

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

1 CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El crecimiento exponencial de la población, así como el desarrollo urbano de la ciudad, ha generado un incremento progresivo de volúmenes de residuos que se generan en la construcción, generando una contaminación medioambiental. Estos residuos como ser residuos de hormigón, ladrillo, madera, descartes de fierro, alambres, clavos, entre otros, no son tratados en nuestra región, en esa razón se parte de la idea de que se pueda reciclar y acopiar en la misma obra de construcción algunos de estos residuos, más propiamente hablando de clavos de acero, que estos vienen del uso en puntales de madera (aun siendo muy usado en nuestra región), en el encofrado Fenólico y otros usos, y estos clavos puedan ser incorporados al hormigón y se elabore así un Hormigón Reforzado con este tipo de residuo como fibra de acero.

1.1.1 Formulación del problema

En el trabajo de investigación se planteó lo siguiente:

¿Los clavos de acero reciclados adicionados como fibras de acero al hormigón aumentan la resistencia a la flexión del hormigón?

1.1.2 Sistematización del problema

¿La geometría de los clavos reciclados usando como fibras de acero va tener influencia en la adherencia con el hormigón bajo esfuerzos de flexión?

1.2 Objetivos

1.2.1 General

- Evaluar el comportamiento de la resistencia a flexión de un hormigón reforzado con clavos de acero reciclados, aplicando el método de ensayo normalizado de la ASTM C 78 – 02.

1.2.2 Específicos

- Comparar la resistencia a flexión entre un hormigón patrón (sin adición de clavos) y un hormigón reforzado con clavos, en los porcentajes de adición de clavos de 9%, 12% y 15% en función del peso del cemento.

- Medir y comparar la consistencia del hormigón patrón (sin adición de clavos) y del hormigón reforzado con clavos, mediante el método de cono de Abrams al incorporar porcentajes de adición de clavos, de 9%, 12% y 15% en función del peso del cemento.
- Analizar y comparar las características geométricas, mecánicas y químicas de los clavos de acero, respecto de las fibras de acero.
- Implementar una metodología para eliminar el óxido de los clavos, de manera que estos puedan utilizarse satisfactoriamente en la investigación.

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación teórica

Se sabe que las fibras actúan como refuerzo dentro de la matriz del hormigón incrementando las propiedades mecánicas del mismo, sin embargo el incremento de la resistencia a flexión al adicionar fibras de acero al hormigón es mayor que el de la resistencia a compresión y tracción, esto se debe al comportamiento dúctil de las Fibras de Acero en la zona fisurada por tracción desarrollando resistencias residuales, es decir; tras la fisuración presente menor ancho de fisuras, otorgando ductilidad al hormigón.

Conociendo que las fibras de acero proporcionan un mejor desempeño de la propiedad mecánica a flexión del hormigón, se pretende evaluar esta propiedad, incorporando clavos de acero reciclados, ya que tanto el clavo de acero como las fibras de acero, son de material de acero de bajo carbono.

Una de las aportaciones respecto al tema de investigación, realizado por Juárez Daniel en su trabajo "Evaluación de propiedades mecánicas del concreto $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con la adición de clavos reciclados de 3" y 4"', en el cual concluye que con la adición de 8%, 10% y 12% de porcentaje de clavos del peso del cemento, utilizando además un aditivo acelerante Sika 3, se lograban mayores resistencias a flexión del hormigón que es de nuestro interés destacar. Por esta razón, para la presente investigación se adicionarán clavos reciclados de 2 ½", en los porcentajes de 9%, 12% y 15% en función del peso del cemento, esto permitirá evaluar el rango más completo de proporciones y sin el uso algún aditivo de por medio.

1.3.2 Justificación metodológica

Tradicionalmente se utiliza el ensayo de vigas de hormigón prismáticas sometidas a flexión para caracterizar su resistencia y el comportamiento en el régimen post fisuración del Hormigón Reforzado con Fibras (HRF). Es así que estará el trabajo de investigación en base a la metodología de ensayo de la ASTM C 78 – 02 y para la dosificación del hormigón se utilizará el método ACI 211.1.

1.3.3 Justificación social

Esta investigación busca brindar una certeza en cuanto al beneficio de su aplicación, en la resistencia a flexión del hormigón, incorporando clavos de acero reciclado como fibra de acero, y por esa razón fomentar a que se empiece separar y acopiar en todas y cada una de las obras de construcción los clavos de acero, coordinando con empresas constructoras, y así tenerlo a disposición cuando se lo requiera para conformar este tipo de hormigón reforzado. Y de cierto modo reducir la contaminación que este material genera

1.4 Alcance

El presente trabajo de investigación es necesario realizarlo para recabar información primaria acerca de los clavos de acero reciclados, sus características geométricas, mecánicas y químicas, y poder compararlas y validarlas con la de las fibras de acero, para poder adicionarlas al hormigón, conformando así un hormigón reforzado con este tipo de material reciclado y poder evaluar la resistencia a flexión del mismo.

Los cálculos que se realizarán con la ecuación del módulo de ruptura, que se indica en la ASTM C 78 - 02.

1.5 Hipótesis

El hormigón con incorporación de clavos reciclados en diferentes porcentajes de 9%, 12% y 15% de adición en función del peso del cemento, mejora la resistencia a flexión del hormigón.

La contrastación de la Hipótesis se realizará mediante ensayos de laboratorio con vigas estandarizadas.

1.6 Variables

1.6.1 Variable dependiente

Resistencia a flexión del hormigón.

1.6.2 Variable independiente

Los clavos de acero reciclados como adición en el hormigón.

En los distintos porcentajes de clavos.

- 9% de adición de clavos reciclados, en función del peso del cemento.
- 12% de adición de clavos reciclados, en función del peso del cemento.
- 15% de adición de clavos reciclados, en función del peso del cemento.

CAPÍTULO II
FUNDAMENTO TEÓRICO

2 CAPÍTULO II FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Investigaciones precedentes

Se ha abordado trabajos relevantes a esta investigación, con la finalidad de tener un conocimiento más amplio del presente trabajo a desarrollar se mencionan resúmenes a continuación.

- **Juárez Victorio Daniel Alexfré “Evaluación de propiedades mecánicas del concreto $f'c = 210\text{kg/cm}^2$ con la adición de clavos reciclados, Cusco 2021”.**

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar en qué medida la adición de clavos reciclados influye en las propiedades mecánicas del concreto. La población fue la producción de concreto $f'c 210 \text{ kg/cm}^2$ con clavos reciclados en la ciudad del Cusco, con dosificaciones de clavos de 0% 8% 10% y 12% y se consideró como muestra un total de 96 probetas, 32 briquetas para las pruebas a compresión y módulo de Young simultáneamente, 32 briquetas para pruebas a tracción y 32 viguetas para las pruebas de flexión, a su vez, subdividiendo cada 32 briquetas de manera que sea 4 para determinar un promedio de resistencia patrón, 4 para la dosificación de 8% de clavos, 4 para 10% de clavos y 4 para 12% de clavos, los porcentajes se encuentran en función al concreto patrón, el muestreo se realizó siguiendo los lineamientos de la norma E 060 para la obtención de resultados de ensayo como mínimo sin embargo la técnica de muestreo fue no probabilística y el número de ensayos se realizó a conveniencia del investigador, los principales resultados fueron, las mejores dosificaciones fueron las de 10% de clavos para la resistencia a la compresión y módulo de Young mostrando una mejoría de 6.34% y 3.12% respecto al concreto patrón, respectivamente y 12% de clavos para tracción y flexión que mostraron una mejora del 16.61% y 49.88% de la resistencia del concreto patrón respectivamente, esto para las muestras a 14 días simulando 28 días con la ayuda de aditivo acelerante Sika 3, siendo que las dosificaciones óptimas deberían de variar en función a estas características.

- **Sumon Miah, Mehede Amin, Kawser Ahmed Roni, Mostakim Ali (2019)**

Universidad de Bangladesh. Estudio Experimental de Concreto Reforzado con Fibras de Acero para Grado M-40

El objetivo de la investigación fue observar el cambio de la resistencia a la compresión del concreto con la incorporación de clavos de acero de 12.7 mm de longitud, además de comparar la diferencia de costos entre el concreto con y sin la incorporación de clavos, la metodología usada fue comparar la resistencia a la compresión siguiendo los parámetros de la ASTM C 39 adicionando clavos en porcentajes de 1, 2, 3, 4, 5% del peso total de la mezcla, para una mezcla de concreto de 1:1.5:3 a los 3, 7, 14 y 28 días, los resultados fueron: el concreto de prueba sin incorporación de clavos tiene una resistencia de 2237 psi a los 3 días, de 2598 psi a los 7 días, de 2935 psi a los 14 días, de 3830 psi a los 28 días; el concreto con una incorporación de clavos del 1% del peso total tiene una resistencia de 2300 psi a los 3 días, de 2470 psi a los 7 días, de 3400 psi a los 14 días, de 3937 psi a los 28 días; el concreto con una incorporación de clavos del 2% del peso total tiene una resistencia de 2350 psi a los 3 días, de 2649 psi a los 7 días, de 3669 psi a los 14 días, de 4206 psi a los 28 días; el concreto con una incorporación de clavos del 3 % del peso total tiene una resistencia de 2550 psi a los 3 días, de 2775 psi a los 7 días, de 3848 psi a los 14 días, de 4385 psi a los 28 días; el concreto con una incorporación de clavos del 4% del peso total tiene una resistencia de 2700 psi a los 3 días, de 3043 psi a los 7 días, de 4206 psi a los 14 días, de 4600 psi a los 28 días; el concreto con una incorporación de clavos del 5% del peso total tiene una resistencia de 2900 psi a los 3 días, de 3222 psi a los 7 días, de 4421 psi a los 14 días, de 4750 psi a los 28 días. Las conclusiones fueron que la resistencia a la compresión del concreto mejora en un 24% mientras que el costo solo incrementa en un 0.5%, La resistencia del concreto máxima alcanzada en la investigación fue de 4750 psi con el máximo porcentaje de clavos de acero usando un 5%.

- **Noe Arriola Valencia, Oscar Socoalaya Montalvo; Asesor Edson Salas Fortón,**

“Análisis y evaluación del revenimiento y parámetros resistentes a compresión del concreto adicionado con clavos de acero tipo grapas tridimensionales en la Universidad Andina del Cusco”.

Se utiliza clavos de carpintero 2 ½” sin cabeza doblado de forma manual de manera que tenga la orientación en 3 dimensiones al que denominaron clavo de acero tipo grapa tridimensional, luego se realizó la adición de estos clavos en mezcla del concreto a diferentes porcentajes para poder evaluar si incrementa la resistencia a compresión del concreto con respecto a un concreto patrón, se utilizaron concretos patrón 1, patrón 2, patrón 3 a diferentes resistencias de diseño como son 140 Kg/cm², 175 Kg/cm², 210 Kg/cm² respectivamente, para luego ser adicionados con diferentes porcentajes de clavos de acero de tipo grapa tridimensional hasta encontrar el valor máximo de resistencia a la compresión.

Concluyó: Se logró determinar que el porcentaje de adición del 1.5% es el más óptimo encontrado ya que nos dan las resistencias a compresión más altas que en los tres casos de estudio para los concretos patrón 1, patrón 2 y patrón 3.

Se verificó que al seguir aumentando el porcentaje de adición de clavos que a partir del 1.5% la resistencia a la compresión disminuye debido a que se empobrece la pasta del concreto como también no hay una buena distribución de los clavos de acero lo que implica que se entrelacen entre ellos, lo que forma zonas más rígidas y zonas más frágiles por donde falla el concreto.

- **Bach. Kevin Sotomayor Apaza “Análisis de la variabilidad de la resistencia a la**

- **tracción de un concreto $f'c= 210 \text{ kg-f/cm}^2$ adicionado con clavos de acero tipo grapas”**

En la presente investigación se analizó experimentalmente el comportamiento de la resistencia a la tracción del concreto con adición de clavos tipo grapas. En la etapa de selección, se tomó diferentes porcentajes de adición de clavos tipo grapas para la fabricación de las muestras experimentales, donde la variación del concreto está en los porcentajes de adición, que varían de 0%, 1%, 3% y 6% por metro cúbico. En la investigación se fabricaron 96 testigos de concreto con agregados de las canteras de Vicho y Cunyac, para formar las briquetas de concreto adicionadas con clavos tipo grapas. Esta alternativa se propuso con la finalidad de dar mayor resistencia a la tracción del concreto, la resistencia a la tracción según la norma es de 8% a 15% la resistencia a la compresión, en los cuales se vio que con una adición de 1%, 3% y 6% se alcanzaron resistencias a la tracción de 33.14, 33.91 y 33.28 kg/cm^2 superiores a la resistencia del concreto patrón, donde el reforzamiento con los clavos tipo grapas adicionados en el concreto tradicional lograron un incremento de 15.61% con respecto al concreto patrón. Los ensayos realizados durante todo el procedimiento que se basan en las normas técnicas peruanas, tienden al incremento de la resistencia a la tracción y compresión del concreto. Se evaluó también los revenimientos de las mezclas con los diferentes porcentajes de adición de clavos tipo grapas, donde varía el revenimiento de 2.03 a 1.01 pulgadas según el porcentaje de adición, el incremento de los clavos tipo grapas en la mezcla de concreto reduce la consistencia de la misma.

2.2 El Hormigón

El hormigón como material de construcción ha estado presente en multitud de estructuras y es el más utilizado a nivel mundial debido a su trabajabilidad, durabilidad, resistencia y facilidad para conseguir sus componentes, desde los albores de la historia del Imperio Romano hasta nuestros días el hormigón ha ido evolucionando desde su puesta en obra hasta los ensayos que se realizan sobre el mismo para poder controlar su calidad, sus propiedades físicas, químicas y mecánicas para poder resistir los esfuerzos que se puedan presentar (Cordero, Maqueda, & Ruiz Abrio, 2012).

Los principales componentes son:

- Cemento Portland: Ocupa entre el 7% y 15% del volumen de la mezcla y tiene las propiedades de adherencia y cohesión.
- Agregados: Son materiales inertes, naturales o artificiales, de forma granular clasificados según el tamaño de sus partículas en Agregados Finos (Arenas) y Agregados Gruesos (Gravas), ocupando del 60% al 80% del volumen.
- Agua: Por medio de reacciones químicas complejas hidrata al Cemento Portland para que este desarrolle sus propiedades aglutinantes.
- Aire: El aire atrapado en la mezcla representa del 1 al 3%.
- Aditivos: Se utilizan para modificar las propiedades del concreto de manera que lo hagan más adecuado para determinadas condiciones, estos pueden ser reductores de agua, retardantes o acelerantes, incorporadores de aire.

El hormigón presenta una diversificación dependiendo del uso y las especificaciones a los cual se quieran llegar, teniéndose a grandes rasgos los Concretos Convencionales y Especiales. El hormigón en su primera fase de elaboración se denomina hormigón fresco pues se encuentra en estado líquido, aunque en el mismo instante en que el cemento toma contacto con el agua se inicia el proceso químico de hidratación del cemento el que en su primera fase se caracteriza por el cambio paulatino a estado sólido (Díaz, 2005).

2.2.1 Cementos Portland

Son los fabricados a base de clinker Portland y, en su caso, otros de los componentes principales y/o adicionales definidos en esta norma NB 011, en proporciones distintas según se establece en las correspondientes definiciones particulares de cada tipo incluidas (Norma Boliviana NB 011).

Tabla 2.1 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

2.2.1.1 Clasificación

De acuerdo a Sánchez, (2009) la Norma Boliviana NB-011 los cementos portland se clasifican en los siguientes:

- Cemento portland, **Tipo I**
- Cemento portland con puzolana, **Tipo IP**
- Cemento portland con filler calizo, **Tipo IF**
- Cemento con puzolana, **Tipo P**

2.2.1.1.1 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 en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos (Condori, 2018).

2.2.1.1.2 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 el regulador ni el fraguado (que deberá añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventuales aditivos (Condori, 2018).

2.2.1.1.3 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 (Condori, 2018).

Por su parte, la ASTM C 150 establece diferentes tipos de cemento, de acuerdo a los usos y necesidades del mercado de la construcción, se especifican algunos:

Tipo I.- Este tipo de cemento es de uso general, y se emplea cuando no se requiere de propiedades y características especiales que lo protejan del ataque de factores agresivos como sulfatos, cloruros y temperaturas originadas por calor de hidratación. Entre los usos donde se emplea este tipo de cemento están: pisos, pavimentos, edificios, estructuras, elementos prefabricados (Cabezas, 2018).

Tipo II.- El cemento Portland tipo II se utiliza cuando es necesario la protección contra el ataque moderado de sulfatos, como por ejemplo en las tuberías de drenaje, siempre y cuando

las concentraciones de sulfatos sean ligeramente superiores a lo normal, pero sin llegar a ser severas (En caso de presentarse concentraciones mayores se recomienda el uso de cemento Tipo V, el cual es altamente resistente al ataque de los sulfatos). Genera normalmente menos calor que el cemento tipo I, y este requisito de moderado calor de hidratación puede especificarse a opción del comprador. En casos donde se especifican límites máximos para el calor de hidratación, puede emplearse en obras de gran volumen y particularmente en climas cálidos, en aplicaciones como muros de contención, pilas, presas, etc. La Norma ASTM C 150 establece como requisito opcional un máximo de 70 cal/g a siete días para este tipo de cemento (Cabezas, 2018).

Tipo III.- Este tipo de cemento desarrolla altas resistencias a edades tempranas, a 3 y 7 días. Esta propiedad se obtiene al molerse el cemento más finamente durante el proceso de molienda. Su utilización se debe a necesidades específicas de la construcción, cuando es necesario retirar cimbras lo más pronto posible o cuando por requerimientos particulares, una obra tiene que ponerse en servicio muy rápidamente, como en el caso de carreteras y autopistas (Cabezas, 2018).

Tipo IV.- El cemento Portland tipo IV se utiliza cuando por necesidades de la obra, se requiere que el calor generado por la hidratación sea mantenido a un mínimo. El desarrollo de resistencias de este tipo de cemento es muy lento en comparación con los otros tipos de cemento. Los usos y aplicaciones del cemento tipo IV están dirigidos a obras con estructuras de tipo masivo, como por ejemplo grandes presas (Cabezas, 2018).

2.2.1.2 Composición química del cemento

Las materias primas usadas en la fabricación del cemento Portland llegan a interactuar en un horno hasta alcanzar un estado de equilibrio químico para formar una serie de compuestos, cuyas variaciones relativas determinan los diferentes tipos de cemento portland (Sánchez, 2009).

Tabla 2.2 Compuestos del cemento Portland

Compuesto	Fórmula Química	Abreviatura Usada
Silicato tricálcico	3 Ca O Si O_2	$\text{C}_3 \text{ S}$
Silicato dicálcico	2 Ca O Si_2	$\text{C}_2 \text{ S}$
Aluminato tricálcico	$2 \text{ Ca O Al}_2 \text{ O}_3$	$\text{C}_3 \text{ A}$
Ferro Aluminato tetracálcico	$2 \text{ Ca O Al O}_3 \text{ Fe}_2 \text{ O}_3$	$\text{C}_4 \text{ a F}$

Fuente: Caracterización de agregados del río Alama y su comportamiento en hormigones de tipo A y tipo C. Sánchez Luis A.

Los compuestos $\text{C}_3 \text{ S}$ y $\text{C}_2 \text{ S}$ forman del 70 % al 80% del cemento portland son los más estables y los que más contribuyen a la resistencia del cemento (Díaz, 2005).

El $\text{C}_3 \text{ S}$ se hidrata más rápidamente que el $\text{C}_2 \text{ S}$ y por lo tanto contribuyen al tiempo de fraguado y a la resistencia inicial. Su acción hidratadora está comprendida entre 24 horas y los 7 días, llegando a provocar el endurecimiento normal de la pasta de cemento y su elevada resistencia al séptimo día (Díaz, 2005).

La contribución de la resistencia del $\text{C}_2 \text{ S}$ toma lugar muy lentamente; su acción endurecedora está comprendida entre los 7 y 28 días y pueden continuar por encima de un año (Díaz, 2005).

El $\text{C}_3 \text{ A}$ se hidrata rápidamente y genera mucho calor solamente contribuye a la resistencia las 24 horas y es el menos estable de los componentes del cemento. Además, se le da al concreto propiedades indeseables, tales como cambios volumétricos y baja resistencia a los sulfatos (Díaz, 2005).

