacer el análisis estadístico de los resultados de las probetas prismáticas de hormigón se tuvo que proyectar las resistencias a los 28 días de los hormigones rotos a los 7 y 14 días. En las siguientes tablas se observa el análisis.

Tabla 41
Distribución normal del hormigón patrón.

Nº	Resistencia a los 28 días (N/mm ²)	Resistencia a los 28 días (N/mm ²) de menor a mayor	DISTR-NORMAL
1	4.40	4.18	0.31
2	4.23	4.23	0.70
3	4.47	4.28	1.28
4	4.28	4.30	1.56
5	4.60	4.38	2.65
6	4.30	4.40	2.84
7	4.42	4.42	3.00
8	4.63	4.42	3.00
9	4.43	4.43	3.06
10	4.47	4.44	3.10
11	4.42	4.45	3.11
12	4.51	4.47	3.07
13	4.47	4.47	3.07
14	4.44	4.47	3.07
15	4.38	4.47	3.06
16	4.60	4.49	3.00
17	4.75	4.49	2.98
18	4.45	4.51	2.77
19	4.52	4.52	2.72
20	4.47	4.60	1.66
21	4.49	4.60	1.62
22	4.49	4.63	1.16
23	4.18	4.75	0.23

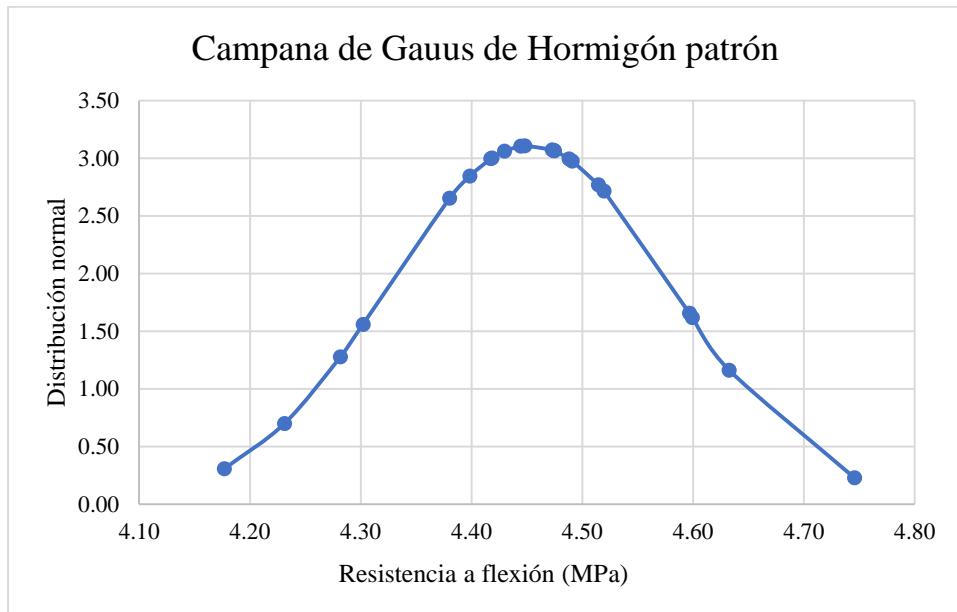
Fuente: elaboración propia

Tabla 42
Resultados estadísticos de la resistencia del hormigón patrón

Parámetro	Resultado	Unidades	Valor de referencia	Criterio
Tamaño de muestra	23.00	-	-	-
Promedio	4.45	MPa	-	-
Desviación estándar	0.13	MPa	<1,41	Excelente
Coeficiente de variación	2.88	-	de 2 a 3	Muy bueno
Comprobación del factor T	-	-	-	-
Máximo	4.63	MPa	-	-
Mínimo	4.23	MPa	-	-

Fuente: elaboración propia

Figura 30
Campana de Gauss del hormigón patrón.



Fuente: elaboración propia

Hormigón con adición de 0.5% de fibra

Tabla 43
Distribución normal del hormigón con adición del 0.5% de fibra.

Nº	Resistencia a los 28 días (MPa)	Resistencia a los 28 días (MPa) de menor a mayor	DISTR-NORMAL
1	4.75	4.41	0.34
2	4.41	4.42	0.42
3	4.44	4.44	0.71
4	4.42	4.55	2.87
5	4.82	4.60	3.68
6	4.55	4.60	3.76
7	4.63	4.61	3.77
8	4.71	4.61	3.78
9	4.61	4.61	3.81
10	4.60	4.62	3.86
11	4.73	4.63	3.89
12	4.62	4.64	3.88
13	4.61	4.66	3.71
14	4.72	4.66	3.69
15	4.64	4.67	3.63
16	4.60	4.67	3.62
17	4.70	4.70	3.06
18	4.67	4.70	3.04
19	4.70	4.71	2.81
20	4.66	4.72	2.75
21	4.61	4.73	2.49
22	4.66	4.75	1.96
23	4.67	4.82	0.76

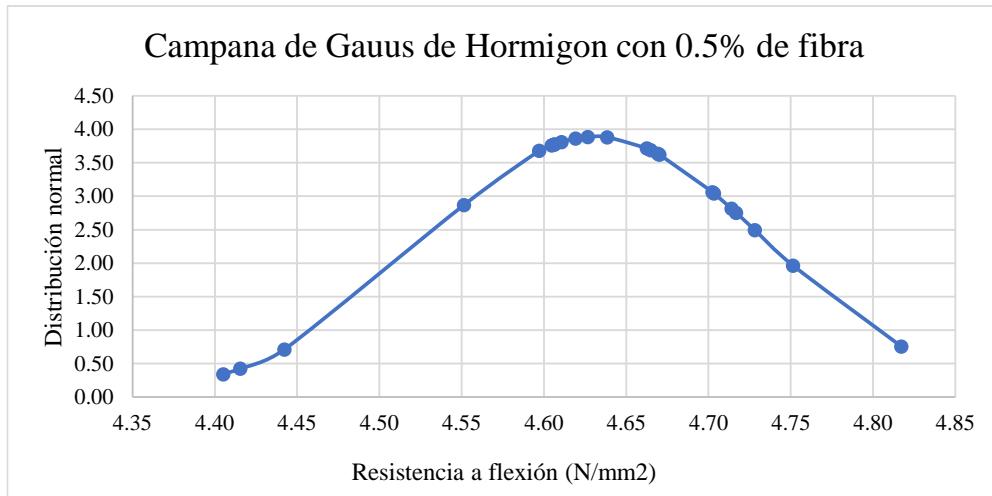
Fuente: elaboración propia

Tabla 44
Resultados estadísticos de la resistencia del hormigón con adición de 0.5% de fibra

Parámetro	Resultado	Unidades	Valor de referencia	Criterio
Tamaño de muestra	23	-	-	-
Promedio	4.63	N/mm ²	-	-
Desviación estándar	0.10	N/mm ²	<1,41	Excelente
Coeficiente de variación	2.2	-	de 2 a 3	Muy bueno
Comprobación del factor T	t calculada= -1.02	-	t calculada < t crítica	Se rechaza la hipótesis nula (H_0)
	t crítica= -1.72	-		Diferencia significativa
Máximo	4.82	N/mm ²	-	-
Mínimo	4.41	N/mm ²	-	-

Fuente: elaboración propia

Figura 31
Campana de Gauss del hormigón con adición del 0.5% de fibra



Fuente: elaboración propia

Hormigón con adición de 1% de fibra

Tabla 45
Distribución normal del hormigón con adición del 1% de fibra.

Nº	Resistencia a los 28 días (MPa)	Resistencia a los 28 días (MPa) de menor a mayor	DISTR-NORMAL
1	4.53	4.51	0.23
2	4.63	4.53	0.29
3	5.11	4.63	0.92
4	4.51	4.77	2.23
5	4.94	4.77	2.25
6	5.17	4.79	2.34
7	4.99	4.80	2.41
8	4.96	4.80	2.45
9	4.77	4.84	2.57
10	4.84	4.84	2.58
11	4.92	4.85	2.59
12	4.80	4.87	2.58
13	4.87	4.88	2.55
14	4.84	4.90	2.50
15	4.95	4.90	2.49
16	4.90	4.92	2.39
17	4.77	4.92	2.34
18	4.85	4.94	2.18
19	4.79	4.95	2.11
20	4.88	4.96	2.02
21	4.92	4.99	1.71
22	4.90	5.11	0.63
23	4.80	5.17	0.32

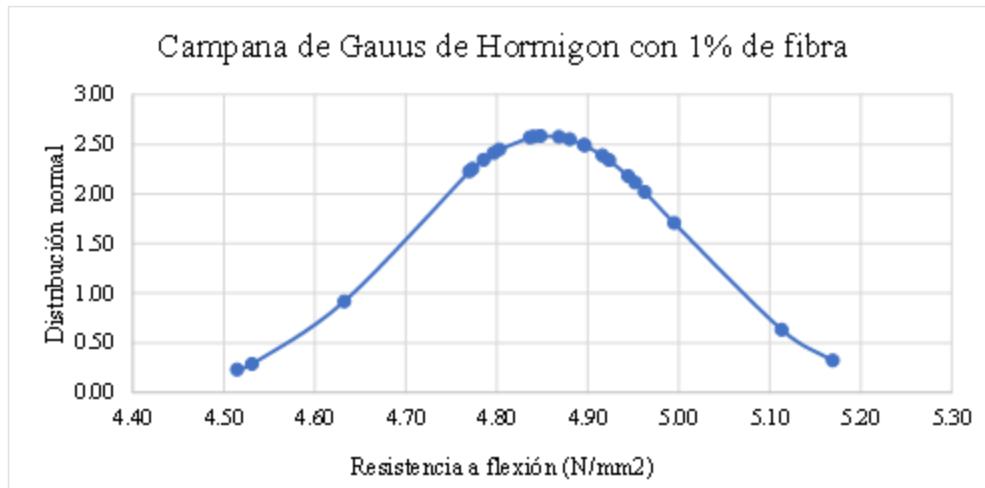
Fuente: elaboración propia

Tabla 46
Resultados estadísticos de la resistencia del hormigón con adición de 1% de fibra

