

CAPÍTULO I
DISEÑO TEÓRICO

CAPÍTULO I

DISEÑO TEÓRICO

1.1 Introducción

La fibra Dramix 3D es una fibra de acero para reforzamiento de hormigón y están fabricadas con alambres de acero de alta calidad trefilado en frío con extremos conformados para lograr un mejor anclaje. Vienen encoladas en peines para lograr un mezclado rápido, fácil y homogéneo con el hormigón, además de evitar la formación de bolas o grumos de fibras.

La evaluación de las propiedades mecánicas del hormigón adicionando fibras de acero Dramix 3D como refuerzo para el hormigón en pavimentos rígidos surge de la necesidad de complementar o mejorar las capacidades, como la resistencia a la tracción y flexión, además de reducir la formación de fisuras y grietas debido principalmente a la baja resistencia a tracción del concreto cuando está sometido a cargas superiores a las de diseño o a cargas cíclicas.

Lo que se propone en esta investigación es evaluar las propiedades mecánicas de la mezcla de hormigón reforzada con fibras de acero Dramix 3D, a través de ensayos de laboratorio estandarizados como ser la resistencia a la flexión y compresión. Con el fin de determinar la incidencia de este material, detectar posibles ventajas y desventajas en dichas propiedades con respecto a un hormigón convencional.

A nivel mundial, las primeras sugerencias en el sentido de que las propiedades del concreto podrían mejorarse con la adición de fibras de acero fueron hechas por Porter (1910) y Ficklen (1914) en el Reino Unido, pero no es sino hasta 1963 en que pone en evidencia la función en el concreto de las fibras metálicas como elementos inhibidores del agrietamiento.

Actualmente existen muchas investigaciones por todo el mundo respaldan que las fibras actúan como refuerzo en el concreto, mejorando sus propiedades de resistencia a flexión, resistencia a compresión, ductilidad y tenacidad; y además controlando la formación de fisuras, estableciendo que los resultados obtenidos por cada investigador son válidos en el lugar de estudio. Entre las investigaciones existen varias pero solo se hará mención las más destacadas en nuestro continente tenemos las siguientes:

Carrillo & Rojas (Perú 2017) en su trabajo de investigación presenta un análisis comparativo entre las propiedades mecánicas de un concreto patrón $f^c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y un concreto con fibras de acero Dramix 3D en dosificaciones de 1, 2, 3 y 4% respecto al volumen del agregado fino equivalentes a dosificaciones de 7, 14, 21 y 28 kg/m^3 del peso total del concreto respectivamente. La resistencia a flexión se evaluó a los 7, 14 y 28 días, en los resultados a los 28 días se pudo observar que el concreto sin fibras tiene una resistencia de $46,42 \text{ kg/cm}^2$, el mismo que se incrementa hasta $56,67 \text{ kg/cm}^2$ al incorporar las fibras de acero con una dosificación de 21 kg/m^3 .

Ramírez & Samaniego (Ecuador 2016) en su trabajo de investigación presenta un estudio comparativo sobre los efectos de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero Dramix RC 65/35 NB en dosificaciones de 15, 20 y 25 kg/m^3 , respecto a un concreto patrón $f^c = 245 \text{ kg/cm}^2$. En los resultados de resistencia a flexión a los 28 días, el concreto sin fibras obtuvo una resistencia de $28,65 \text{ kg/cm}^2$, al incorporar las fibras de acero, se obtuvo una máxima resistencia de $38,34 \text{ kg/cm}^2$ con una dosificación de 20 kg/m^3 .

Con el presente trabajo se pretende realizar un análisis del comportamiento de la mezcla de hormigón reforzada con fibras de acero Dramix 3D, con el fin de establecer si la utilización de este tipo de fibra puede ser una alternativa de aplicación en la elaboración de mezclas de hormigón para pavimentos rígidos. Para de este modo contribuir a los tantos estudios dirigidos a las vías de pavimento rígido realizados por demás ingenieros, arquitectos, estudiantes, entre otros.

1.2 Justificación

Las necesidades y exigencias de nuestro país, han procurado que las técnicas actuales en la construcción de vías de pavimento rígido cumplan con las demandas de los usuarios y clientes.

El presente proyecto de investigación surge por la necesidad de buscar otras alternativas a los hormigones convencionales que se utilizan en las obras viales. Una alternativa técnica es el empleo de la fibra de acero Dramix 3D en la elaboración de mezclas de hormigón para pavimentos rígidos. La implementación de este material alternativo hará que sea posible una mejora en la resistencia a flexión y compresión, reduce además la

formación de fisuras en el concreto, dando como resultado pavimentos rígidos que cumplan con el nivel de servicio durante su vida útil.

Como se ha mencionado en algunas investigaciones la fibra de acero Dramix 3D existe hace mucho tiempo; por lo que a nivel internacional existe bastante documentación relacionado al presente objeto de estudio con resultados prometedores. A nivel Bolivia, al existir un déficit investigativo en este campo no se conoce trabajos nacionales vinculados con el objeto de la presente investigación.

Es en este sentido que se pretende desarrollar esta investigación basada en especificaciones proporcionadas por las normas, investigaciones realizadas y especificaciones proporcionadas por el fabricante. De esta forma es fundamental constatar si los materiales de nuestro medio cuentan con las características necesarias para la elaboración de esta metodología.

Mediante este estudio se pretende determinar si este tipo de fibra puede ser considerado como alternativa técnica para la elaboración de hormigón para pavimentos rígidos, buscando establecer parámetros técnicos que permitan su adecuada dosificación.

La investigación contribuirá a realizar un análisis de los efectos de la incorporación de las fibras de acero en la resistencia a flexión del concreto, mediante un análisis estadístico de los resultados obtenidos al realizar esta investigación, el cual permitirá cuantificar la mejora alcanzada de la resistencia a flexión y la dosificación óptima de fibra, dentro de intervalos confiables. Además, las conclusiones de esta investigación servirán como guía a estudiantes e ingenieros en el estudio y diseño de pavimentos de concreto.

El trabajo brindará también un aporte académico al proceso de investigación que lleva a cabo la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

1.3 Planteamiento del problema

1.3.1 Situación problemática

Concepto del objeto de investigación.

El objeto de estudio se refiere a la variación de la resistencia a compresión y flexión del pavimento rígido reforzado con distintas dosificaciones de fibra de acero Dramix 3D, en comparación con el hormigón de pavimento rígido sin fibras.

Relato del fenómeno o suceso que ocurre.

Las fallas más frecuentes en pavimentos de concreto simple son las fisuras y grietas. El concreto simple es un material con buena resistencia a compresión, pero con baja resistencia a tracción; por lo que, ante cargas vehiculares superiores a la carga de diseño o exceso de cargas repetitivas sobre el pavimento, da como consecuencia el inicio y propagación de fisuras, que se inician en las capas inferiores de las losas de concreto, las mismas que avanzan hacia las capas superiores. Las aberturas de las fallas permiten el ingreso de agua, lo que daña la base del pavimento, que posteriormente generará que las fallas en el concreto sean mayores. Esto genera un rápido deterioro del pavimento, además de mayores gastos de mantenimiento y disminución en la comodidad y seguridad en el tránsito vehicular.

Pronóstico.

En la construcción de pavimentos hay soluciones convencionales al problema de la baja resistencia a tracción del concreto, tales como reforzar las losas de concreto con malla de acero corrugado en la parte inferior de la losa ya que ahí se generan los esfuerzos a tracción o también incrementar el espesor de las losas de concreto simple para disminuir los esfuerzos de tracción; sin embargo, investigaciones internacionales vienen demostrando que el uso de concreto reforzado tanto con fibras de acero mejoran la resistencia a la flexión, aportan mayor ductilidad y tenacidad al concreto, y reducen el fenómeno de fisuración, dando como resultado pavimentos que cumplan con el nivel de servicio durante su vida útil. Además, son una opción con la que se ahorra tiempo en construcción y son más económicas que las losas de concreto armado convencionales.

Perspectiva.

Se utiliza la perspectiva de analizar, es decir que vamos a analizar la variación que existe entre las resistencias a flexión y compresión, del pavimento rígido normal con un pavimento rígido reforzado con fibras de acero Dramix 3D, el análisis de los resultados nos permitirá obtener resultados confiables.

1.3.2 Formulación del problema

¿Cómo influye la adición de fibras de acero Dramix 3D en la resistencia a flexión y compresión del hormigón aplicado en pavimentos rígidos?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de la adición de fibras de acero Dramix 3D en la resistencia del hormigón en pavimentos rígidos mediante ensayos a compresión y flexión, para mejorar la durabilidad de estas estructuras y proporcionar información relevante a la industria de la construcción.