2.2.1.3 Características físicas y mecánicas del cemento portland

Las características físicas y mecánicas más importantes son: finura de molido, peso específico y resistencia a compresión

2.2.1.3.1 Finura de molido

Es una característica íntimamente ligada al valor hidráulico del cemento, ya que influye decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar durante el fraguado y el primer endurecimiento. Si los granos fuesen muy gruesos, su rendimiento sería muy pequeño, Al quedar en su interior un núcleo prácticamente inerte; por el contrario, si el

cemento posee una finura excesiva, su retracción y calor de fraguado serían muy altos, lo que en general resulta perjudicial (Sánchez, 2009).

2.2.1.3.2 Peso específico

El peso específico es la relación entre la muestra del cemento y el volumen absoluto; su valor debe estar entre 3,10 a 3,15 gr/cm³. El valor del peso específico no indica la calidad de un cemento, sino que su valor es usado para el diseño de la mezcla. Con el calor del peso específico se pueden encontrar otras características del hormigón (Sánchez, 2009).

El peso específico real varía muy poco de unos cementos a otros y la limitación establecida por algunas normas (igual o superior a 3 gr/cm³) se cumple prácticamente siempre.

2.2.1.3.3 Resistencia a compresión

Es una de las propiedades más importantes del cemento en su estado endurecido en cuanto a los requisitos estructurales. Aunque las resistencias deberían ser medidas en pruebas sobre la pasta de cemento puro, esta no se hace debido a la dificultad que tiene al ser modelada dando origen a una gran variación en los resultados (Sánchez, 2009).

2.3 Agregado grueso

Estará formado por roca o grava triturada obtenida de las fuentes previamente seleccionadas y analizadas en laboratorio para certificar su calidad. El tamaño mínimo será de 4,5 mm, el agregado grueso debe ser duro, resistente, limpio y sin recubrimiento de materiales extraños o de polvo los cuales, en caso de presentarse, deberán ser eliminados mediante un procedimiento adecuado, como lo es por lavado. La forma de las partículas más pequeñas del agregado grueso de roca o grava triturada deberá ser generalmente cúbicas, estar razonablemente libre de partículas delgadas, planas o alargadas en todos los tamaños (Díaz, 2005).

El material que consta de grava, grava triturada, piedra triturada o una mezcla de éstas, siempre y cuando cumplan con los requisitos establecidos en la Norma ASTM C-33. Teniendo en cuenta que el hormigón es una piedra artificial, el agregado grueso es la materia prima para fabricar el hormigón. En consecuencia, se debe usar la mayor cantidad posible y

del tamaño mayor, teniendo en cuenta los requisitos de colocación y resistencia (Cabezas, 2018).

Algunas características que debe tener, son algunas mencionadas a continuación (Cabezas, 2018):

- Deberán estar libres de escamas, tierra, polvo, limo, humus, incrustaciones superficiales, materia orgánica, sales.
- Evitar el uso de agregados planos o alargados, porque además de producir bajas masas unitarias y baja resistencia mecánica, tienen tendencia a colocarse horizontalmente formándose bajo su superficie bolsas de agua cuando esta sube a la superficie, debido a la sedimentación de las partículas sólidas; esta agua almacenada bajo las partículas deja un espacio vacío cuando después del fraguado el agua evapora, por lo cual trae como consecuencia una notable reducción de la resistencia del hormigón.
- Una adecuada densidad aparente entre 2.3 y 2.9 gr/cm³. Cuanto mayor es su densidad mejor es su calidad y mejor su absorción, que oscila entre 1 y 5 %.
- Agregados con partículas esféricas y cúbicas son las más convenientes para el hormigón, porque tienen mayor resistencia y es menor el consumo de cemento debido al mayor acomodo de las partículas, o sea mayor cantidad de material por unidad de volumen
- Las partículas con formas angulosas producen mezclas ásperas y difíciles de manejar.
- No debe contener terrones de arcilla; generalmente se limita al contenido de finos entre el 1% y 3 %, para que permita una adecuada adherencia de las partículas y el cemento en las mezclas.

2.4 Agregado fino

Llamado también como arena, es el de mayor responsabilidad dentro del hormigón, a tal punto que pueda decirse que no es posible hacer un buen hormigón. Proveniente de la desintegración natural o artificial de las rocas, que pasa el tamiz 9.51 mm (N° 3/8") y queda retenido en el tamiz 0.074 mm (N° 200); además de cumplir con los límites establecidos en la norma ASTM C 33. El contenido de agregado fino normalmente oscila entre 35% al 45% por masa o volumen total del agregado, según sea el diseño. Sus partículas serán limpias, de perfil preferentemente angular, duro, compactas y resistentes (Díaz, 2005).

El agregado fino o arena se usa como llenante, además actúa como lubricante sobre los que ruedan los agregados gruesos dándole manejabilidad al hormigón. Una falta de arena se refleja en la aspereza de la mezcla y un exceso de arena demanda mayor cantidad de agua para producir un asentamiento determinado, ya que entre más arena tenga la mezcla se vuelve más cohesiva y al requerir mayor cantidad de agua se necesita mayor cantidad de cemento para conservar una determinada relación agua cemento (Díaz, 2005).

2.4.1 Características de un buen agregado fino

El módulo de finura del agregado fino utilizado en la elaboración de mezclas de hormigón, deberá estar entre 2,3 y 3,1 para evitar segregación del agregado grueso cuando la arena es muy fina; cuando la arena es muy gruesa se obtienen mezclas ásperas. La experiencia indica que las arenas con un módulo de finura (MF) inferior a 2.5 dan hormigones con consistencia pegajosa, haciéndolo difícil de compactar. Arenas con un módulo de finura de 3.0 han dado los mejores resultados en cuanto a trabajabilidad y resistencia a la compresión (Cabezas, 2018).

Un agregado fino con partículas de forma redondeada y textura suave ha demostrado que requiere menos agua de mezclado. Se acepta habitualmente que el agregado fino cause un efecto mayor en las proporciones de la mezcla que el agregado grueso. Los primeros tienen una mayor superficie específica y como la pasta tiene que recubrir todas las superficies de los agregados, el requerimiento de pasta en la mezcla se verá afectado por la proporción en que se incluyan éstos (Ávila. 2016).

2.5 Agua

El agua es un elemento fundamental en la preparación del concreto. Casi cualquier agua natural debe ser potable, sin tener un sabor u olor. Sus principales funciones (Cabezas, 2018):

- Como agua de mezclado y como agua de curado.
- Actuar como un lubricante, contribuyendo a la trabajabilidad de la mezcla fresca.
- Reaccionar con el cemento, produciendo su hidratación.
- Asegurar el espacio necesario en la pasta, para el desarrollo de los productos de hidratación.

Si no se tiene cuidado en eliminar las impurezas excesivas contenidas en el agua de mezcla, estas pueden afectar no sólo el tiempo de fraguado, la resistencia del concreto y la constancia de volumen, sino que a su vez pueden producir eflorescencia o corrosión del refuerzo (Ávila, 2016).

2.6 Propiedades del hormigón fresco

El hormigón fresco debe cumplir una serie de propiedades, las cuales se las deben controlar con ensayos establecidos por normas nacionales e internacionales, para obtener el hormigón deseado en obra. Se lo obtiene mezclando los agregados, agua, y cemento para darle distintas formas en sus respectivas molduras, el tiempo del hormigón en estado fresco es muy corto, por lo que se debe analizar sus propiedades y darle forma antes de que el hormigón inicie la reacción de fraguado rápido (Ávila, 2016).

2.6.1 Homogeneidad

Los diferentes componentes del hormigón se presentan regularmente distribuidos en toda la masa, de manera tal que, dos muestras tomadas de distintos lugares del mismo volumen resulten iguales. La masa de hormigón debe ser homogénea, para lo cual, la mezcla debe efectuarse lo mejor posible, y se cuidará que durante el transporte, no se produzcan segregaciones de los agregados gruesos (Cabezas, 2018).

La homogeneidad puede permitirse por:

- La segregación que no es más, que la separación de los agregados gruesos y finos.
- La decantación, sudado o exudación, es una forma de segregación que es cuando los agregados gruesos caen al fondo y el mortero queda en la superficie del hormigón recién colocado, se lo conoce también como ganancia de agua y resulta de la incapacidad de los materiales constitutivos para almacenar toda el agua del mezclado.

Para conseguir la homogeneidad es necesario un buen amasado haciendo una mezcla trabajable con una mínima cantidad de agua, un mayor contenido de cemento y arenas. Ambos fenómenos aumentan con la cantidad de agua; con el tamaño máximo del agregado, con las vibraciones o sacudidas durante el transporte y con la puesta en obra en caída libre (Ávila. 2016).

2.6.2 Trabajabilidad o docilidad

Es la facilidad que tiene el concreto para ser mezclado, manipulado y puesto en obra, con los medios de compactación del que se disponga (Ávila. 2016).

La trabajabilidad depende de (Cabezas, 2018):

- Dimensiones del elemento.
- Secciones armadas.
- Medios de puesta en obra.

Habrá una mayor trabajabilidad cuando:

- Contenga más agua.
- Agregados redondeados.
- Fluidificantes / plastificantes.

A continuación, un balance de lo que representa la trabajabilidad y la resistencia del hormigón

Tabla 2.3 Relación de trabajabilidad y resistencia del hormigón

Influencia de los factores de trabajabilidad y resistencia del hormigón		
Cuando aumenta:	La trabajabilidad	La resistencia
La finura de cemento	Aumenta	Disminuye
Tam. Máx árido	Disminuye	Aumenta
Cantidad de agua	Disminuye	Aumenta
Relación a/c	Aumenta	Disminuye
Cantidad aire incluido	Disminuye	Aumenta

Fuente: Apuntes de clases, Tecnología del hormigón CIV 371, UAJMS.

2.6.3 Consistencia

Denominamos consistencia a la mayor o menor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse o adaptarse a una forma específica, permitiendo que sea colocado y compactado adecuadamente (Ávila, 2016). Influencia de los factores de trabajabilidad y resistencia del hormigón

Va estar relacionado con el estado de fluidez de la mezcla y abarca un rango, desde las más secas hasta las más fluidas. Los principales factores que afectan la consistencia son:

- La granulometría del agregado, cuanto más fina sea la graduación más rígida será la mezcla, y el área superficial de los agregados aumentará requiriendo mayor pasta para revestirlas, y en consecuencia mayor cantidad de agua para una misma trabajabilidad.
- El contenido de agua en la mezcla mientras más agua contenga, tiende a ser más fluida, pero no debe agregarse agua en exceso para hacer más trabajable la mezcla, llevándola a asentamientos en el Cono de Abrams superiores a 15 cm. Esto no solo facilita la segregación de la mezcla, sino que, una vez colocado el hormigón, el agua en exceso busca escapar formando una gran cantidad de canales capilares que dejan las estructuras débiles, porosas y poco durables.
- La forma y características superficiales de los agregados, las partículas angulares y las superficies ásperas requieren una mayor cantidad de pasta que la necesaria

para partículas lisas y bien redondeadas y también requieren mayor cantidad de agua para la misma trabajabilidad que las lisas y bien redondeadas.

El método más empleado para determinar la consistencia será el cono de Abrams, es un molde troncocónico hueco de 30 cm de altura, se coloca sobre una superficie plana y rígida que sirve de fondo. Se introduce el hormigón en tres capas iguales, en cada capa se compacta 25 veces con una barra metálica con punta redondeada, de forma aleatoria y en toda superficie. Culminada las tres capas se enrasa el molde, luego se levanta el cono verticalmente de forma uniforme, con cuidado y sin sacudidas. La pérdida de altura que experimenta la masa fresca del hormigón una vez desmoldada del cono truncado, expresada en centímetros, da la medida de su consistencia (Cabezas, 2018).

2.7 Propiedades del hormigón endurecido

Va depender de la dosificación inicial de los componentes básicos y complementarios, del proceso de mezclado, y del proceso de curado. El hormigón endurece gracias a la reacción química que se produce entre el agua y el cemento, generalmente las características mecánicas del hormigón quedan especificadas a partir de su comportamiento en las siguientes propiedades (Ávila, 2016).

2.7.1 Peso específico

Es una característica física que es un indicador de la calidad de su densidad. Las propiedades mecánicas del hormigón están fuertemente influenciadas por su densidad. Un hormigón más denso suele proporcionar mayor fuerza, durabilidad y resistencia a la permeabilidad debido a su menor porosidad (cantidad de huecos). Para un hormigón bien endurecido con áridos normales, su densidad oscila entre los 2300-2500 kg/m³ (Ávila, 2016).

2.7.2 Ductilidad

Es la capacidad que tiene para continuar deformándose no linealmente, a pesar de que los incrementos de carga sean mínimos, nulos e inclusive, si existe una disminución de la carga; una medida cuantitativa, sería el cociente entre la deformación de rotura y la deformación máxima con comportamiento lineal elástico (Ávila, 2016).

2.7.3 Permeabilidad

Es el nivel de accesibilidad que el hormigón “ofrece” ante gases o líquidos. Un factor relevante para medir la mayor permeabilidad o no, es la relación entre el cemento y el agua añadida. A mayor relación, mayor la permeabilidad y, por tanto, estará expuesto a más agresiones (Bueno, 2018)

2.7.4 Resistencia

El hormigón endurecido muestra resistencia al desgaste, la tracción y la compresión. Sin embargo, lo que convierte al hormigón endurecido en un material de mucha importancia es su resistencia a la compresión. Esta resistencia se mide en MPa (Megapascales) y en hormigones normales llegan a 50 MPa y en hormigones de alta resistencia, hormigón dentro de la categoría de hormigones especiales, llega a los 100 MPa (Ávila, 2016).

La resistencia al desgaste, muy útil en pavimentos de naves industriales, se consigue con una relación agua-cemento adecuada, y empleando áridos resistentes.

2.8 Equivalencias entre distintas edades del hormigón

Dada la gran cantidad de factores que intervienen en el proceso de endurecimiento, es muy difícil predecir la resistencia a una edad a partir de los resultados obtenidos a edades más tempranas o viceversa. La siguiente tabla proporciona valores estimativos de resistencia a flexión a edad de “j” días en relación con la resistencia a 28 días (Jiménez Montoya, H°A°).

Tabla 2.4 Coeficientes de conversión respecto a 28 días de edad, en los ensayos de resistencia a tracción

Edad del Hormigón, en días	3	7	28	90
Tracción directa	0,58	0,74	1	1,22
Ensayo Brasileño	0,65	0,78	1	1,08
Ensayo de Flexotracción	0,58	0,75	1	1,2

Fuente: Jiménez Montoya, Hormigón Armado, Ed. 15^a

2.9 Dosificación de mezclas de hormigón

2.9.1 Métodos de dosificación utilizados en Bolivia

De acuerdo a Sánchez, la dosificación de mezclas de hormigón en Bolivia se la puede dividir en dos grupos de acuerdo a la magnitud de la obra. Para obras de poca importancia, se utiliza reglas empíricas y dosificaciones prefijadas especificando las proporciones de los componentes en volumen (Sánchez, 2009).

Para obras de mayor importancia, se utiliza métodos de procedencia extranjera, los cuales fueron creados para agregados y cementos distintos a los utilizados en Bolivia, y por estas razones tales proporciones deben ser verificadas y corregidas en mezclas de prueba en laboratorio y en campo. El método más difundido en nuestro país es el método ACI (Sánchez, 2009).

2.9.2 Método ACI 211.1 de la American Concrete Institute

Uno de estos procedimientos de uso muy amplio en la dosificación de hormigones es el método ACI 211.1 el cual se refiere a la práctica recomendada para dosificar hormigón normal, pesado y en masa (Sánchez, 2009).

Tabla 2.5 Asentamientos recomendados para diversos tipos de construcción

Consistencia	Asentamiento (cm)	Ejemplo de tipo de construcción	Sistema de colocación	Sistema de compactación
Muy seca	0-2.00	Prefabricación de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación	Con vibradores de formaleta; hormigones de proyección neumática (lanzado)	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión
Seca	2.00-3.50	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibración intensa
Semi-seca	3.50-5.00	Pavimentos, fundaciones en hormigón simple	Colocación con máquinas operadoras manualmente	Secciones simplemente reforzadas, con vibración
Media	5.00-10.00	Elementos compactados a mano, losas, muros, vigas	Colocación manual	Secciones medianamente reforzadas, sin vibración
Húmeda	10.00-15.00	Elementos estructurales esbeltos	Bombeo	Secciones bastantes reforzadas, sin vibración
Muy húmeda	15.00 o más	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos "in situ"	Tubo embudo Tremie	Secciones altamente reforzadas, sin vibración (normalmente no adecuados para vibrarse)

Fuente: Práctica recomendable para dosificar concreto normal y concreto pesado. ACI 211.1

Tabla 2.6 Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños nominales de agregado

Asent. (cm)	Tamaño máximo nominal del agregado (mm)							
	9,51 mm 3/8"	12,50 mm 1/2"	19,00 mm 3/4"	25,00 mm 1"	38,00 mm 1 1/2"	50,00 mm 2"	75,00 mm 3"	150,00 mm 6"
Agua de mezclado, en kg/m ³ de hormigón. Hormigón sin aire incorporado								
3,00 a 5,00	207	199	190	179	166	154	130	113
8,00 a 10,00	228	216	205	193	181	169	145	124
15,00 a 18,00	243	228	216	202	190	178	160	-
% aproximado de aire atrapado	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2

Fuente: Práctica recomendable para dosificar concreto normal y concreto pesado. ACI 211.1

Tabla 2.7 Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles

Resistencia especificada	Resistencia promedio
Kg/cm ²	Kg/cm ²
$f_c < 210$	$f_{cr} = f_c + 70$
$210 \leq f_c \leq 350$	$f_{cr} = f_c + 85$
$f_c \geq 350$	$f_{cr} = f_c + 100$

Fuente: Práctica recomendable para dosificar concreto normal y concreto pesado. ACI 211.1

Tabla 2.8 Relación Agua /Cemento (A/C) y la resistencia a la compresión del concreto

Resistencia a la compresión a 28 días (Kg/cm ²)	Relación agua/cemento, por peso	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
400	0,42	-
350	0,47	0,39
300	0,54	0,45
250	0,61	0,52
200	0,69	0,6
150	0,79	0,7

Fuente: Práctica recomendable para dosificar concreto normal y concreto pesado

Tabla 2.9 Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto

Volumen de agregado grueso, seco y compactado con varilla, por volumen unitario de hormigón para diferentes módulos de finura de la arena					
Tamaño máximo nominal		Módulo de finura de la arena			
mm	Pulg.	2,40	2,60	2,80	3,00
10,00	3/8"	0,50	0,48	0,46	0,44
12,50	1/2"	0,59	0,57	0,55	0,53
20,00	3/4"	0,66	0,64	0,62	0,60
25,00	1"	0,71	0,69	0,67	0,65
38,00	1 1/2"	0,75	0,73	0,71	0,69
50,00	2"	0,78	0,76	0,74	0,72
70,00	3"	0,82	0,80	0,78	0,76
150,00	6"	0,87	0,85	0,83	0,81

Fuente: Práctica recomendable para dosificar concreto normal y concreto pesado. ACI

211.1

2.10 Hormigón reforzado con fibras

Los hormigones reforzados con fibras (HRF), se definen como aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa. La aplicación de estos hormigones reforzados puede ser con finalidad estructural o no estructural. El empleo de fibras en el hormigón tiene finalidad estructural cuando se utiliza su contribución en los cálculos relativos a alguno de los estados límite últimos o de servicio y su empleo puede implicar la sustitución parcial o total de armadura en algunas aplicaciones. Se considerará que los hormigones reforzados con fibras no tienen función estructural, cuando se incluyan en el hormigón con otros objetivos como la mejora de la resistencia al fuego o el control de la fisuración (Álvarez, 2015).

Actualmente se han desarrollado numerosas investigaciones respecto al conocimiento del HRF y sus aplicaciones, se ha avanzado en su evaluación mecánica respecto a resistencia residual y energía de absorción, se han desarrollado especificaciones y ensayos específicos de prueba para el HRF que han incrementado la confianza de uso como solución estructural. (Serna et al., 2009)

2.10.1 Componentes y factores del hormigón reforzado con fibras de acero

La máxima eficiencia de las fibras de acero está dada por una correcta dosificación de los materiales, aunque no hay un método de dosificación definido para HRFA. Por lo común se

toma como referencia la dosificación del concreto tradicional, haciendo ciertas modificaciones para mejorar la reducción de trabajabilidad y la dispersión homogénea de las fibras. (Blanco, 2008)

La tabla 2.10 muestra el rango de proporciones para un SFRC según ACI 544 1R-96; 2009.