Parámetro	Resultado	Unidades	Valor de referencia	Criterio
Tamaño de muestra	23	-	-	-
Promedio	4.85	N/mm ²	-	-
Desviación estándar	0.15	N/mm ²	<1,41	Excelente
Coeficiente de variación	3.18	-	de 3 a 4	Bueno
Comprobación del factor T	t calculada= -1.00 t crítica= -1.72	-	t calculada < t crítica	Se rechaza la hipótesis nula (H_0) Diferencia significativa
Máximo	5.17	N/mm ²	-	-
Mínimo	4.51	N/mm ²	-	-

Fuente: elaboración propia

Figura 32
Campana de Gauss del hormigón con adición del 1% de fibra



Fuente: elaboración propia

Hormigón con adición de 1.5% de fibra

Tabla 47

Distribución normal del hormigón con adición del 1.5% de fibra

Nº	Resistencia a los 28 días (MPa)	Resistencia a los 28 días (MPa) de menor a mayor	DISTR-NORMAL
1	4.80	4.67	0.20
2	4.92	4.80	0.82
3	4.99	4.92	1.67
4	4.67	4.92	1.70
5	5.35	4.94	1.80
6	5.27	4.94	1.84
7	5.30	4.95	1.91
8	5.29	4.97	2.00
9	4.94	4.97	2.00
10	4.92	4.99	2.10
11	4.97	4.99	2.12
12	5.32	5.02	2.23
13	4.95	5.02	2.24
14	5.02	5.07	2.27
15	4.94	5.08	2.25
16	5.08	5.13	2.10
17	5.16	5.16	1.89
18	5.13	5.22	1.45
19	4.97	5.27	1.09
20	5.07	5.29	0.92
21	5.22	5.30	0.87
22	4.99	5.32	0.71
23	5.02	5.35	0.58

Fuente: elaboración propia

Tabla 48

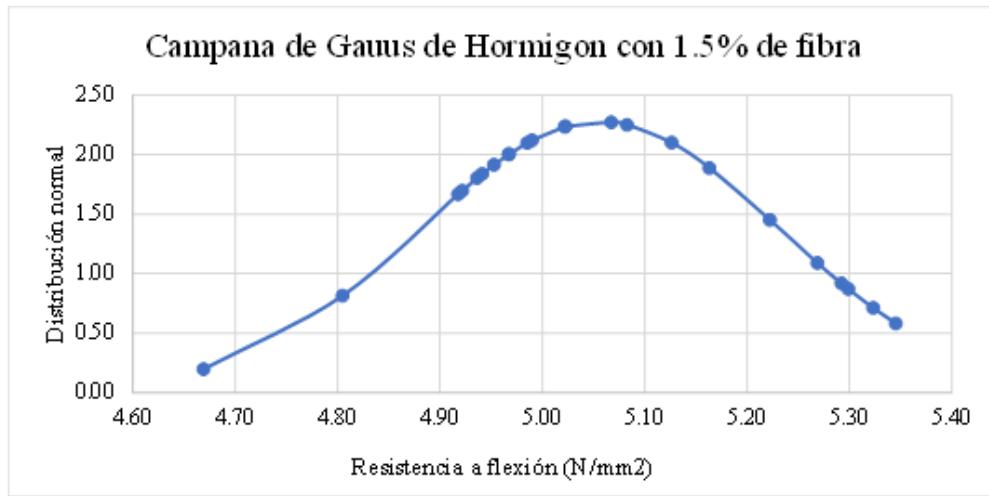
Resultados estadísticos de la resistencia del hormigón con adición de 1.5% de fibra

Parámetro	Resultado	Unidades	Valor de referencia	Criterio
Tamaño de muestra	23	-	-	-
Promedio	5.06	N/mm ²	-	-
Desviación estándar	0.175201956	N/mm ²	<1,41	Excelente
Coeficiente de variación	3.5	-	de 3 a 4	Bueno
Comprobación del factor T	t calculada= -0.99 t crítica= -1.72	-	t calculada < t crítica	Se rechaza la hipótesis nula (H_0) Diferencia significativa
Máximo	5.35	N/mm ²	-	-
Mínimo	4.67	N/mm ²	-	-

Fuente: elaboración propia

Figura 33

Campana de Gauss del hormigón con adición del 1.5% de fibra



Fuente: elaboración propia

Hormigón con adición de 2% de fibra

Tabla 49

Distribución normal del hormigón con adición del 2% de fibra.

Nº	Resistencia a los 28 días (MPa)	Resistencia a los 28 días (MPa) de menor a mayor	DISTR-NORMAL
1	4.68	4.51	0.97
2	4.66	4.52	1.06
3	4.83	4.52	1.09
4	4.96	4.53	1.24
5	4.83	4.56	1.55
6	4.80	4.60	1.92
7	4.60	4.61	2.08
8	4.79	4.63	2.30
9	4.69	4.65	2.44
10	4.52	4.66	2.48
11	4.65	4.67	2.54
12	4.89	4.68	2.62
13	4.89	4.69	2.66
14	4.90	4.79	2.37
15	4.52	4.80	2.31
16	4.67	4.83	2.02
17	4.88	4.83	1.99
18	4.53	4.88	1.42
19	4.51	4.89	1.36
20	4.61	4.89	1.32
21	4.90	4.90	1.30
22	4.56	4.90	1.24
23	4.63	4.96	0.73

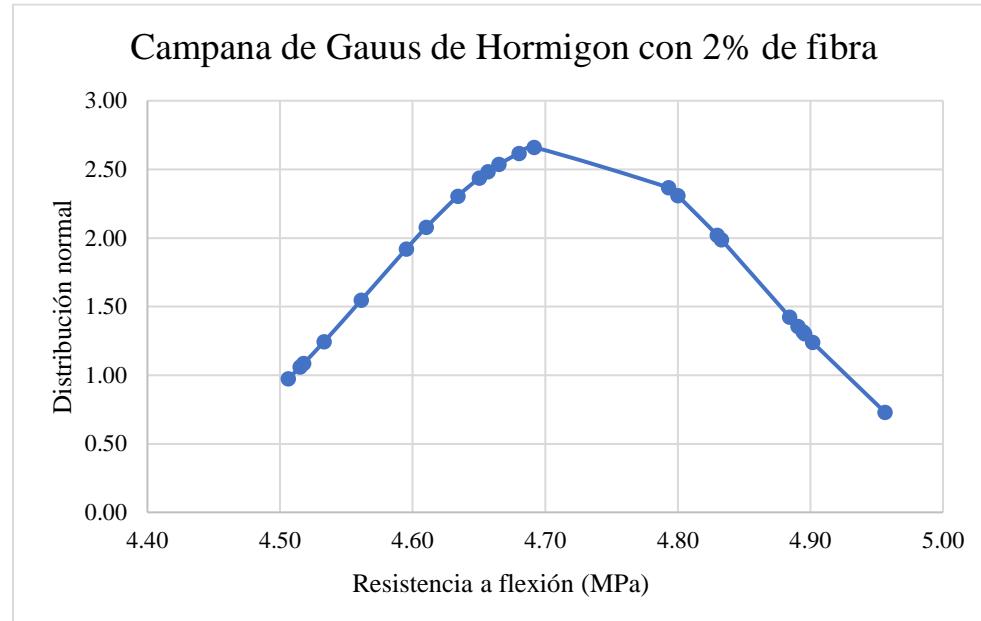
Fuente: elaboración propia

Tabla 50
Resultados estadísticos de la resistencia del hormigón con adición de 2% de fibra

Parámetro	Resultado	Unidades	Valor de referencia	Criterio
Tamaño de muestra	23	-	-	-
Promedio	4.72	N/mm ²	-	-
Desviación estándar	0.147764463	N/mm ²	<1,41	Excelente
Coeficiente de variación	3.1	-	de 3 a 4	Bueno
Comprobación del factor T	t calculada= -1.01	-	t calculada < t crítica	Se rechaza la hipótesis nula (H_0)
	t crítica= -1.72	-		Diferencia significativa
Máximo	4.96	N/mm ²	-	-
Mínimo	4.52	N/mm ²	-	-

Fuente: elaboración propia

Figura 34
Campana de Gauss del hormigón con adición del 2% de fibra



Fuente: elaboración propia

3.2.4 Resultados del Ensayo de tracción indirecta (ensayo brasílico) en Probetas de Hormigón con Diferentes Porcentajes de Fibras.

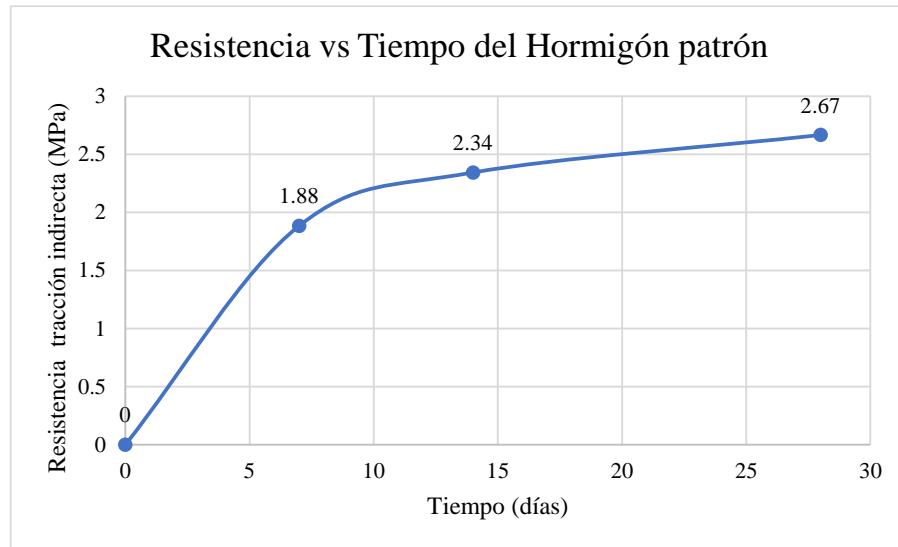
A pesar de que el enfoque principal del presente estudio fue la resistencia a la flexión del hormigón con adición de fibras de acero y fibras textiles recicladas de neumáticos, se decidió realizar de manera complementaria el ensayo de tracción indirecta (ensayo brasileño) utilizando la misma mezcla de hormigón. Esto se debe a que ambas propiedades están relacionadas con el comportamiento del material frente a esfuerzos de tracción. La tracción indirecta permite estimar la capacidad del hormigón para resistir tensiones internas que también se desarrollan durante la flexión, especialmente en la parte traccionada de la probeta. Al utilizar la misma dosificación, se buscó obtener una visión más completa y comparativa del efecto de las fibras en la resistencia del material, desde distintos tipos de solicitud.