1.4.2 Objetivos específicos

- Identificar el banco de procedencia de los agregados en base a las diferentes plantas en nuestro medio.
- Efectuar la caracterización de los agregados y el cemento.
- Realizar mezclas de prueba, con las dosificaciones diseñadas.
- Construir probetas cilíndricas y vigas de hormigón con y sin refuerzo de fibra de acero Dramix 3D, para determinar el impacto del refuerzo en la resistencia del material bajo cargas de compresión y flexión.
- Efectuar un análisis comparativo entre las mezclas de hormigón con fibras de acero Dramix 3D y una mezcla convencional, a partir de los resultados obtenidos.
- Establecer el desempeño óptimo del uso de fibras de acero Dramix 3D.
- Exponer los comportamientos, características y beneficios que se obtienen al utilizar fibras de acero Dramix 3D en el pavimento rígido

1.5 Hipótesis

La adición de fibra de acero Dramix 3D a diferentes dosificaciones en la mezcla de hormigón para pavimento rígido mejora las resistencias a flexión y compresión del pavimento, y esta mejora varía en función de la cantidad de fibra utilizada.

1.6 Definición de variables

1.6.1 Variable independiente

X_1 = Dosificación de fibra de acero Dramix 3D.

1.6.2 Variable dependiente

Y_1 = Resistencia a flexión.

Y_2 = Resistencia a compresión.

1.7 Conceptualización de las variables

1.7.1 Variable independiente

Tabla 1.1: Operacionalidad de variables independientes

Variables independientes	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Medición	Rango de variabilidad
Fibras de acero Dramix 3D	Son elementos unidimensionales, largas y delgadas cuya longitud es muy superior a su diámetro	Características	Resistencia a tracción	N/mm ²	1115
			Tolerancia	%	7,50
			Longitud	mm	60,00
			Diámetro	mm	0,75
			Esbeltez (l/d)	—	80,00

Fuente: Elaboración propia

1.7.2 Variable dependiente

Tabla 1.2: Operacionalidad de variables dependientes

Variables independientes	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Medición	Rango de variabilidad
Resistencia a flexión	La resistencia a la flexión de una viga de hormigón es la carga axial de flexión máxima alcanzada por la sección de hormigón antes de la falla.	Volumen peso	Ensayo de resistencia a flexión	(kg/cm ²)	38-50
Resistencia a compresión	La resistencia a la compresión de una probeta de hormigón es la carga axial de compresión máxima alcanzada por la sección de hormigón antes de la falla.	Volumen peso	Ensayo de resistencia a compresión	(kg/cm ²)	280-400

Fuente: Elaboración propia

1.8 Alcance

El presente trabajo se centra en el estudio de las propiedades mecánicas del hormigón reforzado con diferentes dosificaciones de fibra de acero Dramix 3D y por medio de ensayos de resistencia a flexión y compresión se establece parámetros de comparación respecto a una mezcla convencional, para su aplicación en pavimentos rígidos.

Al existir una variable independiente (dosificación de fibra de acero), que es manipulada y determinada en esta investigación y luego variables dependientes como ser; Resistencia a tracción y compresión, entonces se denota una clara relación de “causa – efecto”, encajando que el nivel de investigación alcanza a ser del tipo “causal explicativo”, teniendo un “diseño experimental con una categoría cuasi experimental”

Definido ya el alcance se establece que la presente investigación es de carácter viable porque se cuenta con todos materiales y equipos necesarios para su posterior desarrollo en laboratorios de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

La finalidad de este estudio es principalmente poder brindar información necesaria sobre el pavimento rígido reforzado con fibras de acero Dramix 3D, y que ésta sea una opción a tomar en cuenta al momento de construir pavimentos rígidos en nuestro país Bolivia.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DE

PAVIMENTOS REFORZADOS CON

FIBRA

CAPITULO II

ASPECTOS GENERALES DE PAVIMENTOS REFORZADOS CON FIBRA

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Marco histórico

La tecnología de concretos reforzados con fibras (Fiber Reinforced Concrete) se está generalizando en el mundo de la construcción a escala internacional. Se ha aplicado en la construcción de pisos industriales, pavimentos, concreto proyectado para túneles y taludes, elementos de concreto prefabricado, entre otras aplicaciones.

Sin embargo, no se trata de una nueva técnica en el mundo de la construcción, según Vidaud, Frómeta, & Vidaud (2015) las fibras naturales se utilizaron desde tiempos muy antiguos, tales como: hilo, paja, e inclusive pelos de animales como el de los caballos, que eran agregados al mortero y adobe para controlar la fisuración e incrementar la resistencia a tensión. Posteriormente, hacia el año 1900 se volvió popular el uso de fibras de asbesto, incorporadas en la matriz de la pasta de cemento, aunque años después se reveló que tiene efectos dañinos en la salud humana (p.31).

Según Sotil & Zegarra (2015) hasta el año 1935 se hizo uso de fibras naturales, iniciando el uso de las fibras sintéticas, que fueron conocidas a fines del siglo XIX gracias a la marca Chardonnet por inventar la seda artificial y en 1935 por la producción de la primera fibra de nylon. Sin embargo, su uso era exclusivamente en la industria textil, estas fibras se implementaron en la industria de la construcción muchos años después (p.39-40).

Según Vidaud, Frómeta, & Vidaud (2015) desde 1950 el cuerpo de Ingenieros del Ejército Americano fueron los que dieron inicio a las investigaciones sobre el concreto reforzado con fibras de diferentes materiales como acero y sintéticos, ellos tenían un gran interés en encontrar un material que mejore la resistencia del concreto, para ser utilizado en la construcción de instalaciones militares en zonas de conflicto. Durante los años 50 y 60, se desarrollaron diferentes investigaciones sobre el concreto reforzado con fibras de acero, entre ellas destacaron los estudios de Romualdi y Wiliamson, quienes aseguraban que su incorporación a la mezcla del concreto generaba una red de pequeñas armaduras que incrementaban la resistencia a tensión y la tenacidad del concreto.

A fines del año 1950 se usó las primeras fibras de vidrio en la antigua Unión Soviética, con la finalidad de reducir el espesor de los elementos de concreto. En un principio las fibras de vidrio no tuvieron éxito porque eran destruidas por los álcalis del cemento portland, por lo que posteriormente se desarrollaron fibras de vidrio resistentes a la reacción álcalis-agregado. Asimismo, en los años 60 iniciaron los estudios sobre el concreto reforzado con fibras de polipropileno, la cual fue considerada por la División de Desarrollo de la Armada de los Estados Unidos como el material sintético más apropiado para el concreto debido a su buen desempeño y ser una opción más económica (p.31-34).

Según Sotil & Zegarra (2015) G. Constantinesco registró una patente en Estados Unidos en 1954, utilizando fibras helicoidales y espirales para aumentar la resistencia a la fisuración del concreto. Posteriormente en 1970, en diferentes países europeos, sobre todo en España, se comenzó a usar las fibras de acero en proyectos de pisos industriales, revestimiento de túneles y pavimentación de tableros de puentes (p.40).

Actualmente muchas investigaciones por todo el mundo respaldan que las fibras actúan como refuerzo en el concreto, mejorando sus propiedades de resistencia a flexión, ductilidad y tenacidad; y además controlando la formación de fisuras.

2.1.2 Investigaciones relacionadas con el tema

2.1.2.1 Investigaciones internacionales

Carrillo & Rojas (2017) en su trabajo de investigación presenta un análisis comparativo entre las propiedades mecánicas de un concreto patrón $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y un concreto con fibras de acero Dramix 3D en dosificaciones de 1, 2, 3 y 4% respecto al volumen del agregado fino equivalentes a dosificaciones de 7, 14, 21 y 28 kg/m^3 del peso total del concreto respectivamente. La resistencia a flexión se evaluó a los 7, 14 y 28 días, en los resultados a los 28 días se pudo observar que el concreto sin fibras tiene una resistencia de $46,42 \text{ kg/cm}^2$, el mismo que se incrementa hasta $56,67 \text{ kg/cm}^2$ al incorporar las fibras de acero con una dosificación de 21 kg/m^3 .

Flores & Mamani (2018) en su trabajo de investigación presenta la evaluación de un concreto patrón $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, un concreto con fibra metálica Sika Fiber CHO 65-35-NB, para determinar cuál tiene mejor resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y costos. La fibra metálica se incorporó en dosificaciones de 20, 30, 40 y 50 kg/m^3 .