Tabla 2.10 Rango de proporciones de componentes para un SFRC

Componentes de la mezcla	Tamaño máximo de árido(mm)		
	10	20	40
Cemento(Kg/m ³)	350-600	300-530	280-415
Agua/cemento	0,35-0,45	0,35-0,5	0,35-0,55
% árido fino/grueso	45-60	45-55	40-55
% aire incluido	.4-8	.4-6	.4-5
Fibras conformadas (V _f %)	0,4-1	0,3-0,8	0,2-0,7
Fibras planas (V _f %)	0,8-2	0,6-1,6	0,4-1,4

Fuente: Informe de estado del arte sobre hormigón reforzado con fibras. ACI 544.1R-96; 2009

2.10.1.1 Cemento

En general se puede usar el cemento portland tipo I y III, cementos puzolánicos, cementos siderúrgicos o adicionados. La elección del tipo de concreto depende de las condiciones de durabilidad que se le quiere dar al concreto, se puede usar cemento adicionado con microsílice, cemento tipo II y V, incorporadores de aire etc. (Mármol, 2010).

El contenido de cemento, su valor oscila entre los 300-450 kg/m³, superior al de los hormigones convencionales (Puig, 2011)

2.10.1.2 Agregado

Se pueden emplear áridos rodados o machacados, siendo más adecuado el empleo de los primeros, ya que para valores idénticos de relación agua/cemento se obtiene mejor docilidad que con los áridos machacados. Tamaños máximos de árido mayores que 20 mm no son recomendados (ACI 544.3R-08, 2008), aunque en algunos estudios se han empleado áridos de hasta 38 mm las fibras pueden introducirse junto con los agregados y de preferencia el hormigón mezclado en estado fresco (Mármol, 2010).

Se recomienda también que el tamaño máximo de árido no supere:

- 3/4 de la distancia libre entre las barras de armado.
- 2/3 de la longitud máxima de la fibra.
- 1/5 del lado menor del elemento. .

2.10.1.3 Relación agua/cemento para hormigones reforzados con fibras

La resistencia del hormigón y la durabilidad está en función a muchos factores, cantidad de cemento, granulometría y tamaño máximo del árido, compactación, curado, y otros; pero fundamentalmente de la relación a/c. Para asegurar la dispersión de las fibras, por parte de la ACI en la tabla 2.10 mostrada anteriormente, recomienda un rango de la relación agua/cemento 0.35 – 0.50 en función al TMN del árido.

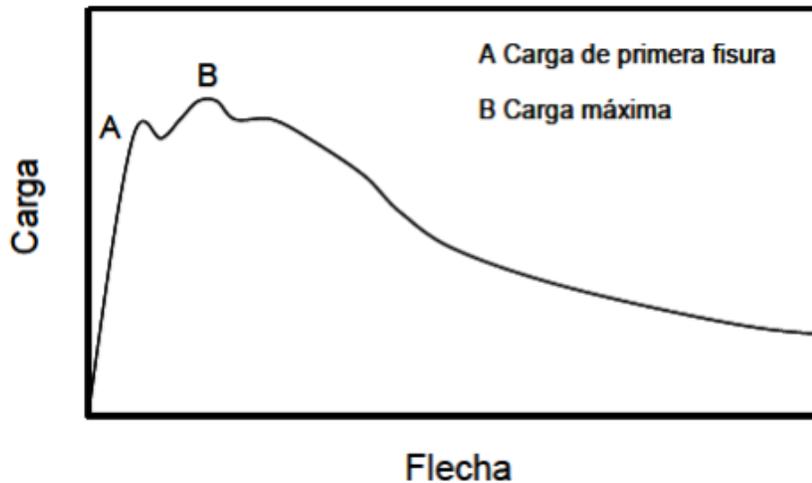
Otra bibliografía indica que, los hormigones de fibras de acero experimentan, una disminución en la docilidad cuando aumenta el volumen de fibras, lo que implica que para asegurar la dispersión de las mismas hay que emplear relaciones agua-cemento entre 0,5 y 0,6 (Fernández, 2009).

2.11 Propiedades mecánicas del hormigón reforzado con fibras de acero

2.11.1 Flexión

El incremento de la resistencia a flexión al adicionar fibras de acero al hormigón es considerablemente mayor que el de la resistencia a compresión y tracción, esto se debe al comportamiento dúctil del SFRC en la zona fisurada por tracción desarrollando resistencias residuales (Mármol, 2010).

Figura 2.1 Curva carga – flecha a flexión para un SFRC



Fuente: Asociación Española de Ingeniería Estructural, ACHE 2000

El incremento de la resistencia a primera fisura obtenida con la adición de las fibras de acero es mínimo, lo cual indica que esta propiedad depende básicamente de la matriz y muy poco del contenido de fibras, del tamaño y de la forma de estas, por lo que resulta más rentables mejorar las características de la matriz con el uso de por ejemplo aditivos humo de sílice, y otros. Las respuestas a la carga –deflexión de esta etapa de la conducta y el grado donde se da la pérdida en resistencia con una deformación creciente, son una indicación importante de la capacidad el compuesto con fibras para absorber grandes cantidades de energía ante la rotura y es una característica que diferencia el hormigón mejorado con fibras del hormigón simple dicha característica es llamada tenacidad la etapa no lineal entre (A y B) se da si hay una suficiente fracción de volumen de fibras en el caso de volumen bajo de fibras coincide con la primera resistencia a la fisura (Mármol, 2010).

Se ha indicado que, Reforzando el hormigón con fibras de acero la resistencia a la flexión puede aumentar más de un 25% (Cymper, 2015).

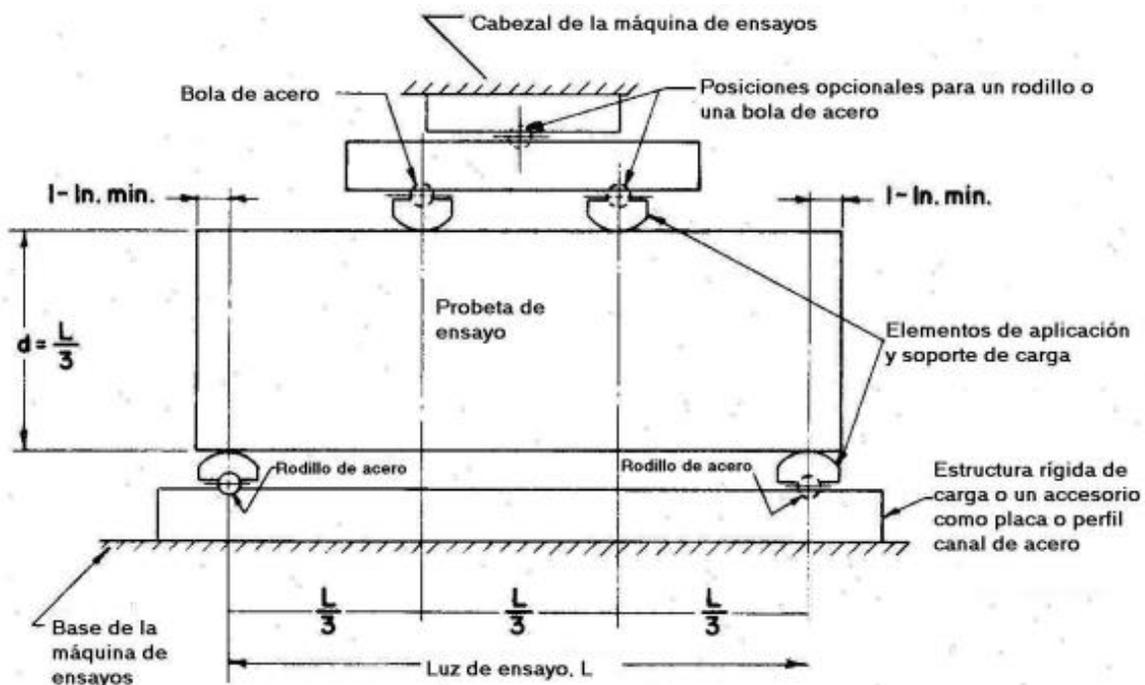
2.11.1.1 Módulo de Ruptura

Módulo de Ruptura (MR) también llamada resistencia a la flexión, es la medida del esfuerzo máximo en la fibra extrema, que se desarrolla al someter a una viga a la flexión. El Módulo de Ruptura es cerca del 10 % al 20 % de la resistencia a compresión, en dependencia del tipo

de agregado utilizado, sin embargo, la mejor correlación para los materiales específicos es obtenida mediante los ensayos de laboratorio dado y en el diseño de mezcla (CIP. NRMCA. El concreto en la práctica).

Este módulo se evalúa mediante un ensayo a la flexión de las viguetas de concreto simple de 50 cm de longitud y secciones cuadradas de 15 cm por lado, con cargas aplicadas en los tercios de la luz de la viga, la rotura se producirá en el punto más débil del tercio central, es recomendable que en este ensayo se verifique la carga en el punto medio de cada área, para que la rotura se produzca factiblemente en el punto medio. Bajo la Norma ASTM C-78 determinación del esfuerzo a la flexión del concreto (Mármol, 2010).

Figura 2.2 Diagrama de un aparato adecuado para los ensayos a la flexión del hormigón mediante el método de carga en los tercios



Fuente: Designación ASTM C 78 - 02

Ensayo

La probeta de ensayo debe cumplir con los requisitos del Método de ensayo C 192 aplicables a las vigas y prismas, y debe tener una luz de ensayo dentro del 2% de tres veces su

profundidad. Los lados de la probeta deben estar en ángulo recto con respecto a las caras superior e inferior. Todas las superficies deben ser suaves y no tener marcas, hendiduras, saltaduras o marcas de identificación. El método de carga en los tercios se utiliza para realizar ensayos de flexión al hormigón, empleando placas de acero que aseguren que las fuerzas aplicadas a la viga sean perpendiculares a la cara de la probeta y aplicadas sin excentricidad (ASTM C 78 – 02).

Cálculos

Si la fractura se inicia en la superficie de tracción dentro del tercio medio del largo de la luz, calcule el módulo de ruptura de la siguiente manera:

$$MR = \frac{P * L}{b * h^2}$$

MR = Módulo de Ruptura

P = Es la carga máxima de rotura (N)

L = Es la luz libre entre apoyo (mm)

b = Es el ancho del molde-Viga (mm)

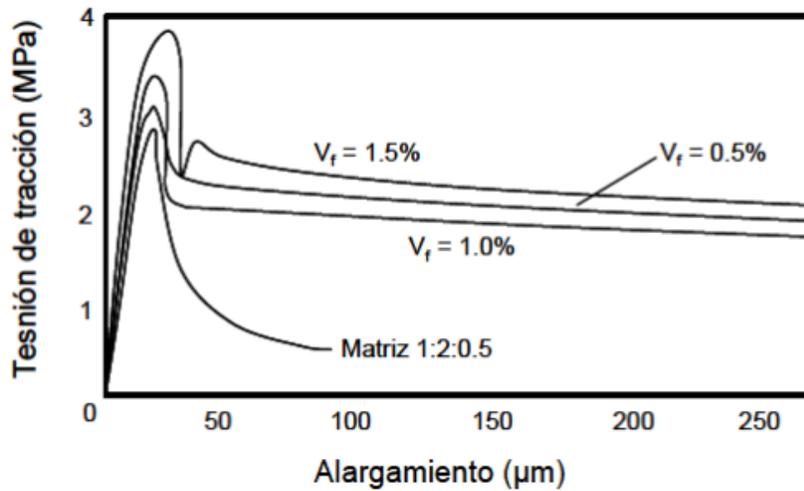
h = Es la altura del molde-Viga (mm)

Los resultados de este método de ensayo pueden ser utilizados para determinar el grado de cumplimiento con las especificaciones o como base para la dosificación y operaciones de colocación. Se utiliza para ensayar el hormigón para la construcción de losas y pavimentos entre otros (ASTM C 78 – 02).

2.11.2 Tracción

En el diagrama tensión-deformación o tracción directa del SFRC (Fibra de Acero en el Hormigón, sus siglas en inglés), las fibras rigidizan sensiblemente la respuesta en fase de pre fisura respecto de la de un hormigón tradicional, y de forma destacada, aporta una capacidad de resistencia residual post-fisura debido al efecto de cocido de los dos labios de la fisura (Mármol, 2010).

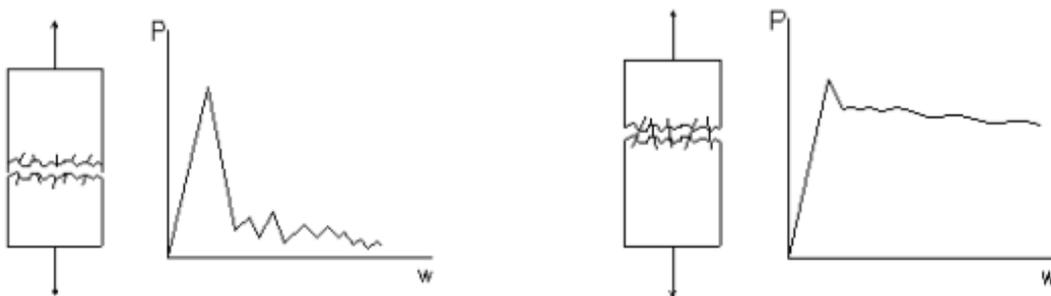
Figura 2.3 Curva tensión de tracción – alargamiento de morteros en función de la tracción



Fuente: Informe en hormigón reforzado con fibras. ACI 544.1R-96

Uno de los efectos más importantes en el comportamiento mecánico del hormigón, debido a la presencia de fibras, se manifiesta en la resistencia a la tracción post-fisura, a su vez, afecta a muchas propiedades mecánicas como la adherencia a las armaduras, resistencia al cortante, etc. Adicionando fibras en un 1.5% de volumen de hormigones o morteros se obtienen incrementos de la resistencia a tracción directa, del orden del 30%-40% (ACI 544.1R 96, 2009).

Figura 2.4 Curva carga-desplazamiento para rotura de fibras (tracción) y para deslizamiento de fibras (tracción).



Fuente: Comportamiento mecánico del hormigón con fibras metálicas. Carles Puig B.

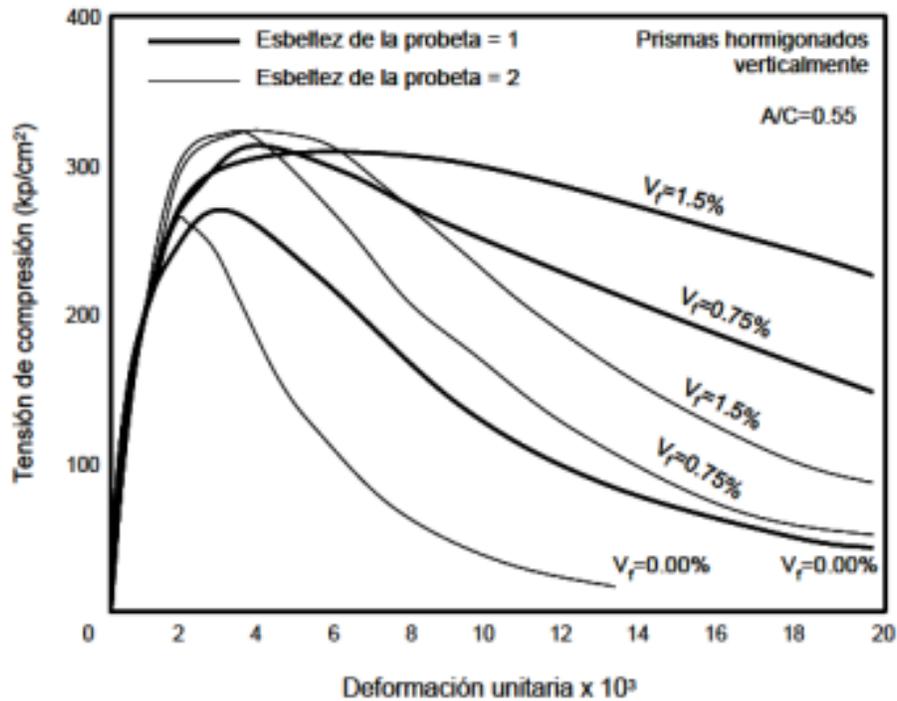
De esto se deduce que la longitud de anclaje debe ser suficientemente grande para garantizar la adherencia y suficientemente pequeña para permitir el deslizamiento de las fibras (Puig, 2011). Sin embargo, el ensayo de tracción directa presenta otros inconvenientes tales como la sujeción de la probeta y la dificultad de asegurar la estabilidad del ensayo (Minchan, 2021).

2.11.3 Compresión

Es de común aceptación que la adición de fibras no conlleva un incremento significativo de la resistencia al hormigón a compresión suelen producirse ligeros incrementos o decrementos de la misma (Mármol, 2010). Reforzando el hormigón con fibras, la resistencia a la compresión puede aumentar alrededor de un 10% (Cymper, 2015).

Cuanto menos es el tamaño de las probetas se obtienen mayores resistencias a compresión, debido a que se acentúa un alineamiento preferente de las fibras. El efecto se hace mucho más sensible a medida que se aumenta la longitud de la fibra (ACI 544 3R-08, 2008) probetas con mayor esbeltez soportan tensiones sensiblemente mayores pero presentan respuestas menos dúctiles a compresión. Se debe tener especial cuidado con estas situaciones para no generar falsos panoramas con resultados optimistas.

Figura 2.5 Respuesta a compresión simple de SFRC con diferente esbeltez de probetas



Fuente: Asociación Española de Ingeniería Estructural, ACHE 2000

2.11.4 Otras propiedades mecánicas

2.11.4.1 Cortante y torsión

Las fibras de acero en el hormigón aumentan la resistencia a cortante y a torsión, aunque la gran mayoría de investigaciones se han centrado en evaluar estas propiedades mecánicas en elementos de SFRC armados (Mármol, 2010).

El comportamiento a cortante ha sido estudiado por Serna Barragan Meda y Milleni. Barragan en ensayos experimentales de vigas, concluyendo que las fibras proporcionan una fisuración más distribuida y además, incrementando la capacidad de carga última a cortante.

El empleo de sistemas combinados de refuerzo (fibras y estribos) conduce a notables incrementos de ductilidad, aunque con aumentos resistentes a cortante poco significativos (0-15% para hormigones ordinarios y de alta resistencia respectivamente) respecto de las vigas con solo estribos como armadura de cortante (Marmol, 2010).

2.11.4.2 Módulo de elasticidad

Es una propiedad fundamental que se requiere para modelar el comportamiento mecánico en diversas aplicaciones estructurales se han creado ensayos para medir el módulo de elasticidad de un material dado en el caso de los materiales puros tales como el metal y el vidrio los valores experimentales observados son tabulados a la vez y luego puestos en práctica. El módulo de elasticidad del acero es diez veces mayor que el del hormigón, su adherencia es bastante buena, su deformación en rotura es elevada y son fáciles de mezclar.

Las fibras de acero tienen una resistencia y módulo de elasticidad relativamente altos, están protegidas de la corrosión al ambiente alcalino de la matriz cementicia, y su adherencia dentro de dicha matriz puede ser mejorada por anclaje mecánico o rugosidad superficial (ACI 544; 2002).

2.11.4.3 Resistencia a la fatiga

Se han realizado varios estudios experimentales tempranos de fatiga sobre el mortero y hormigón mejorado con fibras de metálicas en flexión. La resistencia a la fatiga puede ser descrita como el máximo esfuerzo a la fatiga por sección donde los compuestos de hormigones mejorados con fibras pueden aguantar una cantidad prescrita de ciclos de fatiga antes de la falla, por otro lado, está también puede ser definida como la cantidad máxima de ciclos de fatiga para ceder una viga bajo un nivel máximo de esfuerzo a la flexión dada (Mármol, 2010).

2.11.4.4 Punzonamiento

Al emplear volúmenes de fibras superiores al 0.5% se han experimentado roturas por punzonamiento más graduales y dúctiles, con incremento considerable de la fisuración previa al agotamiento y de la resistencia después de la fisuración, en función del contenido de fibras, esbeltez y la capacidad adherente de estas. Las fibras permiten aumentar la resistencia a la rotura por punzonamiento, habiéndose obtenido incrementos de hasta 42% (ACI 544.4R, 2009).

2.12 Fibras de acero

Las fibras son elementos de corta longitud y pequeña sección, que para que tengan un comportamiento óptimo deben estar homogéneamente distribuidas en la mezcla del hormigón. Sus ventajas son que prácticamente no generan desperdicio del material, no exige grandes inversiones para el transporte y almacenamiento, su manipulación y aplicación son simples (Minchan, 2021).