Tabla 51
Resistencia de esfuerzo a tracción indirecta de hormigón patrón en 7, 14, 28 días.

Nº	Edad	ϕ	h	Volumen	Peso	Densidad	Densidad prom	Sección	Lectura	Esfuerzo a tracción indirecta	Promedio de esfuerzo a tracción indirecta	Proyección 28 días
1	7	15.00	30.00	0.01	13.08	2,466.31	2,456.17	17,671.46	133.10	1.88	1.88	2.61
2	7	15.00	30.00	0.01	13.09	2,468.20		17,671.46	134.60	1.90		2.64
3	7	15.00	30.00	0.01	13.00	2,451.22		17,671.46	132.30	1.87		2.60
4	7	15.00	30.00	0.01	12.93	2,438.96		17,671.46	132.80	1.88		2.61
5	14	15.00	30.00	0.01	12.99	2,450.28	2,450.42	17,671.46	168.60	2.39	2.34	2.81
6	14	15.00	30.00	0.01	13.07	2,464.99		17,671.46	167.70	2.37		2.79
7	14	15.00	30.00	0.01	12.93	2,438.02		17,671.46	161.20	2.28		2.68
8	14	15.00	30.00	0.01	12.98	2,448.39		17,671.46	165.10	2.34		2.75
9	28	15.00	30.00	0.01	13.08	2,466.31	2,487.91	17,671.46	189.00	2.67	2.67	2.67
10	28	15.00	30.00	0.01	13.11	2,471.97		17,671.46	182.20	2.58		2.58
11	28	15.00	30.00	0.01	13.15	2,480.46		17,671.46	187.50	2.65		2.65
12	28	15.00	30.00	0.01	13.08	2,467.26		17,671.46	192.30	2.72		2.72
13	28	15.00	30.00	0.01	13.96	2,633.25		17,671.46	185.80	2.63		2.63
14	28	15.00	30.00	0.01	13.19	2,487.06		17,671.46	187.60	2.65		2.65
15	28	15.00	30.00	0.01	13.05	2,461.60		17,671.46	198.00	2.80		2.80
16	28	15.00	30.00	0.01	13.07	2,464.43		17,671.46	188.10	2.66		2.66
17	28	15.00	30.00	0.01	13.17	2,484.23		17,671.46	184.20	2.61		2.61
18	28	15.00	30.00	0.01	13.06	2,462.54		17,671.46	190.10	2.69		2.69

Fuente: elaboración propia

Figura 35
Evolución de la resistencia a tracción indirecta del hormigón patrón en el tiempo



Fuente: elaboración propia

Interpretación: Considerando que el hormigón generalmente alcanza entre el 99% y el 100% de su resistencia total a los 28 días, podemos utilizar la resistencia media obtenida a los 28 días (2.67MPa) como referencia para evaluar el desarrollo de la resistencia en etapas anteriores. A los 7 días, el hormigón con adición de 0.5% de fibra ha alcanzado aproximadamente el 70.67% de su resistencia final de 28 días y a los 14 días, el hormigón con adición de 0.5% de fibra ha alcanzado aproximadamente el 87.89% de su resistencia final de 28 días

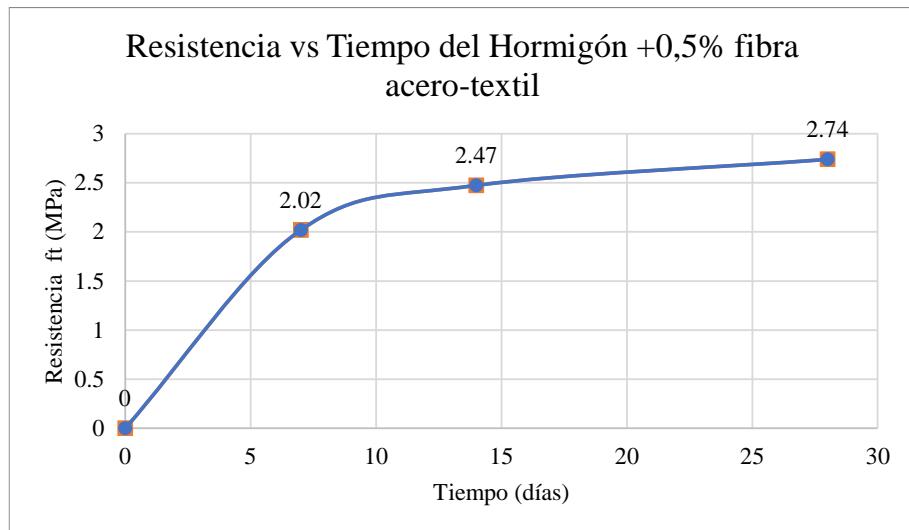
Tabla 52

Resistencia de esfuerzo a tracción indirecta de hormigón con 0,5% de fibra acero-textil en 7, 14, 28 días.

Nº	Edad	\varnothing	h	Volumen	Peso	Densidad	Densidad prom	Sección	Lectura	Esfuerzo a tracción indirecta	Promedio de esfuerzo a tracción indirecta	Proyección 28 días
1	7	15.00	30.00	0.01	12.89	2,430.47	2,427.41	17,671.46	156.20	1.99	2.02	2.76
2	7	15.00	30.00	0.01	12.88	2,428.59		17,671.46	155.00	1.97		2.74
3	7	15.00	30.00	0.01	12.84	2,421.04		17,671.46	155.90	2.00		2.78
4	7	15.00	30.00	0.01	12.88	2,429.53		17,671.46	134.30	2.11		2.93
5	14	15.00	30.00	0.01	12.95	2,441.79	2,435.90	17,671.46	178.40	2.50	2.47	2.94
6	14	15.00	30.00	0.01	12.90	2,432.36		17,671.46	179.50	2.51		2.96
7	14	15.00	30.00	0.01	12.93	2,438.02		17,671.46	182.30	2.47		2.91
8	14	15.00	30.00	0.01	12.89	2,431.42		17,671.46	185.60	2.41		2.84
9	28	15.00	30.00	0.01	12.89	2,431.42	2,442.26	17,671.46	201.00	2.73	2.74	2.73
10	28	15.00	30.00	0.01	12.95	2,441.79		17,671.46	202.00	2.87		2.87
11	28	15.00	30.00	0.01	12.97	2,446.51		17,671.46	215.50	2.83		2.83
12	28	15.00	30.00	0.01	12.97	2,445.56		17,671.46	208.00	2.74		2.74
13	28	15.00	30.00	0.01	12.99	2,449.34		17,671.46	188.40	2.67		2.67
14	28	15.00	30.00	0.01	12.90	2,432.36		17,671.46	214.60	2.88		2.88
15	28	15.00	30.00	0.01	12.98	2,447.45		17,671.46	208.60	2.38		2.38
16	28	15.00	30.00	0.01	12.94	2,440.85		17,671.46	204.30	2.82		2.82
17	28	15.00	30.00	0.01	13.00	2,451.22		17,671.46	200.30	2.84		2.84
18	28	15.00	30.00	0.01	12.92	2,436.13		17,671.46	197.50	2.63		2.63

Fuente: elaboración propia

Figura 36
Evolución de la resistencia a tracción indirecta del hormigón con 0.5% de fibra acero-textil en el tiempo



Fuente: elaboración propia

Interpretación: Considerando que el hormigón generalmente alcanza entre el 99% y el 100% de su resistencia total a los 28 días, podemos utilizar la resistencia media obtenida a los 28 días (2.74MPa) como referencia para evaluar el desarrollo de la resistencia en etapas anteriores. A los 7 días, el hormigón con adición de 0.5% de fibra ha alcanzado aproximadamente el 73.73% de su resistencia final de 28 días y a los 14 días, el hormigón con adición de 0.5% de fibra ha alcanzado aproximadamente el 90.34% de su resistencia final de 28 días

Tabla 53

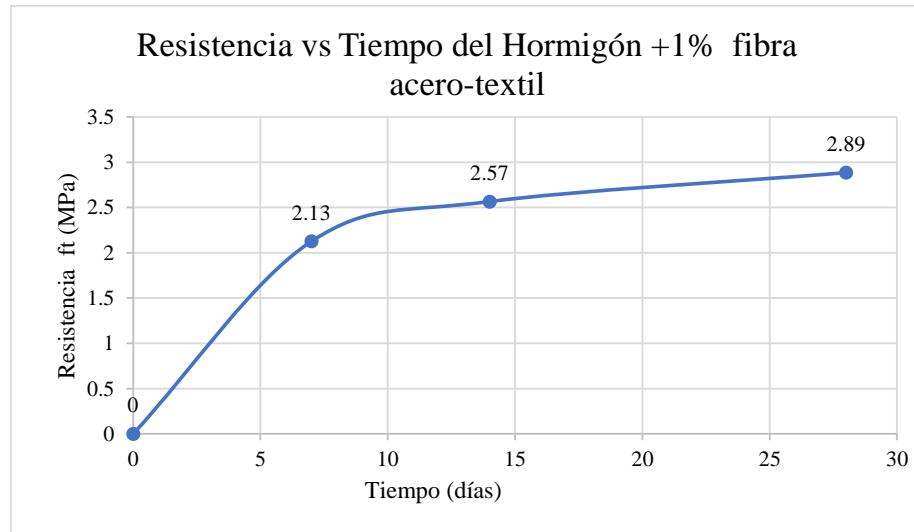
Resistencia de esfuerzo a tracción indirecta de hormigón con 1% de fibra acero-textil en 7, 14, 28 días.