En los resultados de resistencia a flexión a los 28 días, el concreto sin fibras obtuvo una resistencia de $26,64 \text{ kg/cm}^2$, el cual incrementa hasta $34,64 \text{ kg/cm}^2$ al incorporar las fibras metálicas con una dosificación de 50 kg/m^3 .

Rodríguez & Segura (2013) en su trabajo de investigación tuvo como finalidad conocer y comparar el comportamiento del concreto reforzado con distintos tipos de fibras a ensayos de flexo-tracción y compresión, para ello consideraron un concreto patrón comparado con muestras de concreto con adición de fibras de acero, Dramix RC-65/35-BN y Dramix RC-80/35-BN, con una dosificación para la primera de 20 y 15 kg/m^3 y para la segunda de 20 y 25 kg/m^3 respecto al peso total del concreto. En los resultados de resistencia a flexión a los 28 días, el concreto sin fibras obtuvo una resistencia de $48,54 \text{ kg/cm}^2$, al incorporar las fibras metálicas, en ambas marcas de fibra disminuyó la resistencia, hasta el valor de $44,05 \text{ kg/cm}^2$ con la fibra Dramix RC-65/35-BN con una dosificación de 15 kg/m^3 .

Meza (2015) en su trabajo de investigación tuvo como finalidad evaluar los parámetros de resistencia a flexión, tenacidad a flexión, resistencia residual a flexión y energía de fractura de concretos reforzados con fibras de acero, comparados con un concreto sin refuerzo utilizado para pisos industriales de 40 MPa de resistencia a flexión. Las muestras de concreto reforzado fueron con 5 diferentes fibras de acero, ensayadas a flexión a los 28 días. Los resultados de resistencia a flexión manifiestan que el concreto sin fibras obtuvo una resistencia de $44,48 \text{ kg/cm}^2$, al incorporar las fibras metálicas, se obtuvo un incremento de la resistencia hasta el valor de $49,65 \text{ kg/cm}^2$ con la fibra Dramix con una dosificación de 28 kg/m^3 .

Ramírez & Samaniego (2016) en su trabajo de investigación presenta un estudio comparativo sobre los efectos de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero Dramix RC 65/35 NB en dosificaciones de 15, 20 y 25 kg/m^3 , respecto a un concreto patrón $f'c = 245 \text{ kg/cm}^2$. En los resultados de resistencia a flexión a los 28 días, el concreto sin fibras obtuvo una resistencia de $28,65 \text{ kg/cm}^2$, al incorporar las fibras de acero, se obtuvo una máxima resistencia de $38,34 \text{ kg/cm}^2$ con una dosificación de 20 kg/m^3 .

2.1.3 Pavimentos

Montejo (2002) define el pavimento como una estructura, conformada por capas superpuestas, que está apoyada sobre el suelo de cimentación o llamado también subrasante. Esta estructura tiene la función de soportar adecuadamente los esfuerzos generados por las cargas repetidas del tránsito, durante el período para el que fue diseñado (p.1).

2.1.3.1 Tipos de pavimentos

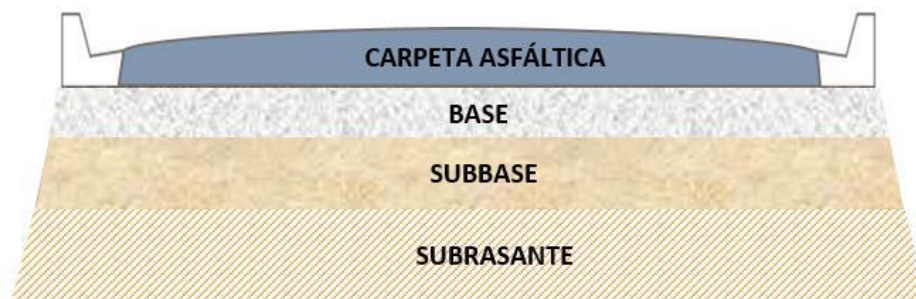
a. Pavimentos flexibles

Montejo (2002) describe estos pavimentos, como formados por una carpeta de mezcla bituminosa (asfalto) que va apoyada sobre dos capas de materiales no rígidos, llamados base y subbase. En algunos casos, puede no llevar alguna de estas capas, ello depende de las necesidades particulares del proyecto.

En los pavimentos flexibles, la carpeta de rodadura tiene menos rigidez por lo que se deforma más y transmite tensiones mayores en la subrasante. La carpeta de rodadura no absorbe todas las cargas de los vehículos, actúa más como un transmisor, distribuyendo la carga desde la carpeta de rodadura hasta que llegue a un nivel aceptable para la subrasante (p.2-4).

La estructura del pavimento flexible o asfáltico se puede apreciar en la Figura 2.1.

Figura 2.1: Estructura de un pavimento flexible



Fuente: Elaboración propia

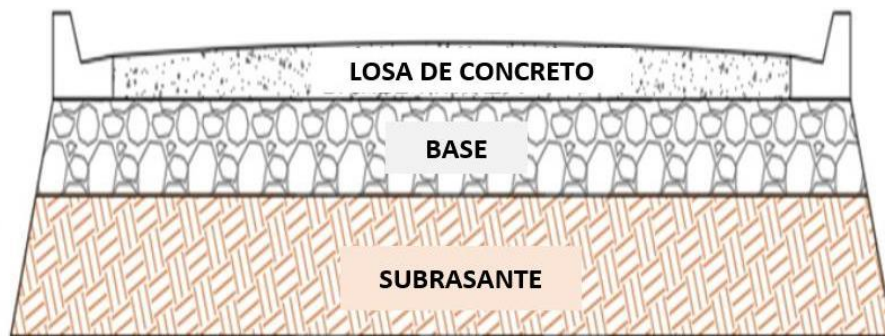
b. Pavimentos semi-rígidos

Para Montejo (2002) estos pavimentos son similares al pavimento flexible, pero la base o sub-base se ha rigidizado artificialmente con un aditivo que puede ser: asfalto, emulsión, cemento, cal o químicos. Estos aditivos corrigen o modifican las propiedades mecánicas de los materiales locales para la construcción de la base y sub-base, siendo esta solución más económica que el trasladar los materiales adecuados desde otro lugar distante.

c. Pavimentos rígidos

El pavimento rígido está constituido por una losa de concreto, que va apoyada sobre la subrasante, o de ser necesario, sobre una sub-base de material seleccionado (ver en la Figura 2.2). La losa de concreto tiene una alta rigidez y un alto módulo de elasticidad por lo que esta capa absorbe gran parte de los esfuerzos producidos por las cargas vehiculares, además las cargas se distribuyen en una zona muy amplia del pavimento, generando tensiones muy bajas en la subrasante. El diseño del espesor de la losa de concreto se encarga de dar la resistencia estructural a las cargas actuantes, mientras que el espesor de la sub base y subrasante son diseñados para evitar los asentamientos diferenciales de la losa de concreto (p.5).

Figura 2.2: Estructura de un pavimento rígido



Fuente: Elaboración propia

d. Pavimentos articulados

La capa de rodadura de estos pavimentos está formada por bloques de concreto prefabricado de igual espesor, llamados adoquines. Los adoquines se colocan sobre una capa de arena, la cual se apoya sobre la subrasante; si la subrasante no tiene la suficiente

capacidad para resistir la magnitud de las cargas y su frecuencia, será necesario la colocación de una base granular previa (p.7).

2.1.3.2 Factores que influyen en la performance de los pavimentos

De la Cruz y Quispe (2014) describen los factores que influyen en la performance de los pavimentos, tales como:

a. Tráfico: Los factores que influyen son la carga bruta y presión de llanta, las propiedades del terreno de fundación y los materiales del pavimento, la repetición de carga, el radio de influencia de carga, la velocidad directriz, el tipo de eje y la configuración de rueda.

b. Clima: Los factores que influyen son la lluvia (que pueden producir el fenómeno de Aquaplaning), la expansión por congelamiento, la contracción y expansión por temperatura, los efectos de congelamiento-deshielo por gradiente de temperatura y la variación de clima húmedo-seco.

c. Geometría del proyecto (Diseño Vial): Los factores que influyen son la distribución de tráfico en el pavimento, la posición de la estructura, las secciones de corte y relleno, la profundidad del nivel freático, los deslizamientos y problemas relacionados.

d. Construcción y mantenimiento: Los factores que influyen son la deficiencia en la compactación del terreno de fundación, las fallas por una mala instalación de juntas, mala colocación de guías en los niveles (reglas metálicas), escarificado y eliminación de materiales superiores al especificado, y la durabilidad del agregado partido.