Para que las fibras sean eficientes es necesario tengan módulo elástico tres veces mayor al del concreto. En ese sentido, destaca el módulo elástico de las fibras de acero, que es siete veces mayor al del concreto, por ello las fibras de acero son las más usadas para obtener concretos resistentes a flexión, tracción, impacto, fatiga, etc. (Minchan, 2021).

2.12.1 Clasificación de las fibras de acero

Se identifican cuatro tipos generales de fibras de acero en el producto utilizado como fuente de material de fibra de acero (ASTM A 820).

Tipo I: Alambres trefilados en frío (alambre rolado en frío).

Tipo II: Hojas cortadas (lámina de acero).

Tipo III: Extraído por fusión (virutas de acero).

Tipo IV: Otras fibras (fibras de acero fundidas).

Sin embargo, la ASTM A 820 es muy limitada para especificar un tipo de fibra metálica para algún proyecto, pues diferentes fibras metálicas que pertenecen a un mismo grupo o tipo no ofrecen los mismos resultados en las pruebas ASTM C 1018 (José Hop, Peter C. Tatnal, 2003).

2.12.2 Características geométricas de las fibras de acero

Básicamente, la fibra es caracterizada geométricamente por la longitud (l), por la forma y por su diámetro. De la relación entre longitud (l) y el diámetro (d) se obtiene la relación de aspecto, también llamada esbeltez ($\lambda=l/d$) (Mármol, 2010).

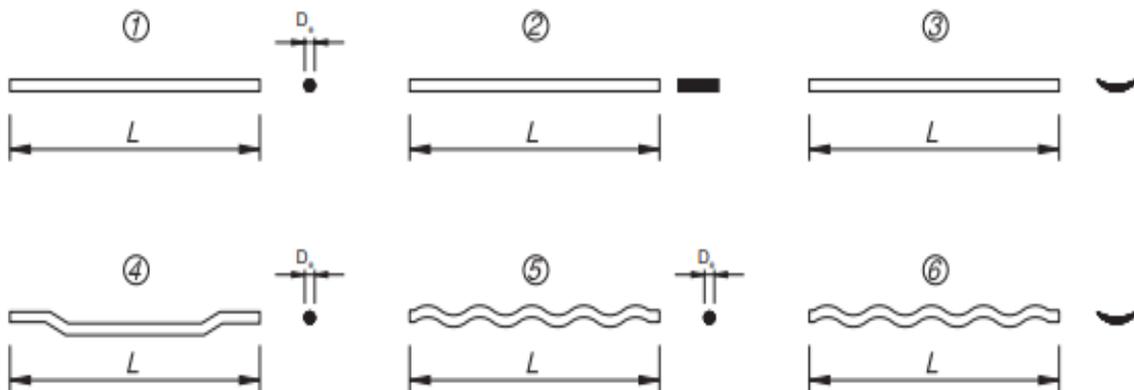
La longitud de la fibra (l) se recomienda sea como mínimo 2 veces el tamaño del árido mayor, pues debe ser suficiente para dar una adherencia necesaria a la matriz y evitar arrancamientos con demasiada facilidad. Es usual el empleo de longitudes de 2,5 a 3 veces el tamaño máximo de árido. Además, el diámetro de la tubería de bombeo exige que la longitud de la fibra sea inferior a 2/3 del diámetro del tubo para el caso de un hormigón proyectado (Mármol, 2010).

La forma de las fibras afecta directamente a la adherencia entre estas y el hormigón, dificultando el arrancamiento de las mismas, lo cual hace que la resistencia a tracción aumente considerablemente. Por otra parte, el aumento de la esbeltez de las fibras y el empleo de altas dosificaciones conlleva un aumento de su eficiencia mecánica, pero puede provocar un descenso considerable de la consistencia y un mayor riesgo de formación de bolas de fibras que se segregan del hormigón (erizos) (Mármol, 2010).

Las fibras usadas para la fabricación del HRF se encuentran también por su sección. Podemos encontrar desde las más comunes como circulares, que son las más extendidas en el mercado, hasta las de sección irregular (Minchan, 2021).

En la figura 2.6 se puede apreciar los tipos de sección comerciable.

Figura 2.6 Longitudes y secciones de las fibras de acero



Fuente: Fibras como elemento estructural para refuerzo del hormigón. MACCAFERRI

Su forma es de alambre, rectas o conformadas (en toda su longitud o en sus extremos), con diámetros que oscilan entre 0,25 y 1,1 mm y en el rango de longitud común de entre 12.7 y

75 mm. Una propiedad que se ha comprobado muy influyente es la de su esbeltez (relación entre longitud y diámetro) en el rango de 20 a 100(ACI 544.3R-08).

La esbeltez, es importante ya que mantiene relación directa con la mejora de las propiedades del concreto, pero no es recomendable pasar de 100, el incremento de esbeltez y alta proporción de fibras aumenta su eficiencia mecánica, pero producen disminución de trabajabilidad y riesgo de enredo de fibras que separan del concreto (Puig, 2011).

En una investigación “Evaluación de la influencia de la dosificación y esbeltez de fibras de acero en los resultados del ensayo Barcelona del concreto reforzado con fibras” realizada por Ronal Minchan, concluyó que, comparando los distintos tipos de fibras, a igualdad de dosificación se tiene que la consistencia decrece al aumentar la esbeltez, así que las fibras Dramix 3D 65/60 BG, de esbeltez 65, son más trabajables que las 3D 80/60BG de esbeltez 80 y presentaron igualdad de trabajabilidad con las fibras 4D 55/60BG de esbeltez 55 y estas a su vez presentan menor trabajabilidad que las fibras 3D 45/35BL de esbeltez 45.

2.12.3 Propiedades mecánicas de las fibras de acero

El comportamiento de las fibras y las propiedades que éstas pueden aportar a la mezcla de hormigón dependen no solamente del volumen aportado sino de las características de las propias fibras.

Tabla 2.11 Características mecánicas de las fibras

Tipo de acero	Resistencia a Tracción(MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Densidad (kg/m ³)
Fibra de acero	345	210	7800

Fuente: Hormigones Reforzados con Fibras de Acero. Fernández Cánovas

Resistencia a tracción del acero: Depende de la calidad del acero. Para un contenido bajo o medio de carbono, la resistencia a tracción oscila entre 400 y 1500 MPa. Incrementando el contenido de carbono se pueden alcanzar resistencias de 2000 MPa, siendo este tipo de fibras especialmente adecuadas para hormigones de alta resistencia (Puig, 2011).

2.12.4 Características químicas de las fibras de acero

La composición química de las fibras de acero por lo general incluye acero al carbono (o acero de bajo carbono, algunas veces con constituyentes de aleaciones), o acero inoxidable; sin embargo, algunas aplicaciones pueden requerir diferentes composiciones químicas de las fibras (Mármol, 2010).

Tabla 2.12 Composición química de las fibras de acero

Elemento	Composición %
Carbono	0,69 - 0,76
Silice	0,15 - 0,30
Manganeso	0,40 - 0,60
Fósforo	0,025

Fuente: Fibras de Acero para reforzamiento de matrices cementicias. Wilfredo Benavides Cerezo.

2.13 Adición de fibras de acero en el hormigón

El contenido de fibra puede variar desde tan bajo como 0,25 % a tan alto 1,5 % de volumen de hormigón, es decir; de 30 kg/m³ a 157 kg/m³ respectivamente. El uso de proporciones altas exige modificar los componentes del concreto. Para esto se debe consultar bibliografía especializada (ACI 544 3R – 08).

Otras citas bibliográficas como Cheng, en 2013, indica que cuando la cantidad de fibras en el HRFA es baja (entre 20 y 50 Kg/m³) no hace falta realizar ninguna modificación en la dosificación respecto a un hormigón tradicional. No obstante, cuando se aumentan estas cifras es aconsejable realizar ajustes en la misma. Estos ajustes afectan al tamaño máximo de árido, la relación a/c, la cantidad de aditivos reductores de agua y la cantidad de finos.

En otra, el contenido habitual de fibras de acero varía entre 20 y 60 kg/m³, representando entre el 0,25% y 0,75% en volumen. La imposición de estos valores no es arbitraria, un ejemplo es que si la proporción de fibras es alta (superior a 1%), la esbeltez elevada (próxima a 100) o el tamaño de árido grande (mayor de 20 mm) existe el riesgo de formación de bolas de fibras (Puig, 2011).

Se indica como también en una ficha técnica proveedora de fibras de acero en nuestro país, ULGETEC, recomienda que el contenido de fibra debe ser tal que no afecte sustancialmente la consistencia y trabajabilidad de la mezcla. No debe ser inferior a 20 kg /m³ para no comprometer la resistencia estructural y no debe ser superior a 50 kg /m³ para evitar dificultades en la movilidad de la mezcla.

La uniformidad en la dispersión depende principalmente del porcentaje de fibras, la esbeltez, la relación agua/cemento y el sistema de mezclado. Con los valores anteriormente mencionados de estos parámetros se puede obtener esa uniformidad (Puig, 2011).

2.14 Adherencia fibra - matriz

La adherencia aumenta con la esbeltez de las fibras. Se ha comprobado que utilizando fibras de extremos conformados, se han comparado tres tipos de fibras elaborados del mismo material y con la misma área, una circular recta, otra circular con extremos conformados y la tercera triangular retorcida, realizando ensayos de tracción a una sola fibra se encontró que la triangular retorcida dio una resistencia de adherencia un 400% y 200 % mayor que la fibra recta y que la de extremos conformados. Además que la energía de arrancamiento fue 2.5 veces mayor que la fibra triangular respecto a la conformada (Mármol, 2010)

Para elevar la absorción de energía se deben propiciar fenómeno de arrancamiento y evitarla rotura de las fibras, hecho que no debe producirse porque daría lugar a una rotura frágil (caída vertical) en vez de una rotura dúctil (Mármol, 2010).

2.15 Aplicaciones de las fibras de acero

Elementos pre fabricados. Los elementos prefabricados de concreto pueden ser estructurales o no estructurales (también llamados arquitectónicos). Entre los primeros las vigas, columnas, dovelas, placas alveolares y losas para piso de concreto, mientras que para el segundo tipo son Piezas pre fabricadas ya que al incluir fibras de acero disminuyen los espesores, lo cual no solo reduce su costo, sino también su peso, y transportarlas resulta menos complicado, como ser paneles de muros con ventanas y las coberturas de columnas, entre otras instalaciones. Las fibras contribuyen a reforzar el material para que mantenga su

consistencia en todo momento. Por eso, es habitual usarlo en proyectos arquitectónicos de gran complejidad (PSI Concreto, 2020).

También, se construyen elementos prefabricados: tubos, cajas, canales y otros. El HRFA provee a los tubos resistencia al impacto, abrasión y cavitación, reduce espesores, mejora la impermeabilidad, así mismo se utiliza en la reparación de tuberías causados por erosión y cavitación, en concretos tradicionales de buena calidad después de un tiempo corto de servicio (Minchan, 2021).

Pisos industriales

Los pisos industriales son generalmente sometidos a tensiones tanto en la parte superior como en la parte inferior en la losa de hormigón. La ubicación de las tensiones cambia constantemente bajo las diferentes cargas estáticas y dinámicas. Con fibras de acero el refuerzo está presente en toda la masa lo cual hace posible el control complejo de esfuerzos y los patrones de flexión que se dan en el piso. Además en zonas principales de tensión, superior e inferior, están homogéneamente aseguradas (PSI Concreto, 2020).

Aumentar o sustituir los estribos verticales en vigas

Existen estudios que han sido en la actualidad el uso de fibras de acero se ha convertido en parte importante del refuerzo en elementos estructurales de concreto, lo cual incrementa el desarrollo de la investigación de los comportamientos mecánico. Una alternativa más para solucionar el problema de la falla de cortante por tensión diagonal, mejorando las propiedades mecánicas con la combinación de estribos y fibras de acero, como refuerzo transversal, esperando un incremento en la resistencia a la primera grieta por cortante.

Con el uso de este tipo de refuerzo se lograría rescatar cualquier viga o elemento que exija alta resistencia a la flexión sin modificar su geometría, forma, o apariencia visual, conservando así las características originales de los elementos estructurales. Al mismo tiempo, el uso de este sistema de refuerzo añade resistencia y vida útil al elemento sin que sufra daños la viga o la estructura integral. Aunque completar o sustituir estribos con fibras de acero no es una práctica aceptada ahora (ACI 544 1R).

En el caso del armado convencional, las barras están ancladas de forma que se alcanza el límite elástico del acero y su capacidad última se desarrolla cuando tiene lugar la rotura del acero. A diferencia de las barras, las fibras de acero se diseñan para que no alcancen el límite elástico del acero, antes de alcanzarlo deben deslizar para desarrollar su máxima eficiencia. La razón es que todas las fibras que cosen una fisura tienen diferente longitud de anclaje y orientación. Esto significa que las deformaciones en las diversas fibras durante la apertura de la fisura son muy distintas, existiendo la posibilidad de que algunas de ellas rompan mientras que otras aún están sometidas a tracciones bajas (Puig, 2011)

No obstante, si las fibras deslizan en lugar de romperse, su resistencia total a tracción será muy importante, consiguiendo además una gran ductilidad. De esto se deduce que la longitud de anclaje debe ser suficientemente grande para garantizar la adherencia y suficientemente pequeña para permitir el deslizamiento de las fibras.

Hormigones ligeros

Otra manera de producir hormigones livianos es introduciendo burbujas de aire estables dentro del hormigón mediante el uso de mezclas químicas y burbujas mecánicas. La forma más común de producir hormigones livianos es usando agregados livianos. La disminución en la resistencia que generan los agregados livianos en reemplazo de los agregados comunes se compensa con el aumento de resistencia dado para la fibra de acero. Por lo tanto, se mantiene la resistencia con todas las ventajas que pueden obtenerse mediante el uso de hormigones livianos, y otros usos comunes (Pineda, 2013).

2.16 Los clavos de acero

El clavo de acero está fabricado con alambre de acero de bajo carbono, trefilado y conformado en frío para obtener las propiedades de resistencia y rigidez de este elemento de unión y fijación. Varía en sus propiedades y cualidades según las diferentes aleaciones, como los aceros con alto porcentaje de carbono, usados principalmente para penetrar concreto dada la alta dureza que les proporciona el tratamiento térmico al que se someten. (Aceros Arequipa).

2.16.1 Propiedades mecánicas de los clavos de acero

Los clavos de acero de bajo carbono que es más utilizados en las obras de construcción, denominados clavos de “punta parís”.

Tabla 2.13 Propiedades mecánicas de los clavos de acero y sus medidas

Longitud		Propiedades mecánicas		
Pulgadas	mm	Diámetro	Resistencia a la tracción (MPa)	
		d(mm)	MÍN	MÁX
1	25,40	2,15	755	1295
1 1/2	38,10	2,45	760	1152
2	50,80	2,77	760	1152
2 1/2	63,50	3,05	760	1152
3	76,20	3,76	760	1152
3 1/2	88,90	4,11	760	1152

Fuente: Aceros Arequipa

2.16.2 Propiedades químicas de los clavos de acero

En cuanto a la composición química de los clavos por lo general incluye acero al carbono (o acero de bajo carbono, algunas veces con constituyentes de aleaciones).

Tabla 2.14 Composición química del clavo de acero

Composición Química			
% C	% Mn	% P máx	% S máx
0,10 máx	0,3-0,5	0,04	0,05
0,08-0,13	0,3-0,6	0,04	0,05

Fuente: Aceros Arequipa

2.17 Forma de los clavos de acero en el hormigón de investigaciones precedentes

En investigaciones realizadas relacionadas al tema, podemos citar algunas de ellas; como Juárez V. Daniel A. en 2021, utiliza clavos reciclados de 3” y 4” de longitud, en cuanto a la forma de estos, mantenían casi la misma que un clavo normal nuevo, son casi rectos en su mayoría, (Imagen 2.3).

Imagen 2.1 Clavos de 3” y 4“



Fuente: Evaluación de propiedades mecánicas del concreto $f'c = 210\text{kg/cm}^2$ con la adición de clavos reciclados. Juárez V. Daniel A.

Arriola, en 2013, en su investigación utiliza clavos de carpintero 2 ½” sin cabeza doblado de forma manual de manera que tenga la orientación en 3 dimensiones al que denominaron clavo de acero tipo grapa tridimensional.

En estas investigaciones realizadas citados 2.1, se obtuvieron resultados satisfactorios, independientemente de su forma.

2.17.1 Técnicas y productos para quitar el óxido de cualquier tipo de superficie

Para eliminar el óxido del metal hay productos caseros como el vinagre, el bicarbonato, el papel de aluminio o incluso la Coca-Cola, que harán posible quitar el óxido del metal con bastante facilidad, sin embargo, el vinagre que mejor funciona es el “vinagre blanco” (Ada Funes, 2019).

El vinagre blanco y el vinagre de limpieza no son el mismo vinagre. Su principal diferencia reside en el grado de acidez que presenta un tipo de vinagre u otro. El vinagre blanco de

consumo tiene un porcentaje de acidez que se sitúa entre el 3% y el 5%, mientras que el vinagre para limpiar presenta un grado de acidez del 8% (Reverte, 2023).

Su forma de aplicación es la siguiente (Ada Funes, 2019):

- El vinagre blanco diluido en agua, una de vinagre por dos de agua, y sumergiremos el objeto al que le queremos quitar el óxido por lo menos 8 horas.
- Transcurrido este tiempo, lo sacamos del vinagre. Observaremos cómo el óxido se va cayendo con facilidad.

Ante esto, el contenido de ácido acético en el vinagre, ¿qué influencia podría tener sobre el acero y el hormigón? Esta interrogante se desarrolla continuación.

2.17.1.1 Influencia del vinagre blanco (ácido acético) sobre el acero

Antes de desarrollar este punto, ¿Cómo y porque se oxida un clavo?

El hierro se oxida cuando entra en contacto con el oxígeno, pero su proceso de oxidación es generalmente muy lento. Sin embargo, en zonas costeras o de ambiente húmedo, el hierro se oxida antes y en mayor cantidad que en zonas secas. Esto se debe a que la humedad actúa como catalizador de la reacción de oxidación, acelerando y potenciando el proceso de oxidar un clavo. Porque el principal catalizador para la oxidación es el agua. Aunque las estructuras de hierro y acero parecen sólidas para el ojo humano, las moléculas de agua pueden penetrar por brechas microscópicas en el metal (Masferreteria, 2019).

¿Cómo reacciona el hierro oxidado con el vinagre blanco (ácido acético)?

El vinagre es una solución diluida de ácido acético, que es una molécula que contiene los elementos del carbono, hidrógeno, y oxígeno. Es una excelente forma de como quitar el óxido, al interactuar con el ácido (vinagre), el óxido de hierro se destruye y se convierte en sales de hierro, que se pueden eliminar fácilmente.

Pero así también tiende a eliminar la capa protectora de la lana de acero y la temperatura dentro aumenta gradualmente porque la formación de óxido es una reacción química exotérmica, que libera energía en la forma de calor hacia sus alrededores (PPC Group. Fabricante de propiedades químicas. Oct 2021. Ácido acético: propiedades y aplicaciones).

2.17.1.2 Influencia del vinagre blanco (ácido acético) sobre el hormigón

¿Cómo reacciona el hormigón con el vinagre blanco (ácido acético)?

En un estudio realizado que titula “Resistencia química de concretos de activación alcalina: sulfatos y ácidos” por “Valencia-Saavedra; Angulo-Ramírez; Mejía de Gutiérrez.”, se evaluó la resistencia química de un concreto de activación alcalina de Sulfatos y ácidos, basado en Cenizas Volantes y Escoria de Alto Horno, como material de referencia se utilizó un Concreto a base de Cemento Convencional.

De donde se puede rescatar el comportamiento del Concreto a base de Cemento Convencional, que presentan un deterioro disminuyendo su resistencia del hormigón. Esta disminución en los valores de resistencia concuerda con la pérdida de la masa de los especímenes, los concretos sumergidos en la solución de ácido acético ($\text{CH}_3 \text{COOH}$) mostraron pérdidas de peso de alrededor del 14% después de 180 días de exposición para los concretos de control.

De acuerdo con estos resultados, la resistencia a la compresión del concreto presenta una pérdida de resistencia del 60%. Un examen visual de las probetas expuestas a las disoluciones ácidas muestra que los concretos de control, presentan un deterioro severo después de los 90 días de inmersión en ácido acético ($\text{CH}_3 \text{COOH}$).