Nº	Edad	σ	h	Volumen	Peso	Densidad	Densidad prom	Sección	Lectura	Esfuerzo a tracción indirecta	Promedio de esfuerzo a tracción indirecta	Proyección 28 días
	(días)	(cm)	(cm)	(m³)	kg	kg/m³		kg/m²	(cm²)	(kN)	(N/mm²)	
1.00	7.00	15.00	30.00	0.01	12.71	2,396.52	2,396.76		17,671.46	156.20	2.21	2.13
2.00	7.00	15.00	30.00	0.01	12.73	2,401.24			17,671.46	155.00	2.19	
3.00	7.00	15.00	30.00	0.01	12.69	2,392.75			17,671.46	155.90	2.21	
4.00	7.00	15.00	30.00	0.01	12.71	2,396.52			17,671.46	134.30	1.90	
5.00	14.00	15.00	30.00	0.01	12.77	2,408.78	2,407.37		17,671.46	178.40	2.52	2.57
6.00	14.00	15.00	30.00	0.01	12.78	2,410.67			17,671.46	179.50	2.54	
7.00	14.00	15.00	30.00	0.01	12.74	2,402.18			17,671.46	182.30	2.58	
8.00	14.00	15.00	30.00	0.01	12.77	2,407.84			17,671.46	185.60	2.63	
9.00	28.00	15.00	30.00	0.01	12.85	2,422.93	2,411.23		17,671.46	201.00	2.84	2.89
10.00	28.00	15.00	30.00	0.01	12.74	2,403.12			17,671.46	202.00	2.86	
11.00	28.00	15.00	30.00	0.01	12.76	2,405.95			17,671.46	215.50	3.05	
12.00	28.00	15.00	30.00	0.01	12.87	2,426.70			17,671.46	208.00	2.94	
13.00	28.00	15.00	30.00	0.01	12.77	2,408.78			17,671.46	188.40	2.67	
14.00	28.00	15.00	30.00	0.01	12.79	2,411.61			17,671.46	214.60	3.04	
15.00	28.00	15.00	30.00	0.01	12.72	2,398.41			17,671.46	208.60	2.95	
16.00	28.00	15.00	30.00	0.01	12.79	2,411.61			17,671.46	204.30	2.89	
17.00	28.00	15.00	30.00	0.01	12.78	2,410.67			17,671.46	200.30	2.83	
18.00	28.00	15.00	30.00	0.01	12.79	2,412.55			17,671.46	197.50	2.79	

Fuente: elaboración propia

Figura 37

Evolución de la resistencia a tracción indirecta del hormigón con 1% de fibra acero-textil en el tiempo



Fuente: elaboración propia

Interpretación: Considerando que el hormigón generalmente alcanza entre el 99% y el 100% de su resistencia total a los 28 días, podemos utilizar la resistencia media obtenida a los 28 días (2,89MPa) como referencia para evaluar el desarrollo de la resistencia en etapas anteriores. A los 7 días, el hormigón con adición de 0,5% de fibra ha alcanzado aproximadamente el 73,69% de su resistencia final de 28 días y a los 14 días, el hormigón con adición de 0,5% de fibra ha alcanzado aproximadamente el 88,94% de su resistencia final de 28 día

Tabla 54

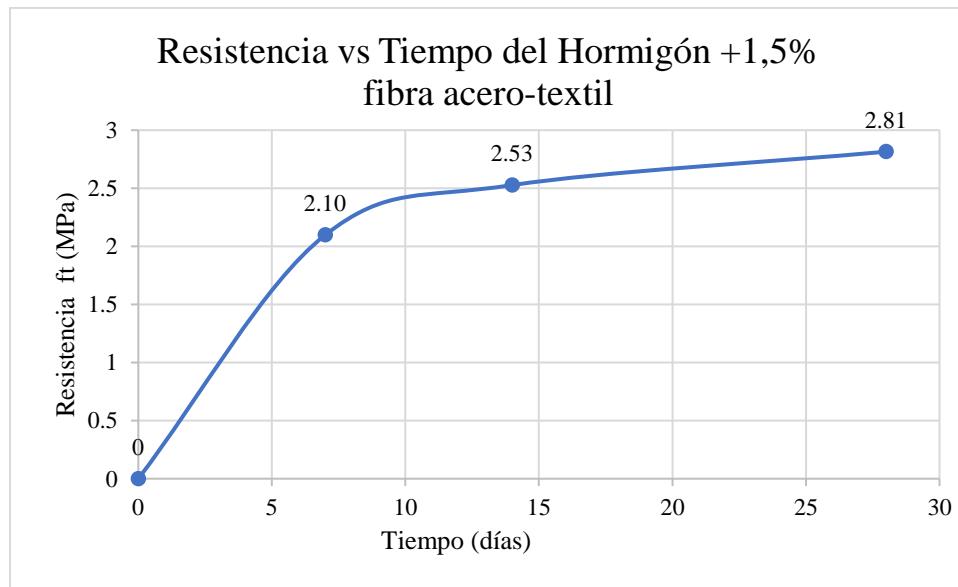
Resistencia de esfuerzo a tracción indirecta de hormigón con 1.5% de fibra acero-textil en 7, 14, 28 días.

Nº	Edad (días)	φ (cm)	h (cm)	Volumen (m³)	Peso kg	Densidad kg/m³	Densidad prom kg/m³	Sección (cm²)	Lectura (KN)	Esfuerzo a tracción indirecta (N/mm²)	Promedio de esfuerzo a tracción indirecta (N/mm²)	Proyección 28 días (N/mm²)
1.00	7.00	15.00	30.00	0.01	12.81	2,415.38	2,423.64	17,671.46	137.60	1.95	1.94	2.70
2.00	7.00	15.00	30.00	0.01	12.72	2,399.35		17,671.46	136.10	1.93		2.67
3.00	7.00	15.00	30.00	0.01	12.94	2,440.85		17,671.46	137.70	1.95		2.70
4.00	7.00	15.00	30.00	0.01	12.93	2,438.96		17,671.46	137.30	1.94		2.70
5.00	14.00	15.00	30.00	0.01	12.72	2,398.41	2,424.34	17,671.46	179.80	2.54	2.49	2.99
6.00	14.00	15.00	30.00	0.01	12.83	2,420.10		17,671.46	182.10	2.58		3.03
7.00	14.00	15.00	30.00	0.01	12.89	2,431.42		17,671.46	170.30	2.41		2.83
8.00	14.00	15.00	30.00	0.01	12.98	2,447.45		17,671.46	171.60	2.43		2.86
9.00	28.00	15.00	30.00	0.01	12.92	2,436.13	2,423.02	17,671.46	195.90	2.77	2.78	2.77
10.00	28.00	15.00	30.00	0.01	12.86	2,425.76		17,671.46	193.10	2.73		2.73
11.00	28.00	15.00	30.00	0.01	12.85	2,423.87		17,671.46	194.10	2.75		2.75
12.00	28.00	15.00	30.00	0.01	12.90	2,433.30		17,671.46	193.50	2.74		2.74
13.00	28.00	15.00	30.00	0.01	12.90	2,432.36		17,671.46	195.10	2.76		2.76
14.00	28.00	15.00	30.00	0.01	12.78	2,409.72		17,671.46	196.90	2.79		2.79
15.00	28.00	15.00	30.00	0.01	12.82	2,418.21		17,671.46	195.30	2.76		2.76
16.00	28.00	15.00	30.00	0.01	12.89	2,431.42		17,671.46	198.70	2.81		2.81
17.00	28.00	15.00	30.00	0.01	12.76	2,406.89		17,671.46	200.20	2.83		2.83
18.00	28.00	15.00	30.00	0.01	12.79	2,412.55		17,671.46	199.30	2.82		2.82

Fuente: elaboración propia

Figura 38

Evolución de la resistencia a tracción indirecta del hormigón con 1,5% de fibra acero-textil en el tiempo



Fuente: elaboración propia

Interpretación: Considerando que el hormigón generalmente alcanza entre el 99% y el 100% de su resistencia total a los 28 días, podemos utilizar la resistencia media obtenida a los 28 días (2,81Pa) como referencia para evaluar el desarrollo de la resistencia en etapas anteriores. A los 7 días, el hormigón con adición de 0,5% de fibra ha alcanzado aproximadamente el 74,53% de su resistencia final de 28 días y a los 14 días, el hormigón con adición de 0,5% de fibra ha alcanzado aproximadamente el 89,79% de su resistencia final de 28 días

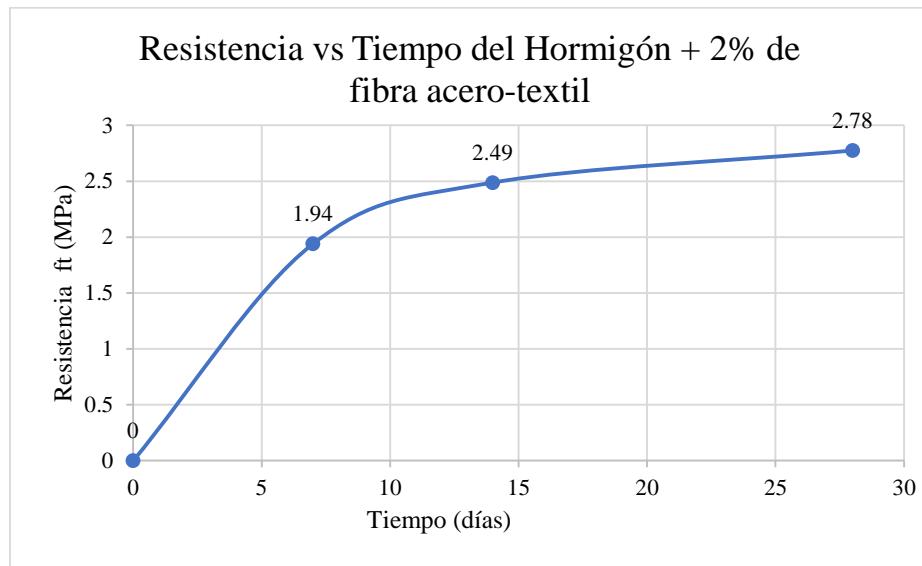
Tabla 55

Resistencia de esfuerzo a tracción indirecta de hormigón con 2% de fibra acero-textil en 7, 14, 28 días.