2.1.3.3 Exigencias técnicas para la construcción de pavimentos

Para la construcción de un determinado tipo de pavimento, se debe considerar los requisitos establecidos en la Norma C.E.0.10: Pavimentos Urbanos. Esta norma tiene como objetivo la seguridad pública y técnica de la estructura a ejecutar, estableciendo los parámetros para un buen diseño. En el caso de los pavimentos establece parámetros de resistencia del concreto, resistencia del suelo, entre otros (ver la Tabla 2.1). El cumplimiento de los parámetros ofrece que la estructura del pavimento desarrolle un desempeño mecánico adecuado y que las posibles fallas en el pavimento se minimicen.

Tabla 2.1: Especificaciones técnicas de pavimentos

Tipo De Pavimento			
Elemento	Flexible	Rígido	Adoquines
Sub-rasante		95% de compactación: Suelos granulares - Proctor modificado Suelos cohesivos - Proctor estándar	
		Espesor compactado: ≥ 250 mm - Vías locales y colectoras ≥ 300 mm - Vías arteriales y expresas	
Sub-base	CBR ≥ 40% 100% Compactación Proctor Modificado	CBR ≥ 30% 100% compactación Proctor Modificado	
Base	CBR ≥ 80% 100% Compactación Proctor Modificado	N.A.*	CBR ≥ 80% 100% Compactación Proctor Modificado
Imprimación capa de apoyo	Penetración de la Imprimación ≥ 5 mm	N.A.*	Cama de arena fina, de espesor comprendido entre 25 y 40 mm
Espesor de la capa de rodadura	Vías locales	≥ 50 mm	≥ 60 mm
	Vías colectoras	≥ 60 mm	≥ 80 mm
	Vías arteriales	≥ 70 mm	N.R.*
	Vías expresas	≥ 80 mm	N.R.*
Material	Vías locales	Concreto asfáltico***	M R. ≥ 3,4 Mpa (34 kg/cm ²)
	Vías colectoras		
	Vías arteriales		
	Vías expresas		
			f'c ≥ 38 Mpa (380 kg/cm ²)

Notas: *N.A.: No aplicable, **N.R.: No Recomendable, *** El concreto asfáltico debe ser hecho preferentemente con mezcla en caliente. Donde el Proyecto considere mezclas en frio, estas deben ser hechas con asfalto emulsificado.

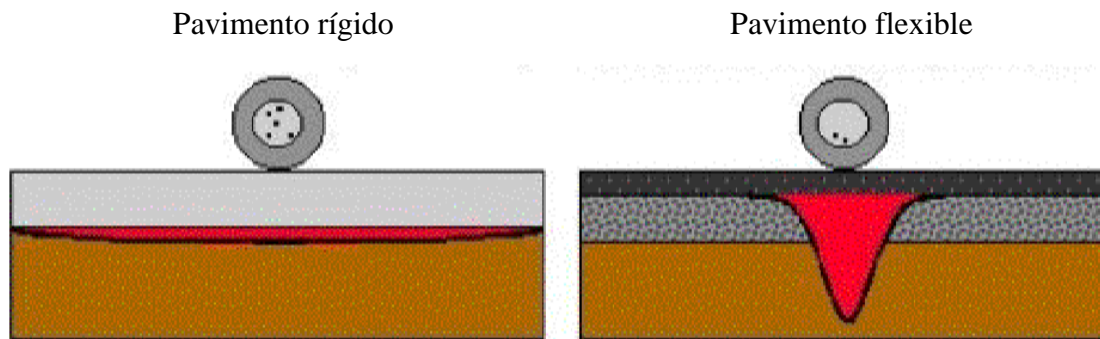
Fuente: SENCICO, (2010)

2.1.3.4 Pavimento rígido o hidráulico

Según el Montejo (2002) los pavimentos hidráulicos reciben el nombre de pavimentos rígidos porque están conformados por una losa de concreto, un material que es conocido por su rigidez. Debido a ello, la losa de concreto absorbe casi todos los esfuerzos

producidos por las repeticiones de las cargas de tránsito, transmitiendo solo una pequeña parte de estos esfuerzos a las capas inferiores, a la base o subbase y a la subrasante (p.5). Todo lo contrario sucede en los pavimentos flexibles, que al tener menor rigidez, transmiten los esfuerzos hacia las capas inferiores lo cual trae como consecuencia mayores tensiones en la sub-rasante, como se puede apreciar en la Figura 2.3.

Figura 2.3: Esquema del comportamiento de pavimentos



Fuente: Guía de pavimentos rígidos para carreteras

2.1.3.4.1 Tipos de pavimentos rígidos

a. Pavimentos de concreto hidráulico simple

Según Becerra (2012) este tipo de pavimentos rígidos no contienen armadura de acero en la losa de concreto y requieren de juntas longitudinales y transversales con un espaciamiento recomendable de corta longitud entre 3,50 a 6,00 m para controlar el agrietamiento, estas juntas pueden tener elementos de transferencia de carga que son pequeñas varillas de acero, conocidos como pasadores o dowels (p.35).

b. Pavimentos de concreto hidráulico con refuerzo de acero

La carpeta de rodadura de este tipo de pavimento está reforzado con una malla de acero y con varillas de acero en las juntas para garantizar la transferencia de carga entre losas (pasadores). La malla permite ampliar el espaciamiento entre juntas transversales, además también tiene la función de controlar la formación de fisuras dentro de los paños (p.36).

c. Pavimentos de concreto hidráulico con refuerzo continuo

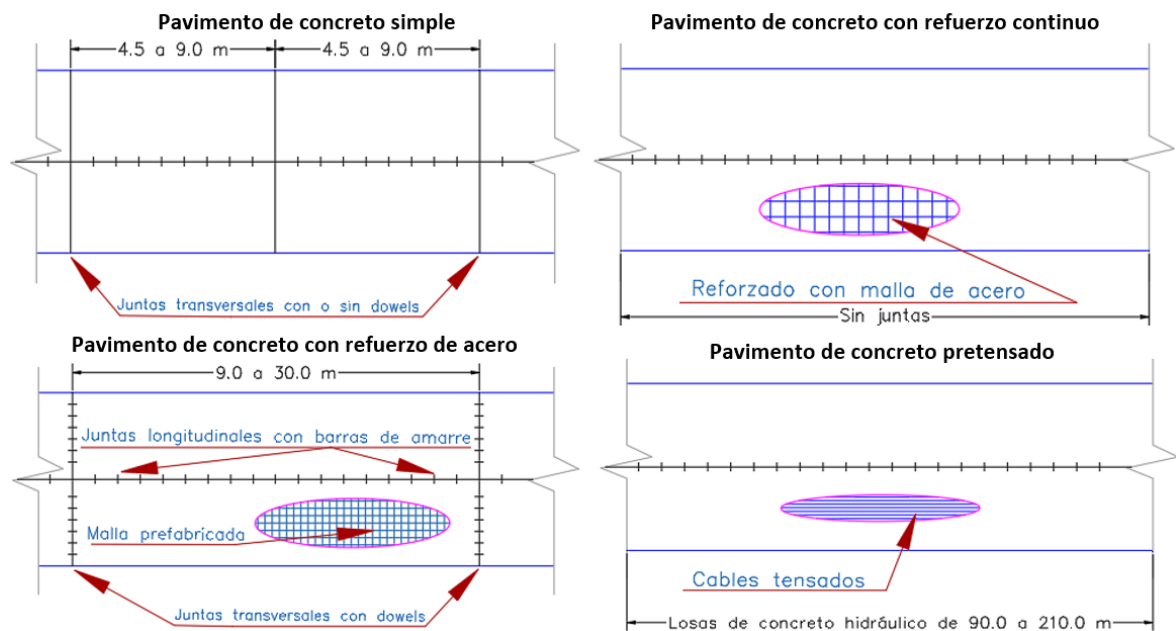
La losa de concreto de este pavimento rígido tiene un refuerzo continuo en dirección longitudinal, diseñada para que no sea necesaria el uso de juntas de contracción, la aparición de fisuras transversales es común a intervalos muy cortos, pero son controladas y se mantienen unidas por medio del acero de refuerzo (p.36).

d. Pavimentos de concreto hidráulico reforzado con fibras

La losa de concreto de este tipo de pavimento está reforzado por fibras, las cuales son incorporadas dentro de la mezcla de concreto, estas pueden ser de diferentes tipos de material tales como metálicos o sintéticos. Las fibras tienen la función de mejorar el comportamiento de las propiedades mecánicas del concreto y controlar la formación de fisuras en el pavimento.