2.18 Ensayo a flexión

El ensayo a flexión es de uso generalizado para la caracterización del HRF como sustituto del ensayo a tracción directa. Se usa generalmente en procedimientos normalizados para la determinación de los parámetros de resistencia tanto en vigas como en paneles de hormigón (Mármol, 2010).

Tradicionalmente, se utiliza el ensayo de vigas prismáticas sometidas a flexión para caracterizar la resistencia y el comportamiento en el régimen post fisuración del hormigón reforzado con fibras HRF (Carmona, Aguado, Molins, Cabrera. 2009).

2.18.1 Ensayos existentes para medir esfuerzo a la flexión del hormigón

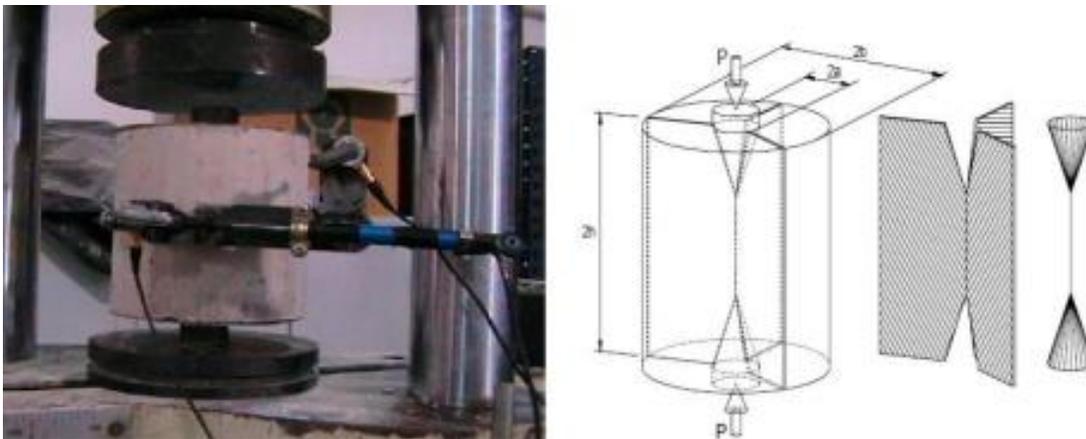
Alternativamente, se ha propuesto el uso de otros ensayos normalizados de tracción directa e indirecta para realizar la caracterización de propiedades de los HRF, pero éstos han resultado ser muy complejos de ejecutar (Mármol, 2010).

Los ensayos comúnmente utilizados y de mayor aplicación en la caracterización del comportamiento son los siguientes:

2.18.1.1 Ensayo Barcelona de doble punzonamiento

Saldes (2006), estudió la aplicación de este ensayo al SFRC. La Instrucción EHE 2008, menciona como un posible procedimiento alternativo de control del SFRC el ensayo Barcelona de Doble punzonamiento. Este método tiene por objeto determinar la resistencia a primera fisura, tenacidad y resistencia residual a tracción indirecta del FRC sobre una probeta cilíndrica de igual diámetro de altura 150 mm que se somete a un ensayo de doble punzonamiento mediante una carga transmitida según el eje central de simetría de la misma. Al cargar se genera un estado triaxial bajo el disco de carga y una tracción perpendicular a los planos que contiene el eje de simetría de la probeta lo que permite obtener un valor de resistencia de tracción (Mármol, 2010).

Figuras 2.7 Ejecución ensayo Barcelona y esquema idealizado del método de ruptura



Fuente: Hormigones con fibra de acero, características mecánicas. Mármol S.

Para realizar este ensayo se requiere una prensa de compresión, un equipo muy común en los laboratorios. Emplea probetas cilíndricas elementos muy comunes para el control de hormigones en obra o de fácil extracción (núcleos).

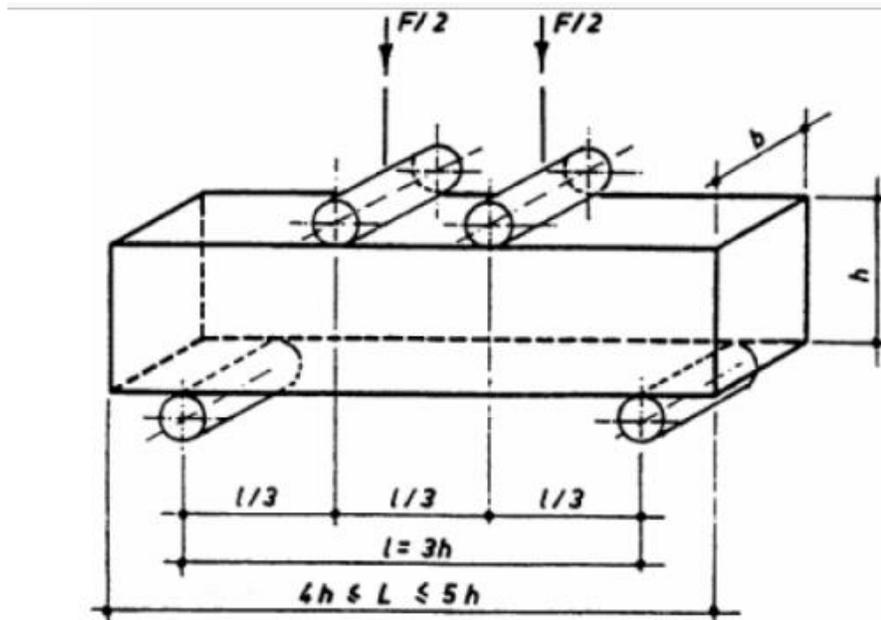
Es necesario realizar una caracterización previa del material con otro ensayo como el de flexo tracción y lograr una equivalencia con el ensayo Barcelona, cuando se desee hacer controles en obra es un ensayo que presenta facilidad de montaje. La carga se aplica a velocidad controlada de elongación en estructura ya existentes circunferencial $1\frac{+}{-}$ mm/min durante todo el ensayo, lo que hace además sea un ensayo rápido de llevar acabo. El ensayo se realiza con las probetas sin refrenar, aplicando la cara directamente sobre la superficie de la caras de las probetas (Mármol, 2010).

2.18.1.2 Ensayo de vigas con carga a los tercios

Existen diferentes normativas específicas para el ensayo de vigas con cargas a los tercios más populares y utilizadas son la Belga (NBN B 15-238, 1992), LA Europea (EFNARC. 1996) y la americana (ASTM C78, 1997).

El ensayo de la viga ASTM con carga a tercios es un ensayo de ejecución que involucra una viga que mide 75x125x550 mm bi apoyada con una luz de 450 mm. Tienen en común estos ensayos que procedimiento involucran una distribución de carga a tercios de la luz de una muestra, con el comportamiento basado en las características del registro carga post fisuración deflexión (Mármol, 2010).

Figuras 2.8 Esquema del ensayo de viga con carga a tercios especificada en la ASTM C 78



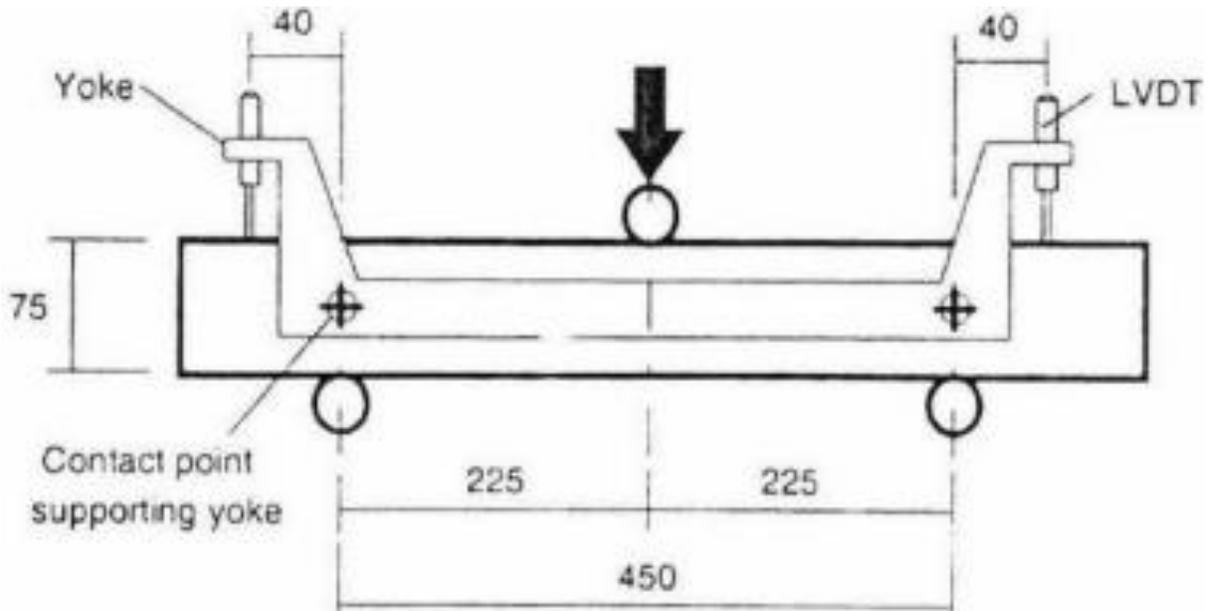
Fuente: Hormigones con fibra de acero, características mecánicas. Mármol S.

Tras varios años de ensayos de control de calidad en base a múltiples ensayos de vigas, se ha llegado a la conclusión de que una de las causas de dicha variación en el comportamiento viene dado por el mismo procedimiento en sí. El área de hormigón que experimenta fallo en una viga es muy pequeña comparada con el volumen del hormigón (Mármol, 2010).

2.18.1.3 Ensayo de vigas con carga central

Según observaciones realizadas por Mateos (1998) para ser estable tras el pico. Centra la fisura, y permite la evaluación real absorbida por la probeta, además de requerir un dispositivo de medida de flecha y de aplicación de carga más simples que los usados en el ensayo de carga a tercios, por lo que representa una alternativa interesante. Por el contrario, el punto de primera fisura, al igual que el ensayo de carga a tercios, no parece de clara determinación en esta configuración de carga (Mármol, 2010).

Figuras 2.9 Configuración del ensayo de viga con carga centrada



Fuente: Hormigones con fibra de acero, características mecánicas. Mármol S.

Respecto al Módulo de Ruptura (máximo esfuerzo por unidad de superficie que puede resistir una muestra sin llegar a romperse cuando somete a flexión, se calcula a partir de la carga de ruptura bajo el supuesto de que la muestra es elástica hasta el momento en que se produce la ruptura y se expresa en MPa) se observa que ambos ensayos se produce a casi el mismo resultado, presentado una fuerte correlación. Sin embargo, el módulo de ruptura del ensayo de viga con carga central es ligeramente mayor en magnitud, posiblemente porque el fallo en este ensayo es forzado a suceder cerca del punto de carga mientras en el ensayo de viga con carga a tercios es libre de aparecer en cualquier parte del tercio central de la muestra, esto permitiría el fallo en el punto más débil de la región central uniformemente tensionada para el último tipo de viga.

La absorción de energía post fisuración para el ensayo de viga de carga central se estima integrándose la relación del momento rotación de fisura ente el punto de fisuración y 0.05 radianes de rotación de fisura. Dicho parámetro se mide con relativo alto grado de deformación ya que una rotación de fisura de 0.05 radianes es equivalente a una deflexión central de 5 mm. Debido al alto grado de deformación, se ha de escoger un parámetro para el

ensayo con carga a tercios que sea comparable con el ensayo con carga central, es decir que mida energías elevadas (Mármol, 2010).

2.18.1.4 Ensayo de paneles EFNARC

Una alternativa de ensayo de resistencia a flexo tracción basado en vigas es mediante el ensayo paneles. Aunque su procedimiento no está exento de problemas, en muchas ocasiones se requieren revestimientos de hormigón proyectado para resistir a cargas puntuales. Por este motivo, es lógico en algunas situaciones cuantificar el comportamiento de los diseños a través de la aplicación de una carga puntual a un panel, el cual representa una parte de un revestimiento continuo (Mármol, 2010).

El ensayo es posible el procediendo más extendido de evaluación, este ensayo involucra la aplicación de una carga puntual en un panel de 100x6000x600mm apoyado simplemente sobre cuatro líneas externas situadas en una base plana cuadrada de 5600x500mm.

El comportamiento en el panel EFNARC se evalúa de dos maneras; medida de la carga máxima mantenida y energía absorbida para una flecha central de 25mm. El primer parámetro no es una característica particularmente útil porque está fuertemente influenciado por la distorsión en la base de la muestra producida por la forma durante el proyectado del hormigón. Esto depende además de la resistencia de la matriz y al menos por lo que hace referencia para mezclas con niveles normales de absorción de energía, este último parámetro se calcula integrado el área que encierra la curva carga desplazamiento. Contra mayor sea la absorción de energía, más capaz será la mezcla de soportar una carga en el estado de fisuración. (Mármol, 2010).

Figuras 2.10 Diferentes configuraciones del ensayo de panel cuadrado



Fuente: Hormigones con fibra de acero, características mecánicas. Mármol S.

Una de las ventajas que presenta este método es la gran superficie de ruptura que se obtiene al ensayar la muestra, lo que hace que la dispersión de los resultados sea menor. Aunque el ensayo ha sido ampliamente aceptado incluye una serie de defectos. El más significativo es la dificultad que implica el intentar reproducir una muestra con la base plana producirá el registro de carga desplazamiento con un único pico y máximo comportamiento posible, cuantificando en términos de absorción de energía entre el inicio de la carga y 25 mm de deflexión central total. Una muestra que no sea plana se deformara de una manera imprescindible a menudo manifestar múltiples picos en la capacidad de carga ya que la tensión es redistribuida de forma desigual alrededor del panel que progresivamente va fisurando y manifestar un comportamiento global de dudosa validez. Esta característica del ensayo no es atractiva desde el punto de vista de ensayos de control de calidad (Mármol, 2010).

2.18.1.5 Ensayo de placas circulares (Round Determinate Panel test)

Desarrollado por Bernard y Pincher, 1999. Propuesto por el comportamiento post pico del HRF. Este ensayo se enfoca principalmente para eliminar los defectos que aparecen en el ensayo de panel EFNARC.

Se impone una carga puntual central en una muestra circular que mide 75mmx800mm apoyadas en tres puntos situadas simétricamente en el diámetro de 750 mm, el uso de tres puntos de apoyo asegura que la distribución asegura la distribución de carga al principio de ensayo este siempre condicionada en la muestra.

Los planos de fisuración se encuentran bien definidos por lo que en consecuencia se puede predecir de manera más real la distribución de cargas. Los valores característicos de desplazamiento del punto medio del panel van desde los 5 mm hasta los 40mm. Sin embargo, dicho comportamiento se ve afectado por el espesor de la muestra. (Mármol, 2010).

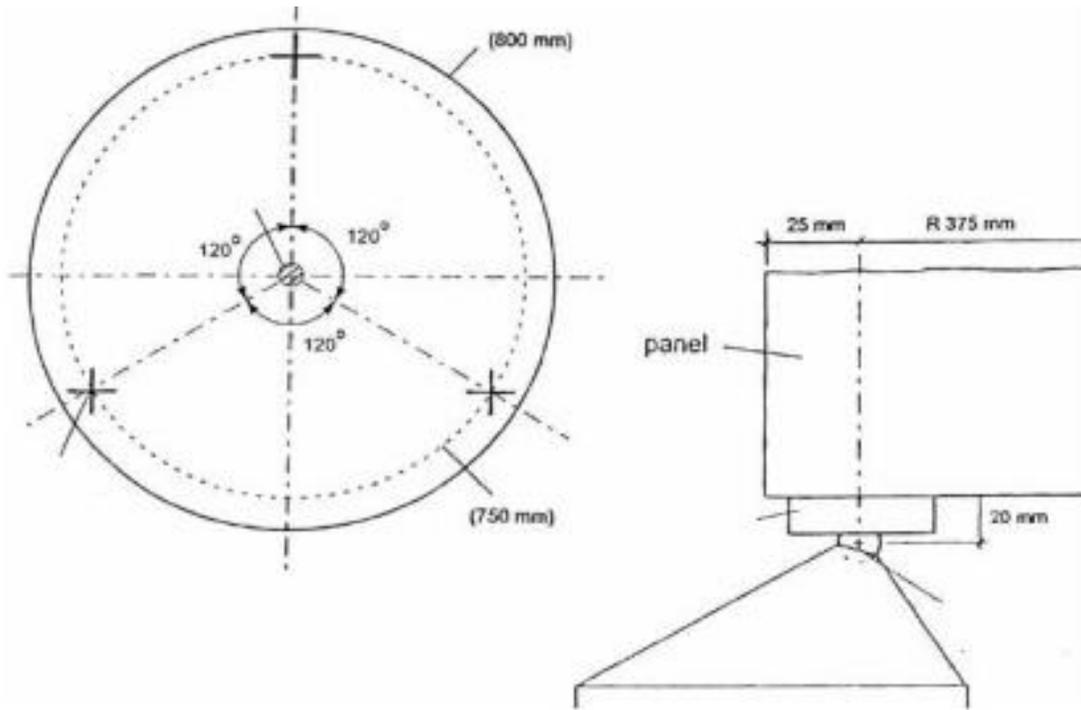
Figuras 2.11 Configuración y ejecución del RPD en laboratorio



Fuente: Hormigones con fibra de acero, características mecánicas. Mármol S.

Bajo la carga central puntual, la muestra casi siempre falla formando tres fisuras casi radiales que empiezan en el centro de la muestra bisecan cada uno de los sectores no apoyados del panel. Este método de fallo sucede sin reparar en las tolerancias de la base de la muestra y la longitud total de la fisura asciende a 1.2 mm. El resultado es el coeficiente de variación en los parámetros de comportamiento post fisuración basados en absorción de energía del 6% al 13% (Mármol, 2010).

Figuras 2.12 Vista en planta y detalle del apoyo del panel



Fuente: Hormigones con fibra de acero, características mecánicas. Mármol S

El comportamiento se ha medido a partir de dos características:

- La capacidad de carga mediante mediciones de carga – flecha.
- La absorción de energía para unos valores concretos de deflexión central.

La energía absorbida por la muestra para un desplazamiento central de 5 mm o 40 mm, se halla integrado la curva carga deflexión hasta dichos puntos. Estas cantidades son un reflejo directo de post fisuración.

Una de las desventajas que presenta este método es que el ensayo es de difícil aplicación sistemática debido al tamaño y el peso final de la muestra, ya que es este de 90 kg de peso aproximadamente. Estudios demuestran que pequeños cambios en el espesor de la muestra produce variaciones en el comportamiento para una deflexión central dada tanto en términos pico y capacidad residual de carga como la absorción de energía (Mármol, 2010).

CAPÍTULO III

MARCO

METODOLÓGICO

3 CAPÍTULO III DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Selección de resistencia de diseño

La importancia de considerar los requisitos de durabilidad al seleccionar la resistencia especificada a la compresión del hormigón, las razones pueden requerirse para hormigones expuestos a condiciones de congelación y deshielo, a suelos y aguas con sulfatos, o para prevenir la corrosión de la armadura, típicamente son equivalentes a requerir un valor de f'_c de 28 a 35 MPa (ACI 318 - 19).

Sin embargo, no se presentarán estos tipos de condiciones en nuestro medio, por tanto, podría considerarse un tipo de agresión moderada de acuerdo a al siguiente tabla de referencia, para el presente trabajo una resistencia de diseño de 250 kg/cm².

Tabla 3.1 Recomendaciones de durabilidad para una vida útil de 100 años (agregado de 20 mm)

Agresión del medio ambiente	Clase de concreto por durabilidad	Nivel de resistencia (Kg/cm ²)
Muy severa	Durable	>350
Severa	Resistente	280 - 350
Moderada	Normal	210 - 280
Ligera	Pobre	100 - 210

Fuente: Construcción y Tecnología en Concreto. IMCYC

3.2 Determinación del número de probetas

En particular, las cantidades estadísticas determinadas directamente a partir de la muestra se pueden utilizar como estimadores de las propiedades correspondientes de la distribución. Adicionalmente también se menciona el promedio de resistencia de 30 muestras para calcular la desviación estándar para que el análisis estadístico sea representativo (Tecnología del Hormigón, Sánchez de Guzmán), Dicho de ese modo, no es la manera que se realizará por falta de presupuesto.