Nº	Edad	ø	h	Volumen	Peso	Densidad	Densidad prom	Sección	Lectura	Esfuerzo a tracción indirecta	Promedio de esfuerzo a tracción indirecta	Proyección 28 días
	(días)	(cm)	(cm)	(m³)	kg	kg/m³		kg/m³	(cm²)	(KN)	(MPa)	
1	7	15.00	30.00	0.01	12.82	2,418.21	2,414.44	17,671.46	143.80	1.98	2.10	2.75
2	7	15.00	30.00	0.01	12.84	2,421.04		17,671.46	154.90	2.13		2.96
3	7	15.00	30.00	0.01	12.79	2,411.61		17,671.46	153.80	2.12		2.94
4	7	15.00	30.00	0.01	12.76	2,406.89		17,671.46	156.60	2.16		3.00
5	14	15.00	30.00	0.01	12.93	2,438.02	2,438.02	17,671.46	183.00	2.52	2.53	2.97
6	14	15.00	30.00	0.01	12.92	2,437.07		17,671.46	182.30	2.51		2.95
7	14	15.00	30.00	0.01	12.96	2,443.68		17,671.46	183.80	2.53		2.98
8	14	15.00	30.00	0.01	12.90	2,433.30		17,671.46	184.70	2.54		2.99
9	28	15.00	30.00	0.01	12.81	2,415.38	2,410.51	17,671.46	206.90	2.85	2.81	2.85
10	28	15.00	30.00	0.01	12.78	2,410.67		17,671.46	201.60	2.78		2.78
11	28	15.00	30.00	0.01	12.72	2,398.41		17,671.46	197.80	2.73		2.73
12	28	15.00	30.00	0.01	12.82	2,417.27		17,671.46	233.90	3.22		3.22
13	28	15.00	30.00	0.01	12.73	2,400.29		17,671.46	200.30	2.76		2.76
14	28	15.00	30.00	0.01	12.85	2,422.93		17,671.46	199.30	2.75		2.75
15	28	15.00	30.00	0.01	12.77	2,408.12		17,671.46	196.60	2.71		2.71
16	28	15.00	30.00	0.01	12.73	2,400.29		17,671.46	200.80	2.77		2.77
17	28	15.00	30.00	0.01	12.87	2,426.70		17,671.46	204.00	2.81		2.81
18	28	15.00	30.00	0.01	12.75	2,405.01		17,671.46	202.00	2.78		2.78

Fuente: elaboración propia

Figura 39
Evolución de la resistencia a tracción indirecta del hormigón con 2% de fibra acero-textil en el tiempo



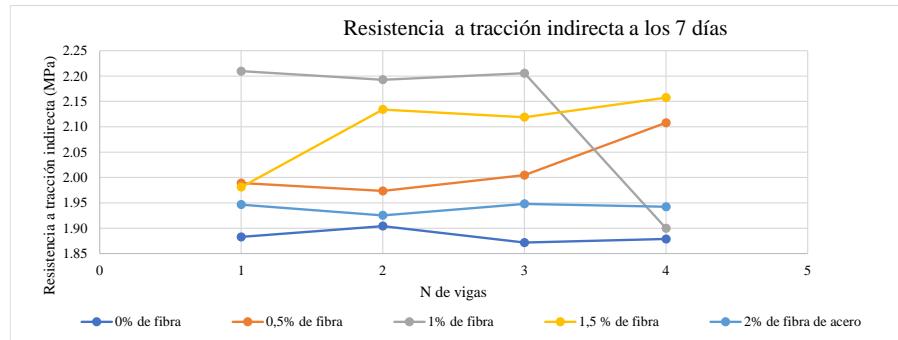
Fuente: elaboración propia

Interpretación: Considerando que el hormigón generalmente alcanza entre el 99% y el 100% de su resistencia total a los 28 días, podemos utilizar la resistencia media obtenida a los 28 días (2,78Pa) como referencia para evaluar el desarrollo de la resistencia en etapas anteriores. A los 7 días, el hormigón con adición de 0,5% de fibra ha alcanzado aproximadamente el 69,91% de su resistencia final de 28 días y a los 14 días, el hormigón con adición de 0,5% de fibra ha alcanzado aproximadamente el 89,67% de su resistencia final de 28 días

3.2.5 Comparación de la resistencia a la tracción indirecta del hormigón patrón y hormigón a distintos porcentajes de fibras a los 7, 14 y 28 días

Figura 40

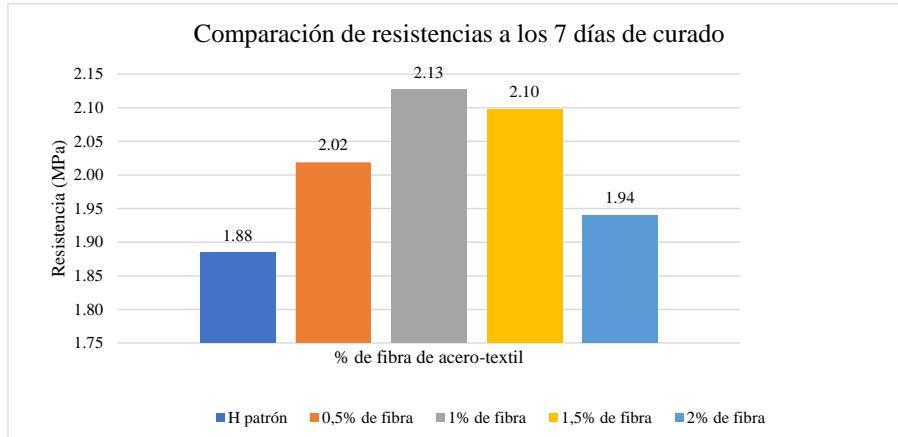
Influencia del contenido de fibras en la resistencia a la tracción indirecta del hormigón a los 7 Días



Fuente: elaboración propia

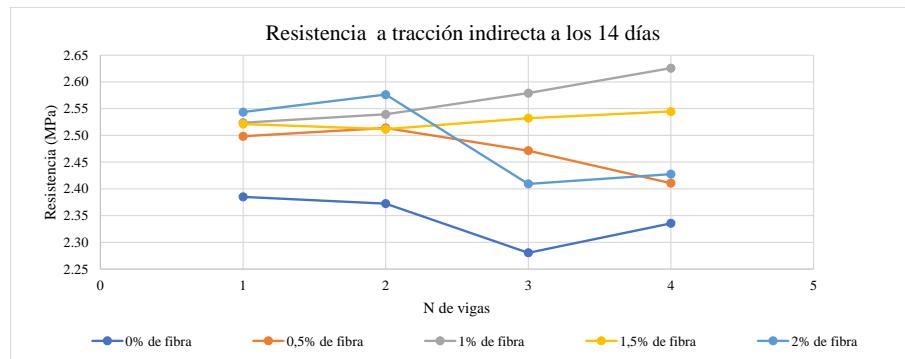
Figura 41

Comparación de resistencia a la tracción indirecta a los 7 días con distintos porcentajes de fibra



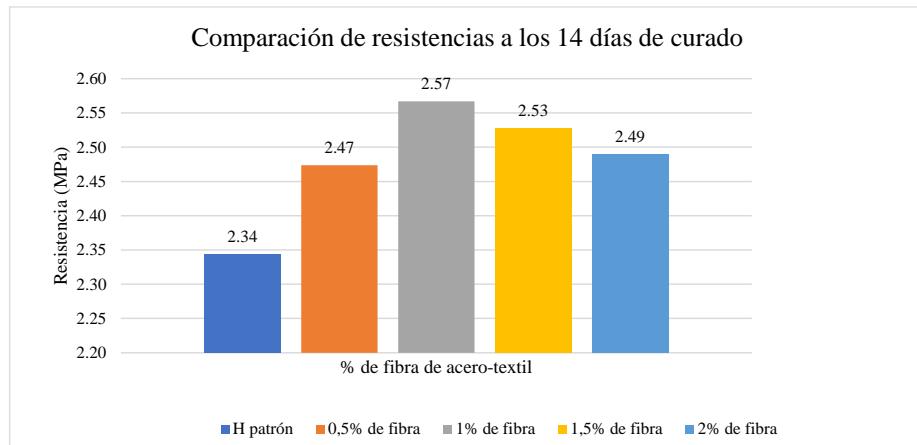
Fuente: elaboración propia

Figura 42
Influencia del contenido de fibras en la resistencia a la tracción indirecta del hormigón a los 14 días



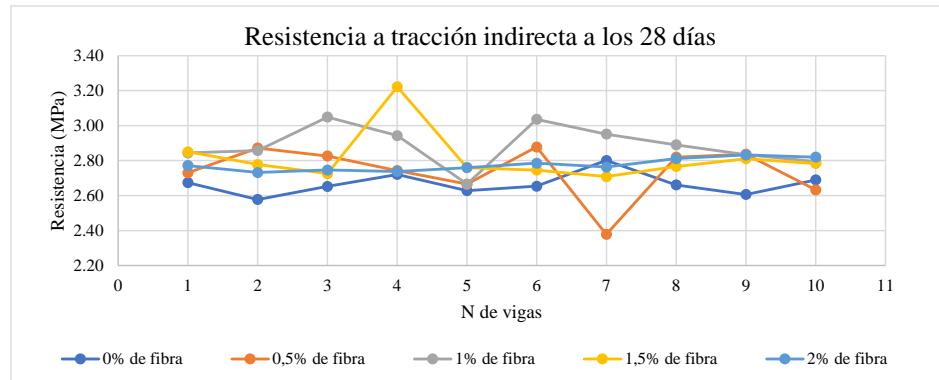
Fuente: elaboración propia

Figura 43
Comparación de resistencia a la tracción indirecta a los 14 días con distintos porcentajes de fibra



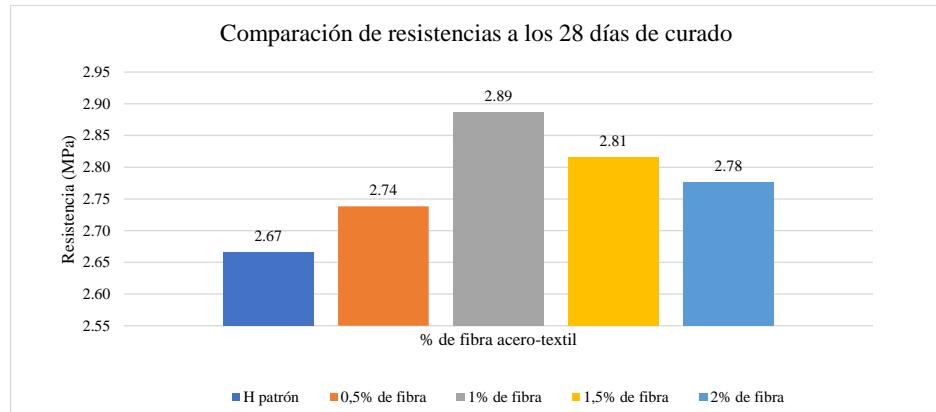
Fuente: elaboración propia

Figura 44
Influencia del contenido de fibras en la resistencia a la tracción indirecta del hormigón a los 28 días