En la Figura 2.4 se puede ver los diferentes tipos de pavimentos rígidos o hidráulicos:

Figura 2.4: Tipos de pavimentos rígidos



Fuente: Tesis: Efecto de las fibras de acero y polipropileno en la resistencia a la flexión del concreto para pavimentos rígidos

2.1.3.5 Componentes estructurales del pavimento rígido

Para Montalvo (2015) el pavimento está formado por un conjunto de componentes (ver la Figura 2.5) que permiten el adecuado funcionamiento mecánico de la estructura; transfiriendo las cargas de la superficie hacia las capas inferiores de la estructura del pavimento, siendo los siguientes:

2.1.3.6 Losa de concreto

La losa de concreto es la capa superior del pavimento rígido, donde los esfuerzos se distribuyen de acuerdo a la rigidez de la losa, haciendo que se transmita solo una pequeña parte de los esfuerzos a las capas inferiores, base o subbase y a la subrasante (p.31).

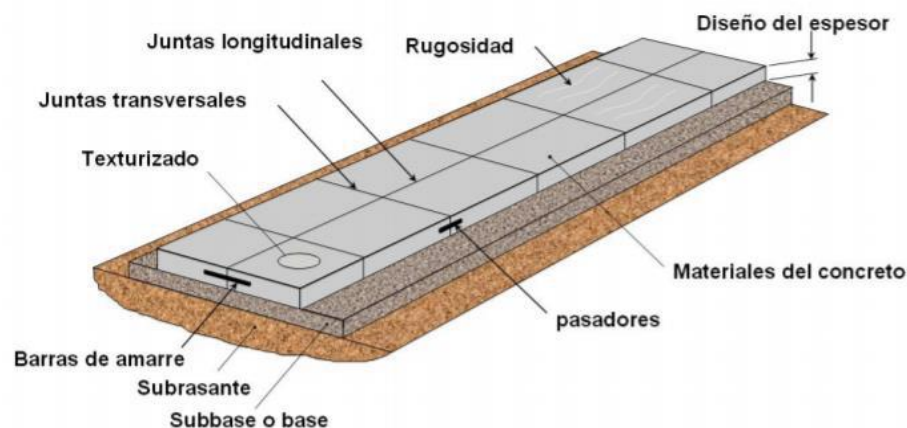
2.1.3.7 Base o subbase

La base o subbase de un pavimento rígido soporta solo una pequeña parte de los esfuerzos producidos por las cargas vehiculares. Por otro lado, estas capas pueden funcionar también como drenaje para proteger la estructura superior, controlando el ascenso del agua (p.31).

2.1.3.8 Subrasante

La subrasante es la capa de suelo natural donde se apoya el pavimento. Su objetivo es dar la estabilidad requerida al pavimento; además el diseño del pavimento inicia por la subrasante ya que es el suelo de soporte de toda la estructura del pavimento (p.31-32).

Figura 2.5: Partes del pavimento rígido



Fuente: Becerra, (2012)

2.1.3.9 Diseño de juntas en pavimento rígido

Las juntas deben estar diseñadas para transferir una porción de la carga entre losas adyacentes minimizando así deflexiones verticales en la junta producidas por las cargas de vehículos. El reducir deflexiones disminuye el potencial bombeo de materiales de capa sub base además del escalonamiento. Para que se obtenga una transferencia de carga satisfactoria se puede recurrir a uno de los siguientes mecanismos:

- Trabazón mecánica de los dispositivos de transferencia o barras pasa-juntas de acero liso
- Bases estabilizadas rígidas, que reduzcan el nivel de deflexión
- Trabazón de agregados

Se alcanza a través de la fricción entre las caras irregulares de la fisura que se forma en el aserrado. El clima y la dureza de los agregados tienen un gran impacto en la eficiencia de la transferencia. Esto puede ser incrementado usando agregados angulares y durables. La eficiencia de la trabazón de agregados disminuye rápidamente cuando se aumenta el ancho de la fisura y la frecuencia de aplicación de cargas pesadas, al punto de que el desempeño del pavimento puede ser afectado, por ello son recomendables solo en pavimentos urbanos que llevan un reducido volumen de camiones.

Barras pasa-juntas

Deben ser usadas en todas las rutas que llevan un volumen alto de camiones pesados. El propósito de las barras es transferir cargas a través de la junta, sin restringir movimientos producidos por la contracción y expansión del hormigón.

Bases estabilizadas

Han sido también usadas para aumentar la transferencia de carga.

2.1.3.9.1 Espaciamiento y tipo de juntas

El diseño de las juntas, que deben realizarse en el concreto, forma parte integrante del sistema estructural de los pavimentos de concreto, ya que sus características (espaciamiento, tipo, dimensiones, barras, sellos, etc.) son un factor importante a considerar con relación a los esfuerzos de la losa y la durabilidad del pavimento y por lo

tanto condicionan importantemente su diseño y comportamiento en servicio. Se distinguen los siguientes tipos de juntas:

- Juntas longitudinales.
- Juntas de separación y expansión.
- Juntas transversales de contracción.
- Juntas transversales de construcción.

2.1.3.9.2 Juntas longitudinales

Son aquellas que van paralelas al eje central de la vía, controlan la fisuración y en algunos casos delimitan las líneas de tráfico. Cuando se realiza el vaciado en una sola pasada de dos o más carriles, la transferencia de carga generalmente se produce por la trabazón mecánica de los agregados que se origina en la junta después del corte; sin embargo, se recomienda además el colocado de barras corrugadas, diseñadas en base a las recomendaciones de la Guía de Diseño AASHTO. Aunque el tiempo de corte no es tan crítico como en las juntas transversales, es conveniente efectuarlo tan pronto como sea posible especialmente cuando existen subbases estabilizadas u ocurren cambios de temperatura muy bruscos.

En el caso que se realice el vaciado por carriles y se tenga pensado el uso de barras de amarre, éstas deberán colocarse de forma manual en el caso de que no se tenga un insertador automático. Se deberá tener cuidado de no hacer coincidir estas barras con las pasajuntas transversales para evitar golpes y desalineamientos.

Es recomendado que las juntas longitudinales sean cortadas y selladas para evitar la infiltración de agua.

Figura 2.6: Junta longitudinal con barras de amarre esperando a las losas adyacentes



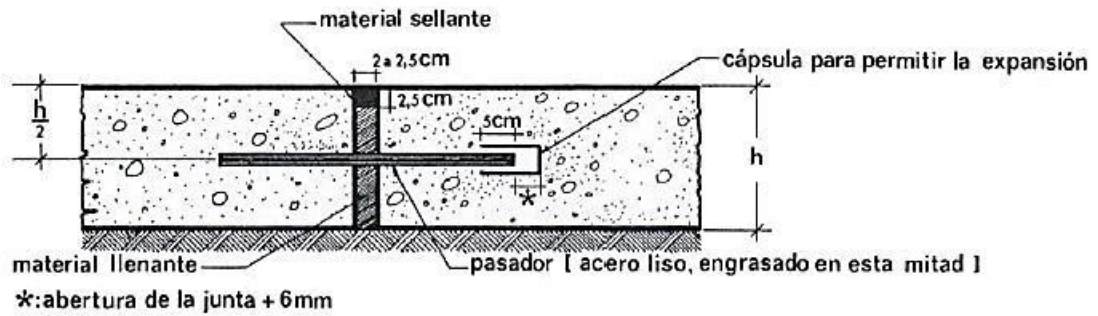
Fuente: Lineamientos generales para el diseño geométrico de juntas, Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón (IBCH)

2.1.3.9.3 Juntas de separación y expansión

Son construidas para permitir el movimiento de las losas sin dañar pavimentos adyacentes, intersección de calles, estructuras de drenaje, puentes y otras estructuras fijas. Existen dos tipos de juntas de expansión, dependiendo su necesidad de empleo.

El primer tipo es la junta con barras lisas para transferencia de cargas, cada una de las cuales está provista en uno de sus extremos de un capuchón, que permite que las barras se muevan libremente por expansión y contracción, tal como se muestra en la Figura 2.7. Debido a que estas juntas tienen una separación de 2 cm o más, requieren la presencia de un material de relleno preformado, constituido por un material flexible, no extruible y no absorbente, cubriendo todo el ancho y espesor de la losa, por debajo de 2,5 cm de la superficie, finalmente se colocará el sello que deberá ser compatible con el relleno preformado.