3.3 Población

Se quiere valorar las características de los materiales mediante ensayos de laboratorio para la presente investigación. Las fases de la investigación se encuentran en la tabla 3.2, todos los trabajos terminan en ensayos de laboratorio, por lo tanto, se estiman cantidades de ensayos de acuerdo a sus características propias.

Tabla 3.2 Ensayos a realizarse en la investigación

Fase de la investigación	Ensayos	Ni
Caracterización de los materiales	Método para tamizar y determinar la granulometría (ASTM 136)	5
	Peso unitario de agregado grueso y fino (ASTM C 29)	5
	Método para y determinar el peso específico y la absorción de agua en agregados gruesos (ASTM C 127)	5
	Método para y determinar el peso específico y la absorción de agua en agregados finos (ASTM C 128)	5
	Peso Específico del cemento (ASTM 188)	5
	Finura del cemento (ASTM 184)	5
	Prueba de resistencia del hormigón	Resistencia a la compresión 250 Kg/cm ²
Prueba de resistencia del hormigón reforzado	Vigas para resistencia a flexión sin adición de clavos	5
	Vigas para resistencia a flexión con adición de clavos de 9%	15
	Vigas para resistencia a flexión con adición de clavos de 12%	15
	Vigas para resistencia a flexión con adición de clavos de 15%	15
Total ensayos		85

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1 Tamaño de la muestra

3.3.1.1 Muestreo estratificado

El muestreo estratificado es una técnica o procedimiento en la que se divide la población bajo estudio en distintos subgrupos o estratos. Una característica esencial de la estratificación es que cada elemento debe pertenecer a un único estrato (Manterola, 2017).

Para calcular el tamaño de muestra de una población desconocida, donde el investigador necesite un nivel de confianza, un margen de error y se desconoce la probabilidad “p” del evento que se está estudiando, sigue la siguiente fórmula:

La técnica de muestreo es probabilística (aleatorio).

Desarrollo

Unidad elemental de la muestra:

El ensayo de la muestra. Población:

N= 85 ensayos establecidos para la investigación.

Tamaño de la muestra “n”: desconocido

Variable a medir: Características de los materiales, medición de la resistencia a compresión y resistencia a flexión.

Cálculos y análisis previos

Para la aplicación previa de la técnica de muestreo determinamos la varianza “ σ ” que va en función del tiempo se optó por 0,10; e; análisis de la varianza depende del tiempo que se emplea en realizar el estudio (Yurquina Flores, s.f.).

Tabla 3.3 Variables de la varianza en función al tiempo

Variables de la varianza en función del tiempo	
Varianza " σ "	Descripción
0,25	Investigaciones que requieren mayor cantidad de tiempo y muestra
0,15	Investigaciones que requieren en promedio 6 meses de tiempo
0,10	Investigaciones que requieren en promedio 4-6 meses de tiempo

Fuente: “Libro de proyecto grado CIV-501” Msc. Ing. Luis Yurquina.

Una investigación es exigente y por lo menos se tiene que establecer como nivel de confianza del 95 %.

El valor de significancia que se toma está de acuerdo al nivel de confianza. (Yurquina Flores).

Tabla 3.4 Nivel de confianza

Grado de Confiabilidad	Valor Estandarizado
99	2.58
95	1.96
90	1.64

Fuente: “Libro de proyecto grado CIV 501” Msc. Ing. Luis Yurquina

El margen de error es: $e = 5\%$, deducido por el nivel de confianza que propone el investigador.

$$n = \frac{N_i * \sigma^2}{N * \left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{N_i * \sigma^2}{N}} \text{ Ec. 3.1}$$

Donde:

N_i = Tamaño de la población finita

n = Número total de muestras

σ^2 = Varianza

e = Error de tolerancia (generalmente 5 %)

z = Nivel de significancia 1.96 (95%)

f_i = Tamaño de la muestra/número total de muestras

Tabla 3.5 Número de ensayos a realizar en laboratorio

Ensayos	Ni	σ^2	$Ni*\sigma^2$	fi	ni
Método para tamizar y determinar la granulometría (ASTM 136)	5	0,1	0,5	0,0588	3,0
Peso unitario de agregado grueso y fino (ASTM C 29)	5	0,1	0,5	0,0588	3,0
Método para y determinar el peso específico y la absorción de agua en agregados gruesos (ASTM C 127)	5	0,1	0,5	0,0588	3,0
Método para y determinar el peso específico y la absorción de agua en agregados finos (ASTM C 128)	5	0,1	0,5	0,0588	3,0
Peso Específico del cemento (ASTM 188)	5	0,1	0,5	0,0588	3,0
Finura del cemento (ASTM 184)	5	0,1	0,5	0,0588	3,0
Resistencia a la compresión 250 Kg/cm ²	5	0,1	0,5	0,0588	3,0
Vigas para resistencia a flexión sin adición de clavos	5	0,1	0,5	0,0588	3,0
Vigas para resistencia a flexión con adición de clavos de 9%	15	0,1	1,5	0,1765	10,0
Vigas para resistencia a flexión con adición de clavos de 12%	15	0,1	1,5	0,1765	10,0
Vigas para resistencia a flexión con adición de clavos de 15%	15	0,1	1,5	0,1765	10,0
	85		8,5		55,0

Fuente: Elaboración propia

$$n = \frac{8.5}{85 * \left(\frac{0.05}{1.96}\right)^2 + \frac{8.5}{85}} = 55 \text{ ensayos}$$

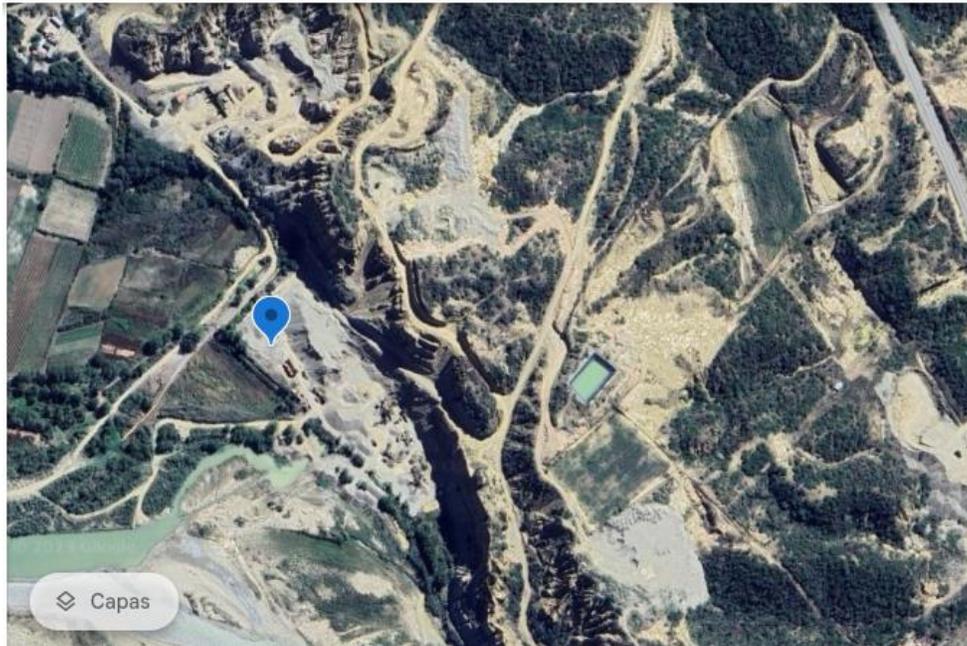
3.3.2 Selección del tamaño máximo nominal.

En base a la recomendación citada del agregado grueso en el Cap. II, se adopta trabajar con un tamaño máximo nominal de ¾ pulg. (19 mm).

3.4 Procedencia de agregados

El agregado fue adquirido de una planta chancadora La Ventolera, ubicada en la comunidad del mismo nombre de la chancadora, a una distancia de 26 km de la ciudad de Tarija. Con las coordenadas siguientes. Latitud: 21°41'22" S, Longitud: 64°36'43"O.

Imagen 3.1 Planta chancadora de áridos La Ventolera



Fuente: Elaboración propia

3.5 Cuarteo y reducción de muestras de agregados a tamaño de ensayo

El método para realizar la extracción y preparación de las muestras se lo realizó con la norma ASTM C 75, método que establece los procedimientos para extraer y preparar las muestras representativas de áridos grueso y finos, se aplica tanto a áridos naturales y manufacturados. Para ello se debe reducir por cuarteo de acuerdo a la norma ASTM C 702 hasta obtener una cantidad de al menos el doble de la requerida en la muestra de laboratorio, la cual depende del tipo y número de ensayos a los cuales será estudiado (ASTM C 75).

Se debe mezclar bien el material hasta formar una pila en forma de cono; revuelva de nuevo hasta formar un nuevo cono se debe repetir esta operación tres veces; posterior a ello se debe distribuir con una pala tan uniformemente como sea posible sobre una lona u otra superficie lisa, plana y ancha; se debe dividir el montón en cuatro partes iguales, con una pala de borde recto o una plancha de metal.

Imagen 3.2 Obtención de los áridos y método de Cuarteo del agregado



Fuente: Elaboración propia

3.6 Estudio de las propiedades de los agregados

Se emplearán en los siguientes ensayos para demostrar si el agregado utilizado cumple con las propiedades mecánicas y si es apto para la elaboración del hormigón. A continuación los Tipos de Ensayos que se realizaran a los materiales, con las respectivas normas:

Tabla 3.6 Ensayos que se realizaron a los materiales

ENSAYOS QUE SE REALIZARON A LOS MATERIALES			
MATERIAL ENSAYO	GRAVA	ARENA	NORMA
Análisis Granulométrico	Si	Si	ASTM C-136
Densidad aparente suelto	Si	Si	ASTM C-29
Densidad aparente compactado	Si	Si	ASTM C-29
Densidad real agregado SSS	Si	Si	ASTM C-127 - 128

Fuente: Elaboración propia

3.6.1 Análisis granulométrico

El método de Ensayo para granulometría se describe en la ASTM C-136, es un proceso de tamización, que se realiza para determinar la distribución de los tamaños de las partículas que forman parte de una muestra de agregados, usando una serie de tamices y se expresa

como el porcentaje en peso de cada tamaño con respecto al peso total. Se escoge el Tamaño Nominal Máximo (TNM), según la obra o proyecto a desarrollarse (Díaz, 2005).

3.6.1.1 Granulometría del agregado grueso

Tiene como principal objetivo el poder determinar el diámetro máximo de partículas y la distribución de tamaño en el agregado, método que abarca un procedimiento de diferenciación de los tamaños, utilizando tamices de aberturas cuadradas.

El procedimiento del ensayo se detalla en anexo 1.

Tabla 3.7 Tamices de aberturas nominales en mm, según la ASTM

Tamaños nominales de abertura	
Mm	ASTM
75	(3'')
63	(2 ½'')
50	(2'')
37,5	(1 ½'')
25	(1'')
19	(¾'')
12,5	(½'')
9,5	(⅜'')
6,3	(¼'')
4,75	(N°4)
25	(N°8)
2	(N°10)
1,18	(N°16)
0,6	(N°30)
0,3	(N°50)
0,15	(N°100)
0,075	(N°200)

- Fuente: Manual de Ensayos de suelos y materiales, hormigones. Vol. 4 ABC.

Se usaron los siguientes tamices que de acuerdo a norma Americana establece:

Tabla 3.8 Valores límites para la curva granulométrica del árido grueso

N°	TAMIZ	LÍMITES %	
1	2"	100	100
2	1 1/2"	95	100
3	1"	-	-
4	3/4"	35	70
5	1/2"	-	-
6	3/8"	10	30
7	N° 4	0	5
8	N° 8	-	-

Fuente: Manual de Ensayos de suelos y materiales, hormigones. Vol. 4 ABC.

Cabe resaltar que los valores límite de la curva granulométrica para agregados gruesos se selecciona según el TNM.

3.6.1.2 Granulometría del agregado fino

Con el objeto de determinar la distribución de tamaños de las partículas en el agregado fino método que abarca un procedimiento de diferenciación de los tamaños , utilizado tamices de aberturas cuadradas siendo también aplicable al empleo de cribas de laboratorio de aberturas circulares A partir del análisis granulométrico también se determinará el módulo de finura del agregado fino. (Díaz, 2005)

El procedimiento del ensayo se detalla en anexo 2.

Tabla 3.9 Tamizado del agregado fino en la maquina tamizador mecánico

N°	TAMIZ	LÍMITES %	
1	3/8"	100	100
2	N° 4	95	100
3	N° 8	80	100
4	N° 16	50	85
5	N° 30	25	60
6	N° 50	10	30
7	N° 100	2	10

- Fuente: Manual de Ensayos de suelos y materiales, hormigones. Vol. 4 ABC.

3.6.1.2.1 Módulo de finura

Las arenas suelen caracterizarse con su módulo de finura, que es el número que da una idea de la granulometría del material. A mayor módulo de finura, más gruesa es la arena. El tener una distribución por tamaños adecuada hace que los huecos dejados por las piedras más grandes sean ocupados por las del tamaño siguiente, es decir, que la cantidad de huecos dejada por los agregados sea mínima logrando la máxima "compacidad"(Díaz, 2005).

Se calcula dividiendo la sumatoria de los porcentajes de pesos retenidos en cada tamiz entre 100

$$M.F. = \frac{\sum \% Ret. (N^{\circ}4, N^{\circ}8, N^{\circ} 16, N^{\circ}30, N^{\circ}50, N^{\circ}100)}{100} \text{ Ec. 3.2}$$

3.6.2 Peso específico y absorción de los agregados

3.6.2.1 Agregado grueso

Establece determinar del peso específico aparente y del peso específico a granel. Este valor es necesario para determinar la cantidad de agregado grueso que puede ser acomodado en una mezcla de hormigón, lo mismo que la cantidad de agua expresada como porcentaje que absorbe el grueso cuando se sumerge en agua por un período de 24 Horas.

Esta es la densidad más importante para calcular la dosificación del hormigón; este valor depende de la densidad de los componentes minerales y su porosidad del agregado. A pesar de que la densidad se usa para el cálculo de cantidades del agregado dentro del hormigón y que generalmente un valor alto de densidad, implica un agregado de alta resistencia el valor de la densidad no es necesariamente una medida de la calidad del agregado (Díaz, 2005).

El procedimiento del ensayo se detalla en el anexo 3.

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{A}{B - C} \text{ Ec. 3.3}$$

Donde:

A= Peso de la muestra secada en Kg.

B= Peso de la muestra saturada con superficie seca en Kg.

C= Peso de la muestra saturada dentro del agua en Kg

$$\text{Peso específico en condición saturado y superficie seca} = \frac{B}{B - C} \text{ Ec 3.4}$$

(B-C) = Este término es la pérdida de peso de la muestra sumergida y significa por lo tanto el volumen de agua desplazado, o sea, el volumen de la muestra

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{A - C} \text{ Ec 3.5}$$

$$\% \text{ absorción} = \frac{B - A}{B} \text{ Ec 3.6}$$

3.6.2.2 Agregado fino

Tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico a granel, lo mismo que el porcentaje de absorción del agregado fino después de 24 horas de inmersión en agua a temperatura ambiente. El peso específico a granel en la condición de saturado y superficie seca es el valor que generalmente se aplica en la dosificación de hormigones, se seleccionará aproximadamente 2 Kg de agregado fino para realizar el ensayo. (Díaz, 2005) El procedimiento del ensayo se detalla en anexo 4.

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{A}{V - W} \text{ Ec. 3.7}$$

Donde:

A= Peso de la muestra secada en el horno Kg.

V= Volumen del frasco en ml.

C= Peso del agua agregado al frasco Kg

$$\text{Peso específico en condición saturado y superficie seca} = \frac{500}{V - W} \text{ Ec 3.8}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{(V - W) - (500 - A)} \text{ Ec 3.9}$$

$$\% \text{ absorción} = \frac{500 - A}{A} * 100 \text{ Ec 3.10}$$

3.6.3 Peso unitario de los agregados

3.6.3.1 Agregado grueso

Este ensayo tiene como objetivo describir cómo se puede obtener el peso unitario suelto y compactado del agregado grueso a la temperatura ambiente, incluye los poros impermeables, pero no incluye a los capilares o poros permeables que puedan existir. El procedimiento para la determinación de esta propiedad del agregado, se describe según en la Norma ASTM C-29. (Díaz, 2005)

El peso neto del agregado dentro del molde se obtiene restando el peso del molde del peso de la muestra compactada más molde. El peso por unidad de volumen de la muestra se obtiene multiplicando su peso neto por el inverso del volumen del molde. (Díaz, 2005)

El procedimiento del ensayo se detalla en anexo 5.

$$Pu = \frac{Pn}{V} \text{ Ec 3.11}$$

Donde:

Pu= Peso unitario

Pn= Peso neto del agregado

V= Volumen calibrado del molde

3.6.3.2 Agregado fino

Tiene como objetivo describir cómo se puede obtener el peso unitario suelto y compactado del agregado fino a la temperatura ambiente. El peso neto del agregado dentro del molde se obtiene restando el peso del molde del peso de la muestra compactada más molde. El peso por unidad de volumen de la muestra se obtiene multiplicando su peso neto por el inverso del volumen del molde. (Díaz, 2005)

El procedimiento del ensayo se detalla en anexo 6.

3.6.4 Peso específico del cemento

Este ensayo tiene por objetivo presentar un método para determinar el peso específico del cemento, el valor que aquí se determina se usa específicamente para el diseño y control de la producción de la mezcla de hormigón, para la prueba se toman 64 gr, el peso específico del cemento. (Díaz, 2005)

$$P.E. = \frac{\text{Peso del cemento en gramos}}{\text{Volumen desplazado}} \quad Ec \ 3.12$$

3.6.5 Finura del cemento

El objeto de esta práctica es la determinación de la finura del cemento, por medio de métodos mecánicos, en este caso con el uso del tamiz de malla N ° 200, para la prueba se toman 50 gr

$$F = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100 \quad Ec \ 3.13$$

3.7 Uso de los clavos de acero

Son empleados mayormente en rubros tales como albañilería (encontrados), para el clavado de postes como puntales, machimbres, maderas en general, etc. (Clavos y Alambres Victoria S.R.L.)

Imagen 3.3 Procedencia del uso de los clavos, en puntales y encofrado



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.4 Clavos desechados en obra



Fuente: Elaboración propia

3.7.1 Forma y tamaño de clavos reciclados a utilizar

La medida de clavos más empelada en las obras es de longitud de 2 ½". Es así que en tamaño se tendrá igualdad de estos.

Imagen 3.5 Recolección de clavos



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la forma que presentan estos, al ser reciclados presentan configuración un tanto aleatoria, es decir; unas estas rectas, semi rectas, otras curvadas levemente. A continuación las formas más predominantes:

Imagen 3.6 Clavos de 2 ½” de tamaño, recolectado de obras de construcción“



Fuente: Elaboración propia

Fuera necesario hacer una clasificación más detallada si es que presentaran formas más aleatorias, dobladas en 2 o más ejes, sin cabeza, partidas, etc, pero este no será el caso.

3.8 Comparación de las características de las fibras de acero vs los clavos de acero

Los clavos usados en obras de construcción cumplen características cuantificables, en comparación de las características geométricas, mecánicas y químicas de las fibras de acero.

Tabla 3.10 Características geométricas de las fibras de acero y de los clavos de acero

Característica		Unidad	Fibra de acero	Clavo de acero
Geométrica	Longitud	mm	12,7-75	63,5
Geométrica	Díámetro	mm	0,25-1,1	3
Geométrica	Esbeltez(l/d)	mm/mm	20-100	21

Fuente: Elaboración tomada a partir de Aceros Arequipa y ACI 544.3R-08

Tabla 3.11 Características mecánicas de las fibras de acero y de los clavos de acero

Tipo de acero	Resistencia a Tracción(MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Densidad (kg/m3)
Fibra de acero	345	210	7800
Clavo de acero	760	207	7900

Fuente: Elaboración propia en base a información la ASTM A 820 y Aceros Arequipa

En cuanto a la composición química de los clavos por lo general incluye acero al carbono (o acero de bajo carbono, algunas veces con constituyentes de aleaciones), tienen semejanza en la composición de las fibras de acero que son de material de acero de bajo carbono.

Tabla 3.12 Composición química de la fibra de aceros vs clavos de acero

Tipo de acero	Composición Química			
	%C	% Mn	% P máx	% S máx
Clavo de acero	0,08-0,13	0,3-0,6	0,04	0,05
Fibra de acero	0,69-0,76	0,40-0,60	0,025	0,15-0,30

Fuente: Elaboración tomada a partir de Aceros Arequipa y Comportamiento mecánico del hormigón con fibras metálicas, Carles Puig B.