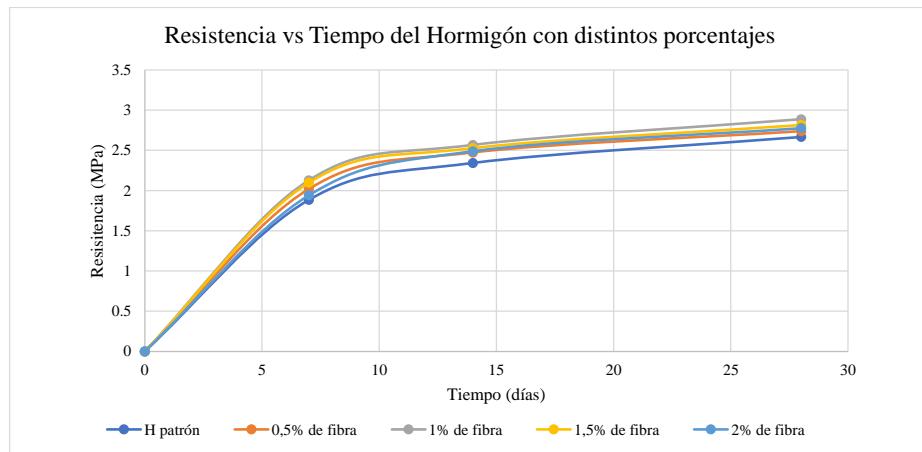
Fuente: elaboración propia

Figura 45
Comparación de resistencia a la tracción indirecta a los 28 días con distintos porcentajes de fibra



Fuente: elaboración propia

Figura 46
Comparación de las resistencias a tracción indirecta del hormigón con distintos porcentajes de acero-textil



Fuente: elaboración propia

En la figura 46 se comparan las evoluciones de la resistencia a tracción indirecta del hormigón con fibras de acero textil recicladas de neumáticos a lo largo del tiempo. Se observa que las curvas correspondientes a los hormigones con adición de fibras (0.5%, 1%, 1.5% y 2%) presentan un comportamiento superior al hormigón patrón durante la mayor parte del período de curado.

Los resultados indican que la incorporación de fibras de acero textil recicladas de neumáticos mejora consistentemente la resistencia a tracción indirecta del hormigón. El análisis sugiere que el 1% de adición de fibras representa el porcentaje óptimo para maximizar la resistencia a tracción indirecta sin comprometer la trabajabilidad de la mezcla.

Por debajo del 0.5%, la mejora es marginal, mientras que porcentajes superiores al 1.5% no aportan beneficios adicionales significativos en términos de resistencia a tracción indirecta.

Esta tendencia confirma que las fibras de acero recicladas de neumáticos son efectivas para mejorar el comportamiento a tracción del hormigón, contribuyendo tanto a la sustentabilidad como al rendimiento mecánico de la mezcla.

3.2.6 Resultados del Ensayo de compresión en probetas de hormigón para verificar un H-25

Para verificar que la mezcla base del hormigón correspondía a un H-25 (resistencia característica $f'c = 25 \text{ MPa}$), se elaboraron seis probetas cilíndricas a partir del mismo lote utilizado en los ensayos con fibras. Las probetas se ensayaron a compresión a 7, 14 y 28 días, según se muestra en la Tabla 54.

A los 28 días, se obtuvieron resistencias de 27,17 MPa y 26,98 MPa, con un promedio de 27,08 MPa, valor ligeramente superior a los 25 MPa esperados. Esto indica que la mezcla cumplió con los requisitos mínimos para clasificarse como un hormigón H-25, e incluso con un pequeño margen de seguridad.

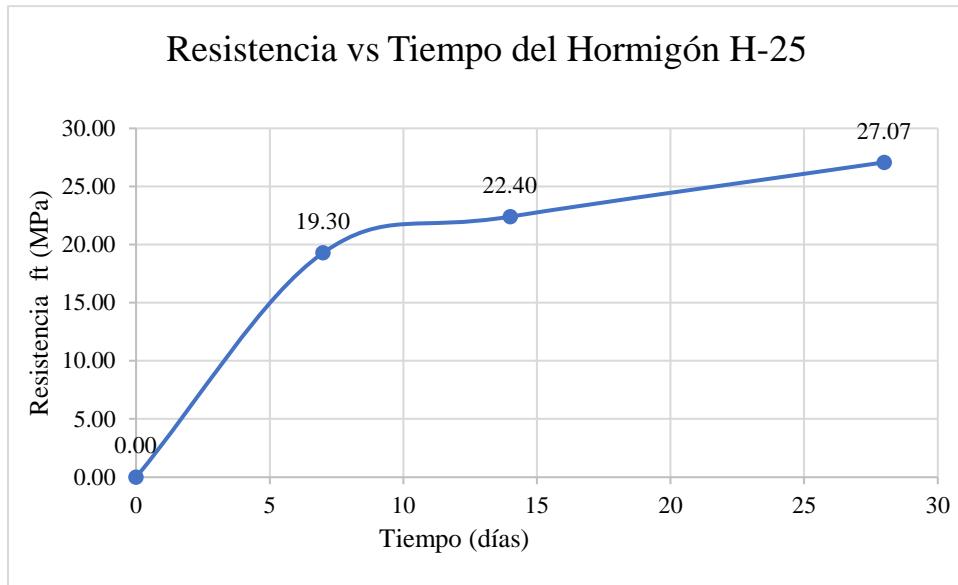
Debido a esta resistencia algo mayor a compresión, los valores obtenidos en los ensayos de tracción indirecta (compresión diametral) y flexión (tercio de tramo) del hormigón patrón (sin fibras) también resultaron ligeramente superiores a los teóricos asociados a un H-25 convencional. Esto es coherente, ya que las propiedades mecánicas del hormigón están directamente relacionadas con su resistencia a compresión.

Tabla 56
Resistencia de esfuerzo a compresión de hormigón patrón 7, 14, 28 días.

Nº	Identificación	Edad (días)	Área (mm ²)	Lectura (KN)	Carga (N)	Resist. (Mpa)	Resistencia 28d (Mpa)
1	Prob. 1	7	17671,50	324,20	324.200,00	18,35	25,47
2	Prob. 2	7	17671,50	357,80	357.800,00	20,25	28,11
3	Prob. 3	14	17671,50	384,60	384.600,00	21,76	25,60
4	Prob. 4	14	17671,50	407,20	407.200,00	23,04	27,11
5	Prob. 5	28	17671,50	480,10	480.100,00	27,17	27,17
6	Prob. 6	28	17671,50	476,80	476.800,00	26,98	26,98

Fuente: elaboración propia

Figura 47
Evolución de la resistencia a compresión del hormigón patrón en el tiempo



Fuente: elaboración propia

Interpretación: La figura 40 ilustra la evolución de la resistencia del hormigón con una dosificación objetivo de 25 MPa. a lo largo del tiempo.

A los 7 días: El hormigón alcanza una resistencia de 19.30 MPa, lo que representa el 77.2% de la resistencia requerida.

A los 14 días: La resistencia del hormigón llega a 22.40 MPa., lo que representa un 89.66% de la resistencia objetivo.

A los 28 días: El hormigón no solo cumple con la resistencia requerida, sino que la supera, alcanzando 27.07 MPa. Esto significa que, a los 28 días el hormigón ha logrado el 108.28% de la resistencia inicialmente establecida.

3.3 Contraste de hipótesis:

Al inicio de esta investigación se planteó la siguiente hipótesis:

"El hormigón con adición de fibra de acero y fibra textil reciclado de neumáticos en relación del volumen del hormigón, en diferentes porcentajes tendrá un incremento dentro de un rango de 5% a 20% de la resistencia a flexión con respecto al hormigón de control."

El objetivo es verificar si los resultados experimentales confirman o rechazan esta hipótesis.

Tabla 57
Cumplimiento de la Hipótesis por Dosificación

Dosificación	Incremento (%)	Rango hipótesis	¿Cumple?	Observación
0.5%	4.03	[5% - 20%]	✗ NO	Por debajo del límite
1.0%	8.5	[5% - 20%]	✓ SÍ	Cumple
1.5%	12.98	[5% - 20%]	✓ SÍ	Cumple (óptimo)
2.0%	4.98	[5% - 20%]	✗ NO	Por debajo del límite

Fuente: elaboración propia

Tasa de cumplimiento: 2 de 4 dosificaciones (50%) cumplen el rango predicho.

La hipótesis de investigación se considera CONFIRMADA para el rango efectivo de dosificaciones entre 1.0% y 1.5%.

- Las dosificaciones de 1.0% y 1.5% cumplen plenamente el rango predicho [5% - 20%], con incrementos de 8.50% y 12.98% respectivamente.
- Se identificó la dosificación óptima en 1.5%, que alcanza el máximo incremento de resistencia (12.98%), ubicándose en la zona central del rango predicho.
- Las dosificaciones de 0.5% y 2.0% quedaron fuera del rango por contenido insuficiente y sobredosificación respectivamente, lo que permite establecer los límites inferior y superior del rango efectivo de aplicación.
- Los resultados identifican con precisión el rango óptimo de aplicación práctica (1.0% - 1.5%), información valiosa para la implementación de esta tecnología.

Por lo tanto, se ACEPTE la hipótesis de investigación, reconociendo que su validez se concentra en el rango de dosificaciones técnica y económicamente viables (1.0% - 1.5%), y que la dosificación óptima es 1.5% con un incremento de 12.98%.

CAPITULO IV

CAPITULO IV

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

A continuación, se presentan las siguientes conclusiones, las cuales pretenden servir como referencia para futuras investigaciones y constituirse en una base técnica para profesionales de la ingeniería civil y del sector de la construcción. Su propósito es contribuir a la toma de decisiones e informar sobre la incorporación de fibras recicladas de acero-textil provenientes de neumáticos en mezclas de hormigón, con el objetivo de garantizar un buen desempeño en términos de resistencia a la flexión.

4.1.1.1 Conclusión técnica

- Los ensayos de resistencia a flexión realizados según la normativa vigente demuestran que la incorporación de fibras mejora progresivamente esta propiedad mecánica hasta alcanzar un valor máximo de **5.05 MPa** con la dosificación de **1.5%**, lo que representa un incremento del **12.98%** respecto al hormigón patrón (4.47 MPa).