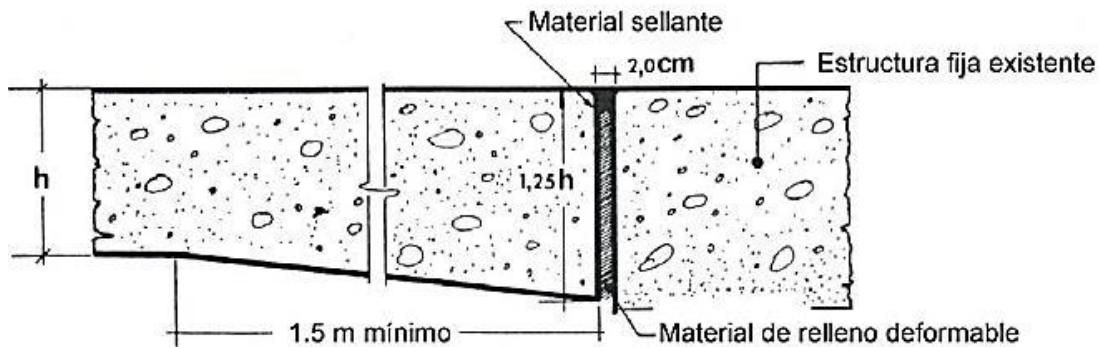
Figura 2.7: Junta de expansión tipo 1



Fuente: Lineamientos generales para el diseño geométrico de juntas, Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón (IBCH)

El otro tipo de junta de expansión es aquella que no tiene dispositivos de transferencia de cargas, el espesor de la losa se incrementa gradualmente en un 25 % en el último metro y medio para reducir los esfuerzos en la junta como se muestra en la Imagen 2.21. En lo que respecta al sello, se siguen las mismas recomendaciones descritas para el primer tipo de junta de expansión. Generalmente este tipo de juntas se construye cuando se tiene una estructura fija rígida tal como un puente en el que no se ha previsto el colocado de barras pasajuntas con anterioridad.

Figura 2.8: Junta de expansión tipo 2



Fuente: Lineamientos generales para el diseño geométrico de juntas, Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón (IBCH)

2.1.3.9.4 Juntas transversales de contracción

Son juntas construidas transversalmente al eje central de la vía y espaciadas para controlar la fisuración transversal de la losa. Se han realizado estudios que han demostrado que el espesor del pavimento, rigidez de la base y el clima afectan la máxima separación esperada entre juntas transversales. Otras investigaciones indican también que hay una relación general entre la longitud de la losa (L) con el radio de rigidez relativa (ρ) y la fisuración transversal. El radio de rigidez relativa es un término definido por Westergaard que cuantifica la relación entre la rigidez de la fundación y la rigidez de la losa. El radio de rigidez relativa tiene una dimensión lineal y es determinado por la siguiente ecuación:

$$\rho = \left[\frac{Eh^3}{12k(1 - \mu^2)} \right]^{0.25}$$

Donde:

ρ = Radio de rigidez relativa (pulgadas).

E = Módulo de elasticidad del hormigón (psi).

h = Espesor del pavimento (pulgadas).

μ = Relación de Poisson del pavimento.

k = Módulo de reacción de la subrasante (psi).

Datos de estas investigaciones indican que hay un incremento en la fisuración transversal cuando el radio L/ρ excede 5,0. Usando el criterio de que el máximo radio L/ρ es de 5,0, el espacio de juntas disponible se incrementaría con el espesor de la losa, pero disminuiría con el incremento de las condiciones de soporte de la fundación.

El intervalo de juntas se diseña para evitar fisuras transversales intermedias. Usualmente, el espacio entre juntas no debe ser mayor a 24 veces el espesor de la losa. Es importante también mantener las losas lo más cuadradas posible. El espaciamiento entre juntas transversales tampoco debe exceder en 1,25 al ancho de la losa.

Cuando se diseñan barras pasajuntas, AASHTO recomienda usar barras de diámetro igual o mayor a 1/8 del espesor de la losa. La longitud de estas barras varía entre 40 a 45 cm.

Las pasajuntas se colocan a la mitad del espesor de la losa, con espaciamiento de 30 cm entre ejes de barra, colocándose la primera a 15 cm de la orilla de la losa. Estas varillas deben recubrirse con materiales que eviten su adherencia con el hormigón y que las protejan contra la corrosión. Se debe tener un especial cuidado con el alineamiento; pequeñas desviaciones entre los extremos de la barra ya sea en sentido vertical u horizontal respecto a su dirección teórica que debe ser paralela al eje del pavimento, pueden ocasionar agrietamientos.

Figura 2.9: Colocación del sello en una junta transversal de contracción



Fuente: Lineamientos generales para el diseño geométrico de juntas, Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón (IBCH)

2.1.3.9.5 Juntas transversales de construcción

Son juntas construidas al final del día de trabajo u otra interrupción de colocado si se produce un lapso mayor a 60 minutos en clima cálido y 90 minutos en clima frío, este tiempo es medido desde la elaboración del hormigón hasta su puesta en obra y posterior acabado. Cuando es posible, estas juntas deben ser construidas coincidiendo con una junta de contracción, en el caso de que esto no sea posible, su ubicación deberá ser dentro el tercio medio de la longitud de la losa y siempre en forma perpendicular a la línea central. Estas juntas, al igual que las transversales de contracción, requieren pasajuntas lisas para proporcionar la transferencia de carga necesaria, siguiendo todas las recomendaciones ya

mencionadas. Solo en el caso de que la junta se localice en el tercio central de la losa y ya existan losas adyacentes se deberán colocar barras de acero corrugado, para evitar que esta junta se refleje en las losas adyacentes. Se recomienda que estas barras sean del mismo diámetro de las barras lisas.

Para la construcción de estas juntas, se debe usar un encofrado de cara plana, perforando espacios para alojar las barras pasajuntas.

Figura 2.10: Junta transversal de construcción



Fuente: Lineamientos generales para el diseño geométrico de juntas, Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón (IBCH)

2.1.4 Materiales del pavimento rígido

a. Concreto hidráulico

Según Sánchez (2001) el concreto es una mezcla formada por proporciones adecuadas de cemento, agua, agregados y opcionalmente aditivos, con un comportamiento plástico y moldeable antes de su fraguado, y que al fraguar toma una consistencia rígida, con propiedades aislantes y resistentes a grandes esfuerzos, ideal para la construcción (p.19).

b. Componentes del concreto hidráulico

- Cemento
- Agregados
- Agua
- Aditivos

2.1.4.1 Cemento

El cemento portland hidráulico es un material de caliza pulverizada con propiedades adhesivas y cohesivas, que permite aglutinar los agregados para fabricar el concreto. Además, el cemento se denomina hidráulico porque fragua y endurece al reaccionar químicamente con el agua (p.27).

El cemento portland se clasifica en 5 tipos:

- Tipo I: Cemento de uso normal en obras civiles que no requiere de alguna característica especial.
- Tipo II: Cemento con moderado calor de hidratación y tiene una resistencia moderada a la acción de los sulfatos.
- Tipo III: Cemento de altas resistencias iniciales, usado para estructuras que requieran una rápida puesta de servicio.
- Tipo IV: Cemento con bajo calor de hidratación, usado para la fabricación de concretos masivos.

Tipo V: Cemento de alta resistencia al ataque de los sulfatos (p.49).

Cada uno de los tipos de cemento Portland indicados debe cumplir con los requisitos físicos y químicos que están establecidos en la Normas Técnicas.

En el presente trabajo se empleará un cemento del Tipo I debido a que es el cemento

Portland ordinario de uso general, el cual se lo utiliza en la elaboración de hormigones que estarán expuestos al suelo o al agua del subsuelo.

2.1.4.2 Ensayos a realizar al cemento portland

Finura del cemento método por tamizado

El objetivo de este método es la determinación de la finura del cemento por medio del tamiz de malla N°40 y N°200.

La finura del cemento por este método se lo calcula con la siguiente ecuación:

$$F = (Pr / 50) * 100$$

Peso específico del cemento hidráulico (ASTM C1-88 – AASHTO T-133)

Este método tiene por objetivo establecer el método de ensayo para determinar el peso específico del cemento hidráulico. Su principal utilidad está relacionada con el diseño y control de las mezclas de hormigón.