De esta manera es que se trata de asemejar dichas características que tienen las fibras de acero vs clavos de acero.

3.9 Tratamiento del óxido de los clavos reciclados

Los clavos ser recolectado de obras de construcción, estos vienen en condiciones oxidadas superficialmente, para que los clavos puedan estar exentos en lo posible del óxido, el tratado se realiza con vinagre blanco.

Imagen 3.7 Tratamiento del óxido con vinagre blanco



Fuente: Elaboración propia

Ante los referentes citados en 2.17.1.1, el hormigón no tendría contacto directo con el ácido acético, ni mucho menos estaría inmerso en ácido acético para presentar esos deterioros.

Por otra parte, los clavos de acero reciclados, el uso vinagre blanco (ácido acético) es con el fin de eliminar el óxido superficial, por un corto tiempo y no así por tiempos prolongados de sumersión. Además, como se puede adquirir el vinagre blanco en la mayoría de las tiendas de comestibles, en esta forma, el ácido acético está presente en concentraciones muy bajas, ya que, en su estado puro, o la llamada esencia acética, es una sustancia corrosiva. No afectaría en el deterioro de su composición de los clavos.

3.10 Preparación del hormigón

Abarca el procedimiento de preparación del hormigón, el mismo que se realizó en el laboratorio, bajo un control riguroso de las cantidades de materiales y condiciones de ensayo (Laboratorio de Hormigón Dpto. de Estructuras y Ciencias de los Materiales)

3.10.1.1 Preparación de los materiales

- El cemento se almacena en un lugar seco del laboratorio, a prueba de humedad.
- Los agregados para cada preparación de hormigón deben estar de acuerdo con la granulometría deseada.

3.10.1.2 Pesaje de materiales

Todos los materiales que conformarán la mezcla de hormigón deben ser pesados en balanzas precisas y sensibles al gramo. Por su parte los clavos también luego que se trate su óxido.

Imagen 3.8 Pesaje de los materiales



Fuente: Elaboración Propia

3.10.1.3 Mezclado del hormigón

El hormigón será mezclado en una hormigonera mediana, la misma que era adecuada para la cantidad de hormigón que se debe preparar (Laboratorio de Hormigón Dpto. de Estructuras y Ciencias de los Materiales, 2019). El orden y manera de introducir los materiales a la hormigonera activada para obtener una mezcla homogénea y satisfactoria:

- Se introduce la mitad del agua necesaria, para posterior a ello incorporar la mitad de la grava de manera que esta se humedezca.
- Posterior a lo anterior se incorporan la mitad de arena y luego la de cemento, para que estas sean mezcladas hasta un estado homogéneo.

- Luego se debe añadir las cantidades restantes de los materiales en la misma secuencia que se indica en los pasos anteriores, y por último los clavos.

El método anteriormente indicado es un buen parámetro para lograr una mezcla satisfactoria, a menos que un procedimiento diferente se adapte mejor a la hormigonera que se está utilizando.

Imagen 3.9 Elaboración del hormigón



Fuente: Elaboración Propia

3.10.1.4 Vaciado y moldeo de vigas de hormigón para el ensayo de flexión

Las vigas Standard para el ensayo de flexión son de forma prismática rectangular de sección transversal de 15 cm por 15 cm y de un largo de 50 cm, mismas que son elaboradas en madera conformada, en su interior serán pasadas con aceite sucio de auto para tratar de evitar que el hormigón fresco se pegue durante su endurecimiento al molde de madera:

- El hormigón será colocado en tres capas de acuerdo a la altura de la sección transversal de cuerdo a la práctica y cada capa se golpea y penetra con una barra

metálica 50 veces. Para la capa superior el molde deberá llenarse en exceso, hasta excederlo y garantizar la cantidad necesaria para la viga.

- Después de que cada capa es golpeada y penetrada con la barra, el hormigón es enrasado a lo largo de los cuatro lados.
- Los costados de los moldes se golpearán ligeramente e insistentemente para cerrar los vacíos.
- Después de completar las operaciones de consolidación indicadas antes, la capa superior o final se debe nivelar con una plancha y alisarlo.

Imagen 3.10 Llenado de vigas con hormigón fresco



Fuente: Elaboración Propia

3.10.1.5 Curado de las muestras ASTM C 192

El curado de las muestras se realizó en el interior del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la UAJMS. Los especímenes deben desencofrarse 24 horas después de ser moldeados; posterior a ello se realiza el curado en la piscina de agua durante los días de ensayo a los que serán sometidos.

3.11 Probetas para el ensayo a compresión

Los resultados de los ensayos de resistencia de los cilindros de hormigón son usados como la base de aceptación del hormigón premezclado cuando se especifica una resistencia.

Con relación a los valores de la tabla 4.3 en proporciones de peso, se procede a la elaboración de probetas cilíndricas que serán sometidas a ruptura a compresión, según la ASTM C-39, a los 7 días, y posteriormente proyectarlas a los 28 días de resistencia.

Imagen 3.11 Ensayo de compresión de las probetas del hormigón realizado en la máquina universal



Fuente: Elaboración propia

Se presenta a continuación una tabla resumen:

Tabla 3.13 Valores del ensayo de resistencia a compresión del hormigón

N°	Identificación	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad en Días	Resistencia	
					Sin proyectar (Mpa)	Proyectada a 28 días (Kg/cm ²)
1	M1	10/5/2023	17/5/2023	7	19,70	273,50
2	M2	10/5/2023	17/5/2023	7	20,05	278,30
3	M3	10/5/2023	17/5/2023	7	20,43	283,60
4	M4	10/5/2023	17/5/2023	7	19,88	275,90
5	M5	10/5/2023	17/5/2023	7	21,40	297,10

Fuente: Elaboración propia

Dando como resultados una proyección de la resistencia a compresión promedio de 281,7 kg/cm², lo cual es un valor superior a la resistencia de diseño establecida $f'_c = 250$ kg/cm².

Imagen 3.12 Ruptura de probetas cilíndricas a compresión realizada en la máquina universal



Fuente: Elaboración propia

3.12 Vigas para el ensayo de flexión con adición de clavos de acero reciclado

Se realizaron 3 diferentes dosificaciones en porcentaje de 9%, 12% y 15% de clavos, de los cuales se hicieron 15 vigas de cada porcentaje, para romper 5 de cada porcentaje a las edades de 7, 21 y 28 días, 5 de cada porcentaje para respectivamente, esto para ver la progresión de la evolución de la resistencia a flexión del hormigón con este tipo de adición. Por motivos de presupuesto se optó por obviar los ensayos a los 7 y 21 días de las vigas patrón (sin adición de clavos).

Tabla 3.14 Cantidad de vigas de hormigón prismáticas a ensayar

Cantidad de vigas de ensayo para la resistencia a la flexión del hormigón			
Edad del hormigón(días)	7	21	28
Probetas patrón	-	-	5
Probetas con adición de 9 % de clavos	5	5	5
Probetas con adición de 12 % de clavos	5	5	5
Probetas con adición de 15 % de clavos	5	5	5
Total		50	

Fuente: Elaboración propia

3.13 Ensayo de resistencia a flexión del hormigón ASTM C 78 - 02

La máquina de ensayo utilizada es una prensa hidráulica de flexión, perteneciente al laboratorio hormigones de la UAJMS, la misma que proporciona una velocidad de carga adecuada, empleando placas de acero que aseguren que las fuerzas aplicadas a la viga sean perpendiculares a la cara de la probeta y aplicadas, a continuación, se describe la secuencia de pasos para realizar la ruptura de las muestras.

- Transcurrido el tiempo de días respectivos de ensayo de ruptura se procede a sacar las muestras de la piscina, se la debe hacer secar durante 24 horas para proceder con el ensayo de compresión.
- Una vez transcurrido las 24 horas del paso anterior se procede a pesar las muestras y a medir las dimensiones de la misma.
- Se procede a introducir los datos en la prensa hidráulica, e iniciar con la ruptura de la muestra.
- Se debe colocar placas de acero que aseguren que las fuerzas aplicadas a la viga sean perpendiculares a la cara de la probeta
- Se registra los datos de la fuerza y presión, que son obtenidos de la prensa hidráulica.

La resistencia a la flexión del hormigón se expresa como “Módulo de Rotura” (MR) en MPa, la siguiente ecuación es para poder determinar dicho valor:

$$MR = \frac{P * L}{b * h^2} \text{ Ec. 3.1}$$

MR = Módulo de Ruptura

P = Es la carga máxima de rotura (N)

L = Es la luz libre entre apoyo (mm)

b = Es el ancho del molde-Viga (mm)

h = Es la altura del molde-Viga (mm)

Imagen 3.13 Ensayo de flexión realizado en la máquina universal



Fuente: Elaboración propia

3.13.1 Muestra patrón

Para ello se elaboraron 5 vigas prismáticas sin la adición de clavos que serán de referencia para luego romper a los 28 días.

Tabla 3.15 Resumen de valores de Módulo de Ruptura, muestra patrón

N°	Identificación	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad en Días	Carga "F" (KN)	Resistencia	
						MPa	Kg/cm ²
1	M1	2/5/2023	30/5/2023	28	23,70	3,18	31,80
2	M2	2/5/2023	30/5/2023	28	24,61	3,17	31,70
3	M3	2/5/2023	30/5/2023	28	22,80	2,87	28,70
4	M4	2/5/2023	30/5/2023	28	24,30	3,24	32,40
5	M5	2/5/2023	30/5/2023	28	24,10	3,11	31,10

Fuente: Elaboración propia

Dando como resultado el Módulo de Ruptura promedio de 31,11 kg/cm² que es el valor patrón de referencia a la edad del hormigón de 28 días de resistencia.

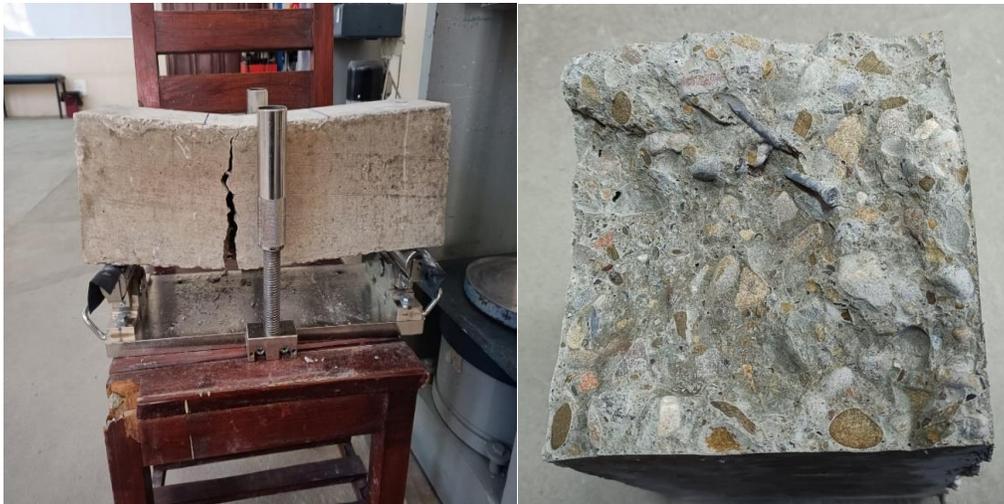
Imagen 3.14 Ruptura de vigas de prueba



Fuente: Elaboración propia

Se elaboraron 45 vigas prismáticas, de las cuales 15 serán para cada porcentaje, 9%, 12% y 15 % de adición de clavos, 5 de cada porcentaje serán sometidas a la ruptura a las edades de 7, 21 y 28 días respectivamente. El cálculo Módulo de Ruptura se presenta en el Anexo 12.

Imagen 3.15 Ensayo de ruptura a flexión de vigas con adición de clavos reciclados



Fuente: Elaboración propia

3.14 Análisis de costos

Se contempla el precio unitario de cada material obtenido de cotizaciones directas del mercado, los agregados traídos desde la planta Chancadora “La Ventolera” hasta el radio

urbano de la ciudad de Tarija, el cemento adquirido desde una comercializadora.

Tabla 3.16 Análisis de precios unitarios para 1 m³ de hormigón reforzado con clavos

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
Proyecto :					
Actividad:	Hormigón Reforzado con clavos			Unidad:	m ³
1. MATERIALES					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo total	
Cemento	Kg	370,00	0,88	326	
Grava	m ³	0,61	181,49	110,00	
Arena	m ³	0,30	421,19	125,00	
Vinagre blanco	lt	6,60	5,45	36,00	
				Total materiales (Bs)	597
2. MANO DE OBRA					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo total	
Albañil	hr	18	15	270	
Ayudante	hr	12	11,25	135	
Recolector	hr	16	10	160	
				Sub Total mano de obra (Bs)	565
Cargas Sociales 65% del sub total M. O.				367,25	
Impuestos IVA M.O. = 14,94% (del Sub Total de M. O. + Cargas Sociales)				139,28	
				Total Mano de Obra (Bs)	1071,5
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo total	
Mezcladora	hr	1	22	22	
Vibradora	hr	0,8	15	12	
Herramientas Menores 5 % de la mano de obra					
				Total Eq, Maq. y Herr.(Bs)	53,6
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo total	
Gastos Generales 10%					
				Total Gastos Generales (Bs)	172,2
5. UTILIDAD					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo total	
Utilidad 10%					
				Total Utilidades (Bs)	189,4
6. IMPUESTOS					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo total	
Impuestos a las Transacciones 3,09%					
				Total Gastos Generales (Bs)	64,4
				Total Precio Unitario para 1m³ de hormigón (Bs)	2148

Fuente: Elaboración propia

La exclusión del material de clavos reciclados en el análisis de precio unitario, es debido a que se recolecta de obras en construcción, pero sí se contempla la mano de obra, es decir; un tiempo estimado en el recojo de los clavos.

CAPÍTULO IV
MARCO PRÁCTICO

4 CAPÍTULO IV MARCO PRÁCTICO

4.1 Presentación de resultados de los ensayos

En la tabla 4.1 se muestran los resultados de los ensayos de caracterización.

Tabla 4.1 Datos de los ensayos de laboratorio realizados a los materiales

Ensayo	Unidad	Valor
1.- Módulo de finura de la arena (MF)	s/u	3,0
2.- Peso unitario compactado de la grava (PUC)	gr/cm ³	1,66
3.- Peso específico de la arena (γ_f)	gr/cm ³	2,53
4.- Peso específico de la grava (γ_g)	gr/cm ³	2,60
5.- Absorción de la arena (Aar)	%	2,24
6.- Absorción de la grava (Agr)	%	1,18
7.- Humedad de la arena (Har)	%	1,14
8.- Humedad de la grava (Hgr)	%	1,02
9.- Tamaño Máximo Nominal (TMN)	pulg	3/4"
10.- Tamaño Máximo (TM)	pulg	1"
11.- Peso específico del cemento	gr/cm ³	3,15

Fuente: Elaboración propia

4.1.1 Dosificación

Los métodos para el diseño de mezclas de hormigón (diferentes al A.C.I.) utilizados, son comúnmente empíricos o se basan en el método convencional A.C.I.; esto hace que el método A.C.I. sea por un lado el método de dosificación de concreto más usado a nivel mundial y por otro lado el más exacto a la hora de calcular las proporciones de los ingredientes de la mezcla; además el método ACI considera abrasivas para la durabilidad de la mezcla (Ávila, 2016).

El establecimiento de los pesos de la mezcla por metro cubico de hormigón puede obtenerse mediante la siguiente secuencia:

Tabla 4.2 Procedimiento de dosificación

Pasos	Descripción
1	Selección del asentamiento
2	Elección del tamaño máximo del agregado
3	Estimación del agua de mezclado y contenido de aire
4	Determinación de la resistencia media
5	Selección de la relación a/c
6	Cálculo de contenido de cemento
7	Estimación del contenido de agregado grueso
8	Estimación del contenido del agregado fino
9	Corrección por absorción y contenido de humedad de los agregados

Fuente: Práctica recomendable para dosificar concreto normal y concreto pesado

ACI 211.1

El cálculo de dosificación de la mezcla se encuentra desarrollado en el anexo 9.

A continuación, se presenta una tabla resumen de pesos secos y húmedos de los componentes de 1 m³ de hormigón.

Tabla 4.3 Pesos seco y húmedos de los materiales corregidos por m³ de hormigón fck = 250 kg/cm²

Componente	Peso Seco kg/m ³	Peso Húmedo kg/m ³
<i>Cemento</i>	370,00	370,00
<i>Agua</i>	185,00	194,87
<i>Grava</i>	996,24	1006,35
<i>Arena</i>	744,84	753,29

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.4 Proporciones de mezcla seca

Cemento	Arena	Grava
1,0	2,01	2,69

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.5 Proporciones de mezcla húmeda

Cemento	Arena	Grava
1,0	2,04	2,72

Fuente: Elaboración propia

4.2 Análisis de vigas de hormigón prismáticas ensayadas a flexión

A continuación, se presenta un resumen de valores promedio de Módulo de Ruptura.

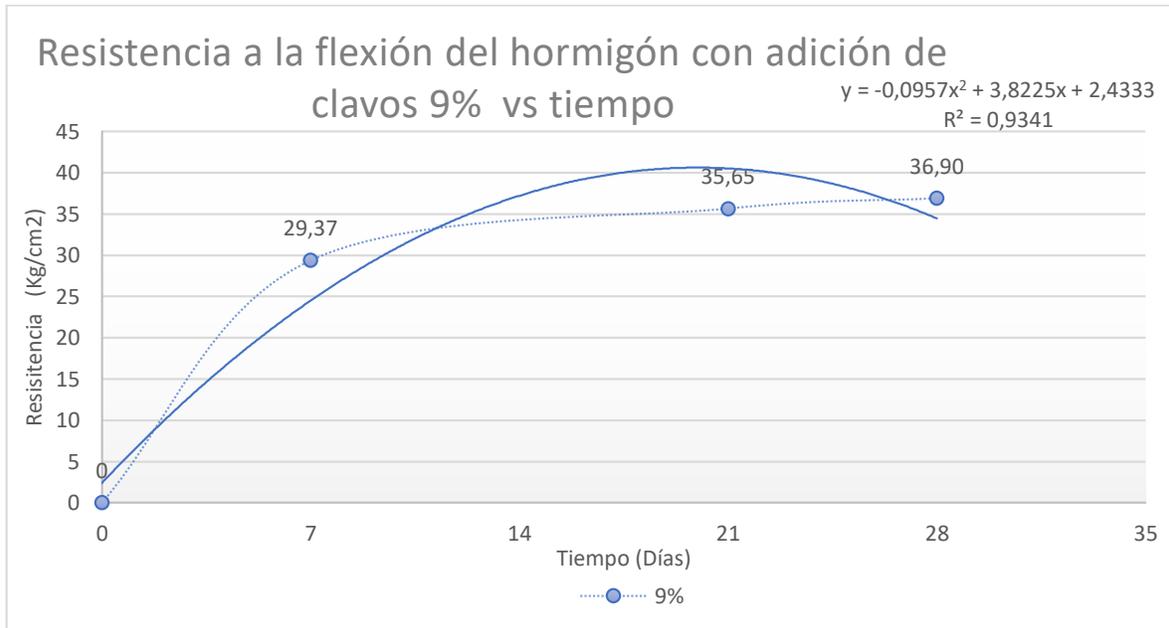
Tabla 4.6 Resumen de los valores promedios del ensayo a la flexión del hormigón en los porcentajes de 0%(sin adición de clavos), 9%, 12% y 15% de adición de clavos

Módulo de Ruptura promedios (Kg/cm ²)				
Edad	Porcentaje de adición de clavos			
	Sin clavos	9%	12%	15%
7 días	-	29,37	30,66	31,29
21 días	-	35,65	38,11	37,19
28 días	31,11	36,90	39,59	37,82

Fuente: Elaboración propia

4.2.1 Resistencia a la flexión del hormigón reforzado con clavos en función del tiempo

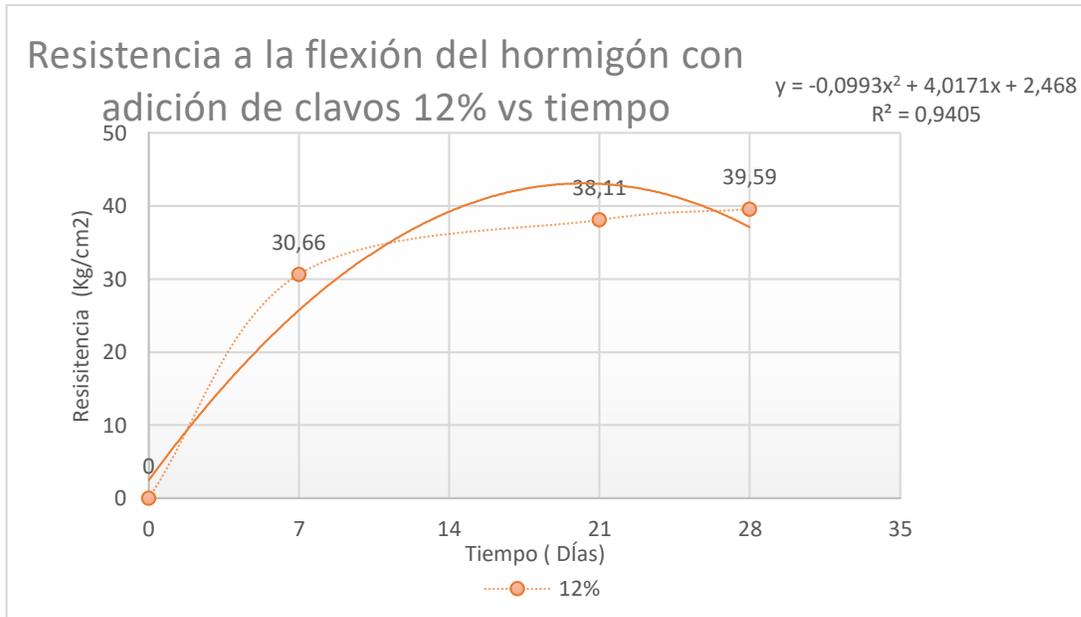
Gráfico 1 Diagrama de resistencia a la flexión del hormigón reforzado con clavos vs tiempo (al 9% de adición de clavos)



Fuente: Elaboración propia

Para la adición de clavos reciclados del 9%, para la edad de 7 días del hormigón se obtuvo un valor promedio de módulo de ruptura de 29,37 Kg/cm²; para la edad de 21 días del hormigón, se obtuvo un valor promedio de módulo de ruptura de 35,65 Kg/cm² y a los 28 días es a la edad que el hormigón alcanza su resistencia estimada al 100%, obteniendo un valor promedio de módulo de ruptura de 36,90 Kg/cm², con respecto al concreto patrón también a los 28 días, de valor promedio de 31,11 Kg/cm².