Tabla 58

Resultados de resistencia a flexión del hormigón con adición de fibras recicladas de neumáticas

Dosificación	Flexión (MPa)	Mejora (%)	Evaluación
Patrón	4.47	-	Base
0.50%	4.65	+ 4.03	Baja
1%	4.85	+ 8.50	Moderada
1.50%	5.05	+ 12.98	Buena
2%	4.69	+ 4.92	Baja

Fuente: elaboración propia

- ✓ La mezcla con 0.5% de fibras mostró una mejora modesta de 4.03%, insuficiente para justificar su implementación.
- ✓ La mejora más significativa se registra en el rango de 1.0% a 1.5% de fibras, con un incremento de 0.20 MPa entre estas dosificaciones, lo que

representa una mejora adicional de 4.12% y confirma este rango como el de mayor eficiencia técnica.

- ✓ Se observó un comportamiento anómalo en la mezcla con 2.0% de fibras (4.69 MPa, +4.92%), donde la resistencia disminuyó respecto a 1.5%, evidenciando que se genera aglomeración de fibras y pérdida de cohesión en la matriz cementicia.
- ✓ Las dosificaciones de 0.5% y 2.0% presentan mejoras marginales (+4.03% y +4.92% respectivamente), similares entre sí pero significativamente inferiores a las dosificaciones intermedias, demostrando que existe un rango óptimo de dosificación para maximizar el desempeño
- La evaluación de la consistencia mediante el ensayo de asentamiento (Cono de Abrams), conforme a la Norma CBH-87, reveló una reducción progresiva de la trabajabilidad con el incremento del contenido de fibras.

Tabla 59
Ensayo de trabajabilidad (Asentamiento del Cono de Abrams)

Dosificación	Asentamiento (cm)	Pérdida (%)	Estado
Patrón	7.2	-	✓ Blanda
0.50%	6.6	- 8.33	✓ Blanda
1%	5.2	- 27.78	✓ Plástica
1.50%	4.5	- 37.50	✓ Plástica
2%	2.6	- 63.89	✗ seca

Fuente: elaboración propia

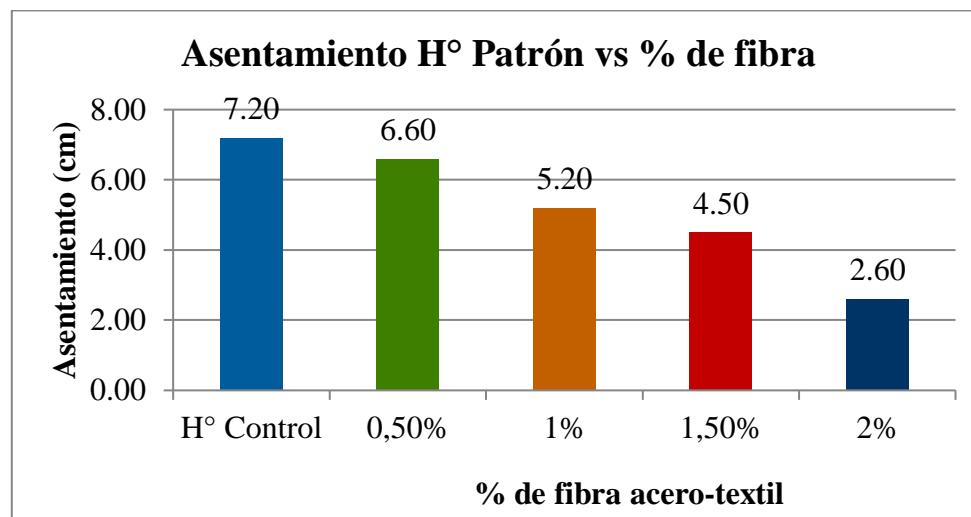
- ✓ El hormigón patrón y las dosificaciones de 0.5% y 1.0% mantienen una consistencia plástica, permitiendo colocación mediante vibrado normal sin dificultades operativas.
- ✓ La mezcla con 1.5% presenta una reducción del 37.50% en el asentamiento.
- ✓ La dosificación de 2.0% es crítica con una pérdida del 63.89% en trabajabilidad, clasificándose como consistencia seca que demanda

vibrado enérgico y cuidadoso, dificultando significativamente su colocación en obra.

- ✓ Para aplicaciones prácticas, la dosificación de 1.0% representa el límite superior para mantener trabajabilidad comparable al hormigón convencional sin necesidad de aditivos, mientras que dosificaciones mayores requieren obligatoriamente ajustes en la formulación.

Figura 48

Asentamiento del H° Patrón y H° con distintos porcentajes de fibra acero-textil



Fuente: elaboración propia

- De acuerdo con los resultados obtenidos, la dosificación óptima es del 1.5% de fibras acero-textil, ya que ofrece el mayor incremento de resistencia, con un nivel de trabajabilidad controlable mediante técnicas adecuadas de mezcla y compactación. El 1.0% se considera una alternativa más práctica y económica, especialmente en obras convencionales. En cambio, 0.5% y 2.0% no resultan viables técnica ni funcionalmente.

Tabla 60
Veredicto de Viabilidad Técnica del Hormigón Reforzado con Fibras

Dosificación	Resistencia	Trabajabilidad	Veredicto final
0.50%	Baja mejora	Excelente	POCO JUSTIFICABLE
1%	Moderada	Buena	VIABLE
1.50%	Mejor	Requiere cuidado	VIABLE CON RESERVA
2%	Contraproducente	Imposible	NO VIABLE

Fuente: elaboración propia

- ✓ **Dosificación del 0.5%:** Presenta una ligera mejora en resistencia, pero su efecto no justifica el incremento de materiales y costo.
 Su excelente trabajabilidad la hace fácil de colocar, pero al no generar un aporte estructural significativo, se considera poco justificable técnicamente.
- ✓ **Dosificación del 1.0%:** Muestra una mejora moderada en resistencia ($\approx 8.5\%$), manteniendo buena trabajabilidad sin necesidad de aditivos especiales.
 Representa un equilibrio adecuado entre desempeño mecánico y facilidad de uso, por lo que se clasifica como “viable” para aplicaciones estructurales de uso general.
- ✓ **Dosificación del 1.5%:** Es la más efectiva en términos de incremento de resistencia a flexión (+12.98%), aunque la mezcla requiere mayor control y uso de vibradores o plastificantes para evitar segregación. Pese a esa exigencia, su desempeño global la hace viable con reservas, recomendada para estructuras que demanden mayor tenacidad y durabilidad, como pavimentos o losas industriales.
- ✓ **Dosificación del 2.0%:** Muestra un comportamiento contraproducente, con pérdida de trabajabilidad y resistencia debido al exceso de fibras y formación de nidos. Esta mezcla es imposible de manejar y compactar adecuadamente, por lo que se descarta completamente para uso práctico.

4.1.1.2 Conclusión económica

El análisis de costos revela un incremento lineal del precio unitario por metro cúbico de hormigón proporcional al porcentaje de fibras incorporadas, variando desde 920.85 Bs/m³ (patrón) hasta 1,259.92 Bs/m³ (2.0% fibras).

Tabla 61
Análisis de costos por dosificación

Dosificación	Costos (Bs/m ³)	Incremento	Costo adicional
Patrón	920.85	-	-
0.50%	1,005.64	+9.21	+ 84.79
1%	1090.35	+18.41	+ 169.50
1.50%	1,175.13	+27.61	+ 254.28
2%	1,259.92	+36.82	+ 339.07

Fuente: elaboración propia

- ✓ El incremento de costo es directamente proporcional al contenido de fibras, con un promedio de ~9% por cada 0.5% de fibras adicionadas.
- ✓ Para la dosificación óptima de 1.5%, el sobrecoste del 27.61% representa una inversión adicional razonable considerando la mejora técnica obtenida (+12.98% en flexión).
- ✓ La dosificación de 2.0%, además de su pobre desempeño técnico, presenta el mayor incremento económico (36.82%), resultando en una relación costo-beneficio sumamente desfavorable.

4.1.1.3 Conclusiones costo-beneficio

- ✓ El Índice de Eficiencia Técnico-Económica, definido como la relación entre el porcentaje de mejora en resistencia a flexión y el porcentaje de incremento en costo, constituye el indicador clave para la selección de la dosificación óptima.

Tabla 62
Índice de eficiencia técnica-económica

Dosificación	Índice	Evaluación
0.50%	0.44	Ineficiente
1%	0.46	Marginal
1.50%	0.47	Mejor
2%	0.13	Pésimo

Fuente: elaboración propia

- ✓ Las dosificaciones de 0.5%, 1.0% y 1.5% presentan índices similares y relativamente estables (0.44-0.47), indicando una relación costo-beneficio consistente en este rango.
- ✓ La dosificación de 1.5% alcanza el índice máximo (0.47), confirmándose como el punto óptimo de equilibrio entre desempeño técnico e inversión económica.
- ✓ El índice de 2.0% sufre una caída dramática a 0.13, evidenciando que esta dosificación es económicamente inviable, donde se invierte 3.6 veces más dinero del justificado por la mejora técnica obtenida.

Desde una perspectiva de optimización de recursos, la dosificación de 1.5% de fibras representa la mejor inversión, maximizando el retorno técnico por cada boliviano adicional invertido.