2.1.4.3 Agregados o áridos

Según Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi (2004) los agregados o áridos usados en la elaboración del concreto son la arena y la grava, provenientes de rocas erosionadas por agentes naturales o por trituración mecánica y tamizados de rocas. Los agregados forman el 60% al 75% del volumen del concreto, por lo que tienen gran influencia en las propiedades mecánicas del concreto fresco y endurecido, en las dosificaciones de la mezcla y en la economía del concreto (p.103).

Los agregados o áridos se clasifican en:

– Agregado fino

Según Sánchez (2001) los agregados finos como la arena, provienen de la desintegración natural o artificial de las rocas, los cuales pasan el tamiz N° 4 o 4,76 mm y quedan retenidos en el tamiz N° 200 o 74 µm (p.70).

– Agregado grueso

Los agregados gruesos como la grava y piedra chancada o triturada, son provenientes de la desintegración natural o artificial de las rocas, y se considera el material retenido en el tamiz N° 4 o 4,76 mm, o también definido como las partículas mayores de 4,75 mm (p.70).

En general los agregados se han clasificado de varias maneras a través del tiempo, pero principalmente desde los puntos de vista de:

- Procedencia.
- Densidad.
- Tamaño.
- Forma.
- Textura.

2.1.4.4 Clasificación por su procedencia

De acuerdo con el origen de los agregados, según su procedencia ya sea de fuentes naturales o a partir de productos industriales, se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Agregados naturales.
- Agregados artificiales.

2.1.4.5 Agregados naturales

Son aquellos procedentes de la explotación de fuentes naturales tales como: depósitos de arrastres fluviales (arenas y gravas de río) o glaciares (cantos rodados) y de canteras de diversas rocas y piedras naturales. Pueden usarse tal como se hallen o variando la distribución de tamaños de sus partículas, si ello se requiere. Todas las partículas que provienen de los agregados tienen su origen en una masa mayor la que se ha fragmentado por procesos naturales como intemperismo y abrasión, o mediante trituración mecánica realizada por el hombre, por lo que gran parte de sus características vienen dadas por la roca madre que le dio su origen.

2.1.4.6 Agregados artificiales

Por lo general, los agregados artificiales se obtienen a partir de productos y procesos industriales tales como: arcillas expandidas, escorias de alto horno, clinker, limaduras de hierro y otros, comúnmente estos son de mayor o menor densidad que los agregados corrientes.

2.1.4.7 Agregados livianos artificiales

Los áridos livianos artificiales se obtienen a través de un tratamiento térmico a elevadas temperaturas a determinados productos que poseen la propiedad de desprender gas al tiempo que se reblandecen, con lo cual se expanden. Por efecto de la temperatura la capa superficial se vitrifica y el gas queda encerrado en el interior. Una vez enfriado se obtiene un material liviano y duro de superficie lisa y forma más o menos regular. Los más corrientes son las arcillas expandidas, las pizarras o esquistos expandidos y las cenizas volantes calcinadas.

La densidad aparente de estos áridos oscila entre los 300 y 1000 kg/m³. La absorción de agua de estos agregados, varían según la materia prima, el proceso de fabricación y el tamaño del grano; el intervalo de variación oscila entre un 8 y 25 por ciento sobre el peso deseado de los áridos mayores.

2.1.4.8 Ensayos realizados a los agregados

2.1.4.9 Granulometría (ASTM E-40 AASHTO T-27)

Las propiedades físicas de los agregados son:

– Granulometría

La granulometría es la distribución de los tamaños o diámetros de las partículas de un agregado. Esta se determina por un análisis granulométrico, que consiste en separar una muestra de agregado en porciones de igual tamaño, para ello se hace uso de una serie de tamices con aberturas cuadradas estandarizadas, por donde pasa el agregado.

Los agregados deben estar dentro de los límites de gradación que están establecidos de acuerdo al manual técnico para el diseño de carreteras propuesta por la ABC la misma que se basa en las normas ASTM y AASHTO.

Especificaciones normalizadas para agregados en concreto (ver la Tabla 2.2 y Tabla 2.3).

Tabla 2.2: Granulometría del agregado fino

Tipo de tamiz	Porcentaje que pasa en peso (AASHTO T-27)100
3/8"	100
N° 4	95 - 100
N° 16	45 - 80
N° 50	10 - 30
N° 100	2 - 10
N° 200	0 - 3

Fuente: Manual técnico para el diseño de carreteras ABC

Tabla 2.3: Granulometría del agregado grueso

Graduación para agregados gruesos	Tamaño de tamices									
	3"	2 1/2"	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8
	Porcentaje en peso que pasa los tamices (AASHTO T-27)									
1. 1/2" N°. 4	-	-	-	-	-	100	90 -100	40 -70	0 -15	0 -5
3/4" N°. 4	-	-	-	-	100	95 -100	-	20 -55	0 -10	0 -5
1" N°. 4	-	-	-	100	95 -100	-	-	-	0 -10	0 -5
1 1/2" N°.4	-	-	100	95 -100	-	35 -100	25 -80	10 -30	0 -5	-
2" N°. 4	-	100	95 -100	-	35 -70	-	-	-	0 -5	-
2. 1/2" N°. 4	100	95 -100	-	35 -70	-	10 -30	10 -30	-	0 -5	-
1 1/2" 3/4"	-	-	35 -70	90 -100	35 -70	0 -15	-	0 -5	-	-
2" 1/2"	-	100	90 -100	35 -70	-	-	0 -5	-	-	-
2 1/2" 1 1/2"	100	90 -100	35-70	0-15	20 -55	0 -5	-	-	-	-

Fuente: Manual técnico para el diseño de carreteras ABC

Curva granulométrica.- Según Sánchez (2001) la curva granulométrica es la representación gráfica del resultado del análisis granulométrico. En esta gráfica, el eje vertical con escala aritmética, representa el porcentaje acumulado que pasa a través de los tamices; y el eje horizontal con escala logarítmica, representa las aberturas de los tamices (p.75).

- Tamaño máximo (TM)

El tamaño máximo es el mayor tamaño del agregado grueso dentro de la masa. Se determina como la abertura del menor tamiz del conjunto que permite el paso del 100% del material.

- **Tamaño máximo nominal (TMN)**

El tamaño máximo nominal es más útil, ya que indica el tamaño promedio de las partículas más grandes que hay dentro de la masa de agregado grueso. Se determina como la abertura del tamiz inmediatamente superior a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado sea el 15% o más del material.

2.1.4.10 Determinación del módulo de finura de la arena (ASTM C-125)

El módulo de finura se obtiene con la suma de los porcentajes acumulados en los tamices estándares divididos entre 100. Es un factor empírico que hace una evaluación de grados de finura del agregado fino o arena.

El porcentaje retenido en cualquier tamiz no debe sobrepasar de 45%

La serie de tamices con tapa y bandeja para agregado fino son N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100.

$$\text{Modulo de finura} = \frac{\sum \% \text{ Retenido Acumulado (hasta el tamiz\# 100)}}{100}$$

2.1.4.11 Peso específico y absorción de agua en áridos gruesos y finos (AASHTO T-85, AASHTO T-84)

Porcentaje de absorción.-Es la capacidad de absorción de las partículas del agregado, esta propiedad se calcula por diferencia de pesos, entre el peso saturado superficialmente seco y el peso seco. Se expresa como un porcentaje del peso seco del agregado.

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de los áridos.

Es aplicable a los áridos gruesos y finos de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m³, se emplean en la elaboración de hormigones y mezclas asfálticas.

$$\% \text{ Absorción} = \frac{\text{Peso saturado sup. seco} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \times 100$$

2.1.4.12 Desgaste mediante la máquina de los Ángeles (ASTM E-131, AASHTO T96-99)

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los áridos mayores a 2,36 mm, de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m³, mediante la máquina de los Ángeles.

2.1.4.13 Desintegración sulfato de sodio (ASTM E-88, AASHTO T104-99)

Este método establece el procedimiento para determinar la desintegración de los áridos mediante soluciones de sulfato de sodio o sulfato de magnesio. El uso de una u otra sal es, pero sus resultados no son comparables.

Este método se aplica a los áridos de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m³, que se utilizan en la elaboración de morteros, hormigones y, mezclas asfálticas.

2.1.4.14 Caras fracturadas en los áridos (ASTM D-5821)

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje, en peso de material que presenta una o más caras fracturadas de las muestras de áridos.