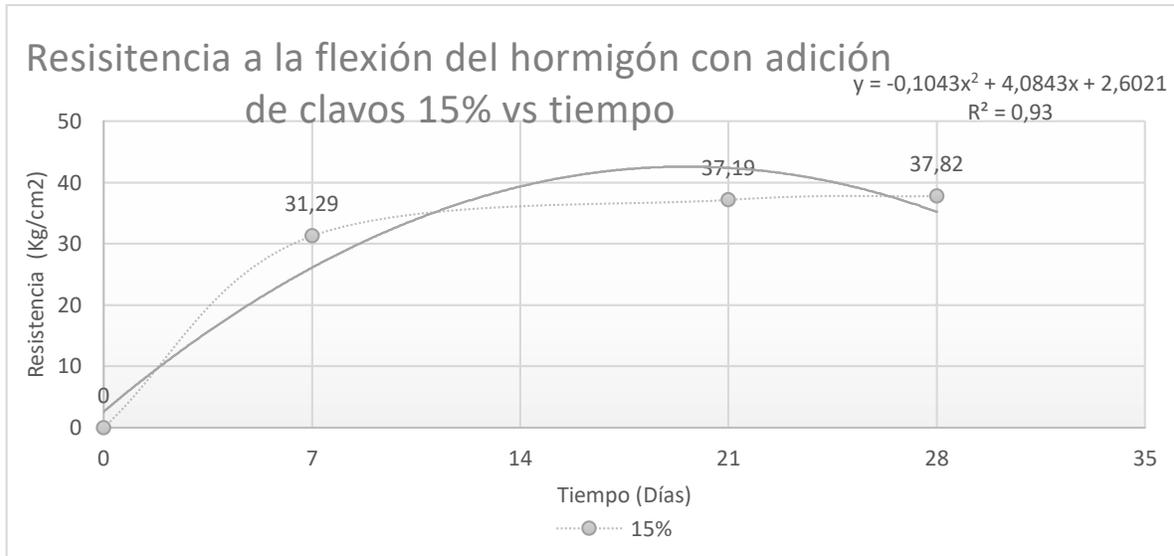
Gráfico 2 Diagrama de resistencia a la flexión del hormigón reforzado con clavos vs tiempo (al 12% de adición de clavos)



Fuente: Elaboración propia

Se observa que en el diagrama que al adicionar de clavos reciclados un 12% la resistencia a la flexión del hormigón, para la edad de 7 días del hormigón, se obtuvo un valor promedio de módulo de ruptura de 30,66 Kg/cm²; para la edad de 21 días del hormigón, se obtuvo un valor también promedio de módulo de ruptura de 38,11 Kg/cm² y a los 28 días de edad del hormigón alcanza un valor promedio de módulo de ruptura de 39,59 Kg/cm², que es superior respecto al concreto patrón a la edad de los 28 días y también mayor hormigón con adición de clavos de 9%, de 31,11 Kg/cm² y 36,90 Kg/cm² valor promedio de módulo de ruptura respectivamente.

Gráfico 3 Diagrama de resistencia a la flexión del hormigón reforzado con clavos vs tiempo (al 15% de adición de clavos)



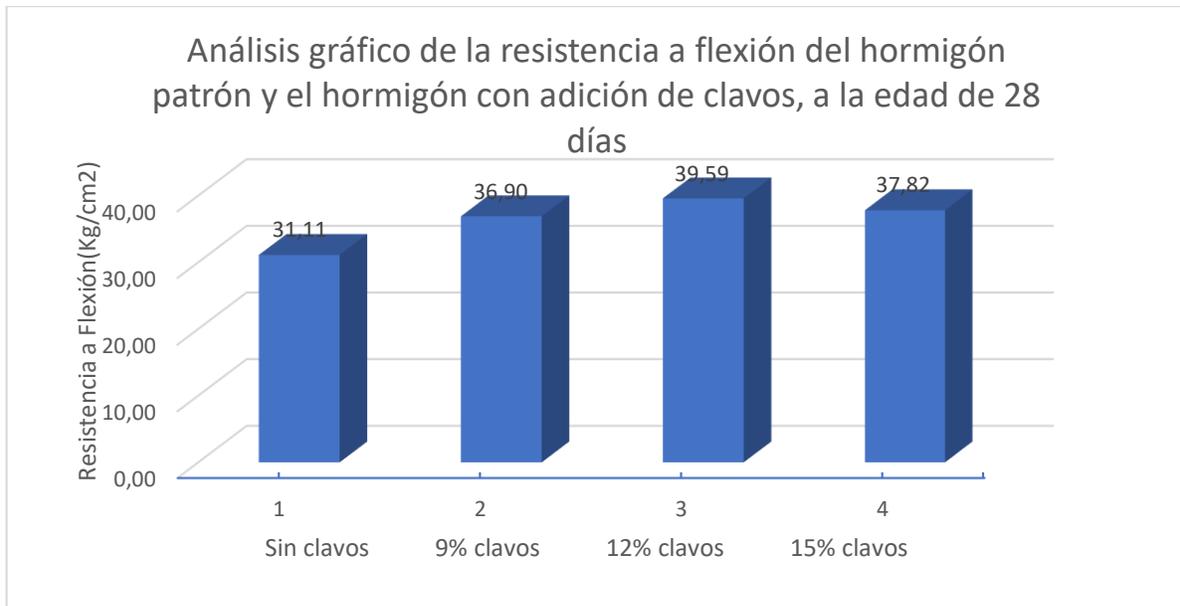
Fuente: Elaboración propia

En el diagrama se muestra que la resistencia a la flexión alcanzada del hormigón con adición de clavos reciclados al 15%, para la edad de 7 días del hormigón, se obtuvo un valor promedio de módulo de ruptura de 31,29 Kg/cm²; para la edad de 21 días del hormigón, se obtuvo un valor de módulo de ruptura promedio de 37,19 Kg/cm² y a los 28 días de edad del hormigón alcanza un valor promedio de 37,82 Kg/cm².

4.2.2 Análisis gráfico de la resistencia a la flexión de hormigón convencional y hormigón con adición de clavos.

Para una mejor percepción se realiza el análisis gráfico siguiente:

Gráfico 4 Análisis gráfico de la resistencia a la flexión del hormigón patrón (sin adición de clavos) vs hormigón con adición de clavos, a la edad de 28 días



Fuente: Elaboración propia

La resistencia a la flexión del hormigón con adición de clavos al 15% tiende a disminuir, respecto al hormigón con adición de 12% de clavos, de 39,59 Kg/cm² a 37,82 Kg/cm², de módulo de ruptura respectivamente, pero superior al hormigón de adición de clavos de 9% de valor de módulo de ruptura de 36,90 Kg/cm² y al hormigón patrón (sin adición de clavos) de valor de módulo de ruptura de 31,11 Kg/cm².

4.3 Consistencia del hormigón patrón y el hormigón reforzado con clavos

Partiendo de que la presencia de las fibras restringe la fluidez de la matriz del hormigón y su esbeltez, es decir; se vuelve menos trabajable. Se espera que suceda ello pero ahora con la incorporación de clavos.

Existen diferentes métodos de medir la consistencia de los hormigones, con métodos dinámicos como ser el Cono de Abrams ASTM (C143), Tiempo de Flujo en el Cono Invertido, Consistómetro Ve Be. Sin embargo para el trabajo de investigación la consistencia se medirá mediante el método Cono de Abrams.

Los valores obtenidos de la consistencia obtenidos de un promedio, para la investigación fueron los siguientes:

Tabla 4.7 Consistencia del hormigón patrón (sin adición de clavos) y el hormigón reforzado con clavos

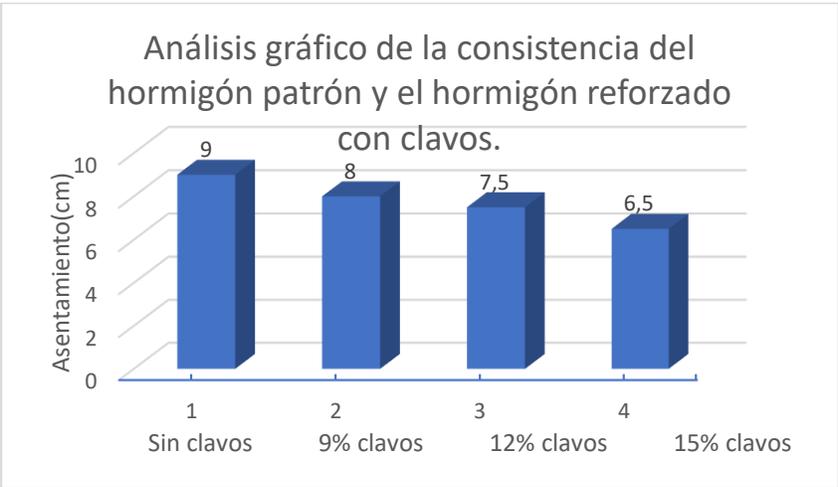
Consistencia del hormigón patrón vs hormigón con clavos			
Sin Clavos	Con 9% de clavos	Con 12% de clavos	Con 15% de clavos
cm	cm	cm	cm
9	8	7,5	6,5

Fuente: Elaboración propia

Se percibe que para un mismo asiento en el cono de Abrams de un hormigón con fibras sea menor que el de un hormigón convencional (sin adición de clavos).

Para una mejor percepción se realiza el análisis gráfico de la consistencia.

Gráfico 5 Consistencia del hormigón patrón (sin adición de clavos) y el hormigón con clavos



Fuente: Elaboración propia

Se muestran los valores medios de los asentamientos obtenidos con el ensayo del cono de Abrams mediante el cual observamos que para dosificaciones con mayor adición de clavos reciclados, estos valores del asentamiento disminuyen debido a la presencia de los mismos, lo cual significa que a mayor incremento de clavos de acero la consistencia y la trabajabilidad del hormigón disminuyen.

4.4 Interpretación de resultados

Para la variación porcentual de la resistencia del hormigón a flexión de cada uno de los diferentes porcentajes respecto del hormigón patrón (sin adición de clavos), se realiza el siguiente análisis:

MR = 31,11 Kg/cm² (Resistencia promedio a flexión sin adición de clavos, a edad de 28 días, plasmado en 5.1.2)

MR = 36,90 Kg/cm² (Resistencia promedio a flexión al 9%, a edad de 28 días)

$$\% = \frac{36,90 - 31,11}{31,11} * 100 = 18,65 \%$$

MR = 39,59 Kg/cm² (Resistencia promedio a flexión al 12%, a edad de 28 días)

$$\% = \frac{39,59 - 31,11}{31,11} * 100 = 27,26 \%$$

MR = 37,82 Kg/cm² (Resistencia promedio a flexión al 15%, a edad de 28 días)

$$\% = \frac{37,82 - 31,11}{31,11} * 100 = 21,66 \%$$

Luego de realizados los ensayos a la flexión en las vigas, para un hormigón de $f'c = 250$ Kg/cm², se pudo constatar de una mejoría en las tres dosificaciones mencionadas, cuyos resultados demuestran un incremento en la resistencia a la flexión del hormigón, de un 18,65% para la dosificación de 9% de adición de clavos reciclados, se obtuvo un 27,26% para la dosificación de 12% de adición de clavos reciclados y finalmente para la dosificación

de 15% en un 21,66%, todos respecto al valor de resistencia patrón promedio. En los ensayos realizados se pudo observar que la adición de clavos del 15% tiende a bajar la resistencia a la flexión del hormigón a la edad de los 28 días, respecto de 12% de adición de clavos reciclados.

4.5 Validación de hipótesis

El estudio fue basado en la Hipótesis planteada, se comprobó, que adicionando clavos reciclados como fibra de acero al hormigón convencional se incrementa su resistencia a flexión del hormigón en un porcentaje de 18,65 %, 27,26 % y 21,66% para adiciones de 9%, 12% y 15% de clavos reciclados en función del peso del cemento respectivamente. Por lo que podemos afirmar basándonos en dichos valores que la hipótesis planteada fue verificada obteniendo resultados satisfactorios.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- El comportamiento de la resistencia a flexión del Hormigón reforzado con clavos reciclados, usando en todos los casos el ensayo de vigas simples con carga en los tercios, tiende a mejorar respecto al hormigón patrón en todos los porcentajes de adición de clavos, según resumidos en la siguiente tabla:

Resumen de los valores promedios del ensayo a flexión del hormigón en los porcentajes de 0% (sin adición de clavos), 9%, 12% y 15% de adición de clavos

Módulo de Ruptura promedios (Kg/cm ²)				
Edad	Porcentaje de adición de clavos			
	Sin clavos	9%	12%	15%
7 días	-	29,37	30,66	31,29
21 días	-	35,65	38,11	37,19
28 días	31,11	36,90	39,59	37,82

Fuente: Elaboración propia

La resistencia a la flexión a los 28 días del hormigón reforzado con clavos con porcentaje de adición de 9%, tiene un valor de Módulo de Ruptura de 36,90 Kg/cm², el hormigón reforzado con clavos con porcentaje de adición de 12% de clavos de módulo de ruptura de 39,59 Kg/cm², el hormigón reforzado con clavos con porcentaje de adición de 15%, tiene un valor de módulo de ruptura de 37,82 Kg/cm², y el hormigón patrón (sin adición de clavos) de valor de módulo de ruptura de 31,11 Kg/cm².

- Se verificó que al aumentar el porcentaje de adición de clavos al 15 %, la resistencia a la flexión del hormigón disminuye, debido a que el hormigón se vuelve menos trabajable, y al aplicar la misma energía de zunchado y vibrado para todos los casos, no hay una buena distribución de los clavos de acero, lo que implica que se forma zonas más rígidas y zona más frágiles por donde falla el concreto al momento del ensayo.

- El porcentaje adecuado de adición de clavos en base a los resultados, es a una incorporación del 12% de clavos reciclados en función al peso del cemento.
- Se constató la disminución de la consistencia del hormigón reforzado con clavos a medida en que los porcentajes de adición de clavos aumentaba, respecto al hormigón patrón, al momento de medir en el cono de Abrams, donde varía el revenimiento de 9 cm a 6.5 cm del hormigón patrón y hormigón reforzado con clavos de adición del 15% respectivamente, esto se debe a que la presencia de los clavos restringe la fluidez de la matriz del hormigón. Por lo tanto, el incremento de los clavos en la mezcla de hormigón reduce la consistencia de la misma.

Consistencia del hormigón patrón (sin adición de clavos) y el hormigón reforzado con clavos

Consistencia del hormigón patrón vs hormigón con clavos			
Sin Clavos	Con 9% de clavos	Con 12% de clavos	Con 15% de clavos
cm	cm	cm	cm
9	8	7,5	6,5

Fuente: Elaboración propia

- Se analizó y validó las características geométricas, mecánicas y químicas de los clavos de acero, en su mayoría se asemejan con respecto de las fibras de acero del “Informe de hormigón reforzado con fibras” de la ACI 544, a excepción del diámetro de los clavos que son casi 3 veces mayor que de las fibras de acero, aun así lo hace idóneo que se pueda utilizar este tipo de material reciclado como fibra de acero:

Características geométricas de las fibras de acero y de los clavos de acero

Característica	Unidad	Fibra de acero	Clavo de acero
Geométrica	Longitud	mm	12,7-75
Geométrica	Díametro	mm	0,25-1,1
Geométrica	Esbeltez(l/d)	mm/mm	20-100

Fuente: Elaboración tomada a partir de Aceros Arequipa y ACI 544.3R-08.

Características mecánicas de las fibras de acero y de los clavos de acero

Tipo de acero	Resistencia a Tracción(MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Densidad (kg/m3)
Fibra de acero	345	210	7800
Clavo de acero	760	207	7900

Fuente: Elaboración propia en base a información la ASTM A 820 y Aceros Arequipa

Composición química de la fibra de aceros vs clavos de acero

Tipo de acero	Composición Química			
	%C	% Mn	% P máx	% S máx
Clavo de acero	0,08-0,13	0,3-0,6	0,04	0,05
Fibra de acero	0,69-0,76	0,40-0,60	0,025	0,15-0,30

Fuente: Elaboración tomada a partir de Aceros Arequipa y Comportamiento mecánico del hormigón con fibras metálicas, Carles Puig B.

- Se utilizó vinagre blanco diluido en agua, una de vinagre por dos de agua, eliminándose casi en su totalidad el óxido superficial de los clavos.
- La longitud del clavo utilizado, hace que se tenga mejores resultados, al momento de la ruptura de las vigas de ensayo.
- Basado en los resultados de mejoría de resistencia a flexión del hormigón, los clavos podrían darse las mismas aplicaciones que con fibras de acero.
- Se determinó que el costo unitario de 2148 bs el m³ de un hormigón reforzado de clavos reciclados, incluyendo el costo de un personal para la recolección de los clavos debido a que es un material reciclado en las obras.

5.2 Recomendaciones

- Con el objeto de obtener el asentamiento deseado del hormigón en el ensayo del cono de Abrams, se podría aumentar pasta de cemento, es decir, la relación a/c para darle más fluidez a la mezcla, siempre entre los rangos recomendados de relación a/c.
- Es recomendable mantener una misma energía de compactación al momento de elaborar vigas de hormigón reforzado en laboratorio, esto con el objeto de eliminar la mayor cantidad de aire atrapado para evitar la porosidad, se podría lograr mejores resultados de la resistencia en estudio.
- Empleando mayores dosificaciones de clavos, se sugiere utilizar aditivos químicos como plastificantes u otros, para mejorar su consistencia y trabajabilidad. Sin embargo, ello incrementaría el costo de este tipo de hormigón reforzado.
- Se podría iniciar una incentivación de acopiar este residuo, sabiendo que es un desecho común en cada una de las obras, y se pueda tener un banco de este material. Al mismo tiempo reducir la contaminación del medio ambiente dicho que el material de acero es contaminante.
- Se debe tener suficiente información de las propiedades de las fibras metálicas esto nos servirá como referencias fiables al usar los clavos reciclados, ya que ellas influirán directamente en la resistencia mecánica del hormigón.
- Se recomienda que para futuras investigaciones seleccionar distintos porcentajes de clavos para conocer la variación que puedan tener en la resistencia a flexión del concreto.