4.1.1.4 Conclusiones prácticas

Tabla 63
Viabilidad práctica de un hormigón con fibras

ASPECTOS	0.50%	1%	1.50%	2%
Mezclado	<input checked="" type="checkbox"/> Fácil	<input checked="" type="checkbox"/> Normal	Requiere tiempo adicional	difícil
Colocado manual	<input checked="" type="checkbox"/> Fácil	<input checked="" type="checkbox"/> Normal	Laborioso	Muy difícil
Acabado superficial	<input checked="" type="checkbox"/> Bueno	<input checked="" type="checkbox"/> Aceptable	Regular	Malo
Vibración requerida	Normal	+ 20 %	+ 50 %	+ 100 %

Fuente: elaboración propia

- **Mezclado:** El proceso de mezclado se ve progresivamente afectado conforme aumenta el contenido de fibras.
 - ✓ Las dosificaciones de 0.5% y 1.0% permiten un mezclado convencional sin modificaciones significativas en los procedimientos estándar de producción, utilizando equipos tradicionales sin inconvenientes operativos.
 - ✓ La dosificación de 1.5% requiere tiempo adicional de mezclado (2-3 minutos extras) para garantizar una distribución homogénea de las fibras en toda la masa de hormigón, evitando la formación de "bolas de fibras".
 - ✓ La dosificación de 2.0% presenta dificultades severas en el mezclado debido a la alta concentración de fibras.
- **Colocación manual:** La trabajabilidad reducida derivada del incremento en el contenido de fibras impacta directamente en la facilidad de colocación manual del hormigón fresco.
 - ✓ Las mezclas con 0.5% y 1.0% de fibras mantienen características similares al hormigón convencional, permitiendo su colocación mediante métodos tradicionales (pala, carretilla) sin esfuerzo adicional significativo por parte de los operarios. El hormigón fluye adecuadamente y se distribuye sin complicaciones en encofrados y moldes.
 - ✓ La dosificación de 1.5% presenta un carácter más cohesivo y denso, requiriendo mayor esfuerzo físico durante:
 - El transporte en carretilla (mayor peso aparente)
 - El extendido con pala o rastrillo (mayor resistencia al movimiento)Esta mezcla demanda personal experimentado y mayor tiempo de ejecución, lo que incrementa los costos de mano de obra.
 - ✓ La mezcla con 2.0% es prácticamente inmanejable mediante colocación manual convencional. Su consistencia extremadamente seca y la alta presencia de fibras generan:
 - Necesidad de forzar el material con herramientas
 - Alto riesgo de segregación y formación de vacíos
 - Dificultad extrema para llenar completamente los encofrados

-Acabados superficiales deficientes con fibras expuestas

- **Acabado superficial:** La calidad del acabado superficial es un aspecto crítico en aplicaciones arquitectónicas y estructurales donde la estética y durabilidad de la superficie son prioritarias.
 - ✓ Las dosificaciones de 0.5% permiten obtener acabados de excelente calidad, con superficies lisas y uniformes mediante herramientas convencionales. La presencia de fibras es prácticamente imperceptible y no interfiere con los procesos de acabado tradicionales.
 - ✓ Con 1.0% de fibras, el acabado es aceptable para la mayoría de las aplicaciones. Se observa una ligera textura superficial y ocasionalmente algunas fibras pueden quedar expuestas durante el proceso de alisado, pero esto no compromete significativamente la calidad estética final. El uso de llanas en buen estado y técnica adecuada permite obtener resultados satisfactorios.
 - ✓ La dosificación de 1.5% genera acabados regulares, con presencia notoria de fibras superficiales que dificultan el proceso de alisado. El acabado superficial puede presentar:
 - Fibras sobresalientes
 - Textura áspera al tacto
 - Apariencia visual menos uniforme
 - Mayor dificultad para lograr superficies especulares
 - ✓ La mezcla con 2.0% produce acabados deficientes e inaceptables para aplicaciones donde la superficie queda expuesta. Se caracteriza por:
 - Alta concentración de fibras visibles en superficie
 - Imposibilidad de lograr acabados lisos
 - Superficie extremadamente rugosa y desigual
 - Fibras largas sobresaliendo permanentemente
 - Apariencia estética pobre
- **Vibración requerida:** La energía de compactación necesaria para eliminar vacíos y lograr una masa homogénea y densa incrementa proporcionalmente

con el contenido de fibras, debido a la mayor cohesión interna y resistencia al flujo del hormigón fresco.

- ✓ Para la dosificación de 0.5%, el tiempo de vibración es prácticamente idéntico al hormigón convencional.
- ✓ La mezcla con 1.0% requiere 20% más de tiempo de vibración. Esto implica: Incrementar la duración de cada punto de vibración de 10-15 segundos (normal) a 12-18 segundos.

Si bien este incremento es manejable, debe considerarse en la planificación de tiempos de ejecución y puede requerir equipos vibradores adicionales en proyectos de gran volumen.

- ✓ Para 1.5%, el incremento del 50% en vibración representa un cambio operativo significativo:
 - Tiempo por punto: 15-22 segundos (casi el doble del normal)
 - Necesidad de vibradores de mayor potencia (alta frecuencia y amplitud)
 - Mayor desgaste de equipos
 - Incremento en costos de energía y mantenimiento
 - Fatiga del personal operador (se recomienda rotación frecuente)
- ✓ La dosificación de 2.0% demanda 100% más de vibración (el doble del tiempo normal), lo cual es:
 - Operativamente complejo en obras de gran escala
 - Económicamente costoso (tiempo, energía, desgaste de equipos)
 - Técnicamente riesgoso (alta probabilidad de vibración insuficiente en algunas zonas)

Incluso con vibración prolongada, es difícil garantizar compactación completa debido a la extrema cohesión del material. Frecuentemente quedan vacíos internos (cangrejeras) que comprometen la calidad estructural.

4.1.2 Recomendaciones

Estas recomendaciones se fundamentan en el análisis integral de los tres pilares evaluados: técnica, económica y práctica operativa. A continuación se detallan las recomendaciones específicas por cada aspecto y las condiciones necesarias para su implementación exitosa.

4.1.2.1 Recomendaciones técnicas

Resistencia a flexión

- Implementar la dosificación de 1.5% como estándar para proyectos que requieran máximo desempeño a flexión (+12.98% respecto al patrón).
- Descartar completamente la dosificación de 2.0% debido al fenómeno de sobredosificación detectado (resistencia inferior a 1.5%).
- Considerar 1.0% como alternativa conservadora para proyectos con requisitos moderados de resistencia y restricciones operativas (+8.50% mejora).

Trabajabilidad

- Incluir en el diseño de mezcla el uso obligatorio de aditivos superplastificantes para dosificaciones $\geq 1.5\%$, para mantener consistencia plástica según CBH-87.
- El mezclado del hormigón con fibras requiere mayor tiempo y cuidado que el hormigón convencional. Las dosificaciones de 0.5% y 1.0% permiten mezclado convencional con equipos estándar, mientras que 1.5% requiere tiempo adicional (2-3 minutos extras) y la dosificación de 2.0% presenta dificultades severas de aglomeración.
- Realizar cono de Abrams cada camión mixer.

Capacitación y personal

- Implementar programa de capacitación obligatorio para todo el personal involucrado antes del inicio de obra:
 - ✓ Maestro de obra
 - ✓ Albañiles especializados
 - ✓ Ayudantes
 - ✓ Operadores de equipo

4.1.2.2 Recomendaciones económicas

- Se propone realizar una negociación estratégica con los proveedores de fibras, priorizando la compra por volumen para acceder a descuentos del 5 al 10% en pedidos iguales o superiores a 500 kg. Además, se recomienda comparar al menos tres proveedores, considerando tanto los aspectos técnicos como los económicos, evitando basar la decisión únicamente en el precio más bajo.
- La solución más efectiva es impulsar el desarrollo de empresas recicadoras de neumáticos en Tarija. Esto eliminaría el alto costo logístico de transporte (implícito en los 6 Bs/kg) y aseguraría un suministro de fibra con un costo significativamente menor.
- Se recomienda implementar capacitaciones específicas al personal de obra para evitar **remezclas** innecesarias y pérdidas de material durante la producción y colocación del hormigón.
- Se debe incluir en el presupuesto los costos ocultos que suelen omitirse, tales como la capacitación del personal, que puede representar entre 2% y 3% del costo total, los ensayos de laboratorio necesarios para la validación previa y el control de calidad del material, la supervisión técnica especializada durante las etapas de producción y colocación, así como la disponibilidad de equipos de respaldo (como vibradores y herramientas) que garanticen la continuidad y eficiencia del proceso constructivo.
- Se recomienda invertir en la dosificación del 1.5% cuando la prioridad es la máxima vida útil y el menor costo de ciclo de vida. Esta dosificación es obligatoria para proyectos donde la vida útil proyectada es superior a cinco años y los costos de mantenimiento futuro son altos o el tiempo de inactividad por reparaciones resulta costoso (ejemplo: pavimentos de alto tráfico). La inversión inicial mayor se justifica por la alta durabilidad y la resistencia crítica a la fisuración que garantiza el desempeño a largo plazo.

4.1.2.3 Recomendaciones prácticas

MEZCLADO

- Para cualquier aplicación de hormigón que incorpore fibras mayores a 1.5% (especialmente las recicladas, que son propensas a aglomerarse), se recomienda seguir su secuencia mostrada en la Tabla 65. El tiempo total de mezclado recomendado para dosificaciones $\geq 1.5\%$ es de 7-8 minutos (vs. 4-5 minutos del hormigón normal).

Tabla 64

Secuencia estándar de mezclado para hormigón con fibras con porcentajes mayores a 1.5%

ETAPA	MATERIAL	TIEMPO DE INCORPORACIÓN	INSTRUCCIÓN CLAVE
1	Agregados secos (grava -arena)	30 seg	Mezcladora en marcha
2	Cemento	30 seg	Mezclar bien para iniciar la homogenización
3	70% del agua	1min	Humedecer la mezcla base antes de las fibras
4	Fibras recicladas	2min	Añadir gradualmente y uniforme. NUNCA todas de golpe
5	30% de agua restante	1min	
6	Mezclado final	2-3 min adicionales	Asegurar la homogeneidad
Tiempo total		7-8 min	Mínimo para asegurar la calidad

Fuente: elaboración propia

VIBRADO

- Para identificar un vibrado adecuado del hormigón, se deben observar señales como una superficie brillante con una ligera capa de lechada, la ausencia de burbujas de aire emergiendo y un ligero hundimiento del agregado grueso, que indica una correcta compactación. Es importante no sobre-vibrar, ya que el exceso de vibración produce segregación y acumulación excesiva de lechada, por lo que ante estos signos se debe detener inmediatamente el proceso.

ACABADO SUPERFICIAL:

- El tratamiento de las fibras superficiales es un aspecto crítico especialmente para contenidos mayores de 1.5%, ya que influye directamente en el acabado final del hormigón. La Opción A (recomendada para acabados vistos) consiste en aplicar una capa de mortero fino sin fibras de 10 a 15 mm de espesor inmediatamente después del fratachado inicial, logrando una superficie uniforme y estética. En cambio, la Opción B implica aceptar la textura con fibras visibles, siendo adecuada para pavimentos industriales o superficies donde el aspecto estético no es prioritario.