2.1.4.15 Peso unitario de los agregados finos o gruesos (AASHTO T-19, ASTM C-29)

Peso unitario; también se le llama peso volumétrico del agregado y se define como el peso suelto o compactado que llena en un molde cilíndrico en tres capas con 25 golpes de varilla y se enrasa con la misma, alcanzando un determinado volumen unitario, esta propiedad se mide en Kg/m³ del material.

2.1.4.16 Densidad

La densidad es la relación del peso respecto al volumen de una masa, se debe tener un cuidado especial al calcular la densidad en el caso de los agregados para el concreto, ya que estos serán influenciados por su permeabilidad interna, el porcentaje de vacíos y agua entre sus partículas.

2.1.4.17 Agua

Debido a la gran importancia del agua dentro de la mezcla de concreto, se tiene que tener en cuenta los límites permisibles de los componentes dañinos en el agua que se especifican en la Norma Boliviana CBH 87: El agua, tanto para el amasado como para el curado del hormigón, debe ser limpia y deberán rechazarse las que no cumplan una o varias de las siguientes condiciones:

- Exponente de hidrógeno PH ≥ 5
(Determinando según la norma NB/UNE 7234)
- Sustancias disueltas ≤ 15 g/L
(Determinadas según la norma NB/UNE 7130)
- Sulfatos, expresados en S04 ≤ 1 g/L
(Determinados según la norma NB/UNE 7131)
- Ion cloro Cl ≤ 6 g/L
(Determinado según la norma NB/UNE 7178)
- Hidratos de carbono..... 0
(Determinados según la norma NB/UNE 7132)
- Sustancias orgánicas solubles en éter < 15 g/L
(Determinados según la norma NB/UNE 7235)

La toma de muestra para estos ensayos, se hará según la norma NB/UNE 7236.

2.1.4.18 Aditivos

Según Sánchez (2001) desde mediados del siglo XX, se viene utilizando aditivos para mejorar algunas propiedades del concreto, estos aditivos se añaden a la mezcla inmediatamente antes o durante su mezclado, pudiendo concederle propiedades retardantes y acelerantes de fragua, plastificantes, entre otras (p.23).

2.1.4.19 Hormigón para pavimento rígido

El hormigón o concreto es el material que resulta de la mezcla de cemento u otro conglomerante con áridos ya sean grava, gravilla y arena además de agua.

El hormigón y sus propiedades dependen en general de la calidad y de las proporciones de los componentes que van en la mezcla, como también de las condiciones de humedad y temperatura durante el proceso de fabricación y fraguado.

Para conseguir propiedades especiales del hormigón como mejor trabajabilidad, mayor resistencia, baja densidad etc. se pueden añadir otros componentes como aditivos químicos, micro silice, limallas de hierro, etc., o se pueden reemplazar sus componentes básicos por componentes con características especiales como agregados livianos, agregados pesados, cementos de fraguado lento, etc.

El hormigón es un material sumamente resistente a la compresión, pero extremadamente frágil y débil a solicitaciones de tracción.

Para aprovechar sus fortalezas y superar sus limitaciones, en estructuras se utiliza el hormigón combinado con barras de acero resistente a la tracción, lo que se conoce como hormigón armado.

2.1.5 Propiedades del hormigón fresco

Se denomina hormigón fresco al que por poseer plasticidad tiene la facultad de poder moldearse.

El hormigón fresco tiene una vida que está comprendida entre el momento en que abandona la amasadora u hormigonera y aquél en que se inicia el fraguado del cemento.

Esta vida es variable en función del tipo de cemento que se va a emplear, la dosificación del agua, temperatura, empleo de aditivos, etc.

2.1.5.1 Consistencia

La consistencia del hormigón es la oposición que presenta la masa en estado fresco a experimentar deformaciones.

La consistencia, que es un indicador de la docilidad, es muy sensible a las variaciones de agua en la masa pudiendo considerarse que, para una composición dada, la consistencia de un hormigón está en función de la cantidad de agua de amasado.

En su puesta en obra, el hormigón además de tener la consistencia adecuada, debe rellenar perfectamente todos los huecos de un molde y adaptarse a las armaduras envolviéndolos

para tener una buena adherencia, eliminando los huecos de la masa, salvo los poros que queden por la pérdida del agua en exceso sobre la necesaria para la hidratación del cemento.

Todo esto debe conseguirse con el mínimo posible de energía, es decir, empleando hormigones dóciles o trabajables.

La consistencia depende fundamentalmente de:

- Agua de amasado.
- Tamaño máximo del árido.
- Granulometría.
- Forma de los áridos

La medida de la consistencia de un hormigón fresco puede realizarse por diversos métodos, siendo el más universal el empleo del cono de Abrams. Es un molde troncocónico metálico de 30 cm de altura y de 10 y 20 cm de diámetro inferior y superior respectivamente.

Se llena de hormigón, se compacta con una barra de acero de 16, se enraza superiormente y se retira el molde, midiendo el descenso de la superficie superior del hormigón.

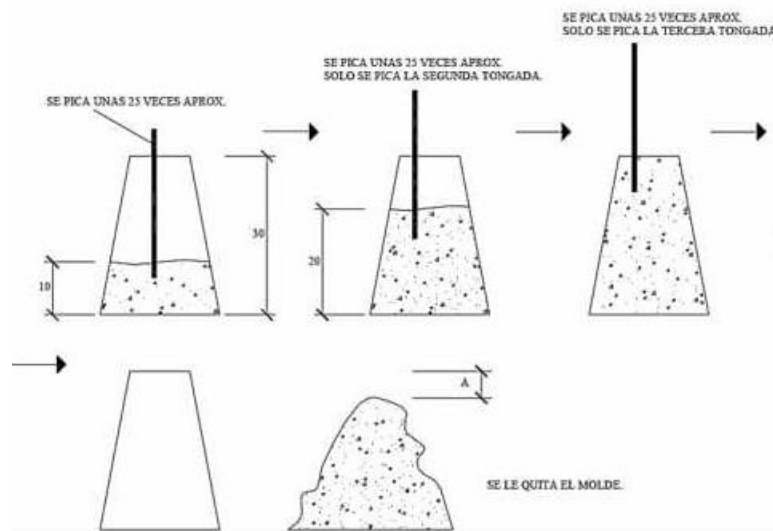
Según el descenso o asiento se obtiene las siguientes consistencias:

Tabla 2.4: *Rango de consistencias*

Consistencia	Asentamiento (cm)	Tolerancia (cm)
Seca	0 a 2	0
Plástica	3 a 5	± 1
Blanda	6 a 9	± 1
Fluida	10 a 15	± 2

Fuente: *Manual de carreteras de la ABC*

Figura 2.11: Método del cono de Abrams



Fuente: [www.construmatica.com /construpedia/Cono_de_Abrams](http://www.construmatica.com/construpedia/Cono_de_Abrams)

2.1.5.2 Densidad

La densidad es un factor muy importante que se debe tener en cuenta para la uniformidad del hormigón, debido a que el peso varía según la granulometría, la humedad, el agua de amasado y modificaciones del asentamiento.

2.1.5.3 Homogeneidad

Es la capacidad que tienen los componentes del hormigón para ser distribuidos regularmente en la masa, es decir tendrá una homogeneidad buena cuando los componentes se encuentren perfectamente distribuidos y en proporciones iguales a lo largo de la masa; se lo puede determinar de una manera visual.

2.1.5.4 Trabajabilidad

Es la facilidad que tiene la mezcla para poder mezclarse, manejarse, transportarse y compactarse con la mínima pérdida de homogeneidad, a mayor facilidad mejor será la trabajabilidad, se puede determinar mediante el proceso de elaboración de la mezcla de hormigón.

2.1.6 Propiedades del hormigón endurecido

Las propiedades del hormigón endurecido dependen de las características y proporciones de los materiales que lo componen y de las condiciones ambientales a las que se encuentre expuesto.

Entre estas propiedades tenemos:

2.1.6.1 Densidad

Es la cantidad de peso por la unidad de volumen:

Densidad = Peso / Volumen.

Tabla 2.5: Densidades del hormigón.

Tipos de hormigón		Densidades
Hormigones ligeros		De 200 a 1500 kg/m ³
Hormigón ordinario :	Apisonados	De 2000 a 2200 kg/m ³
	Vibrados	De 2300 a 2400 kg/m ³
	Centrifugados	De 2400 a 2500 kg/m ³
	Proyectados	De 2500 a 2600 kg/m ³
Hormigones pesados		Hasta 4000 kg/m ³

Fuente: www.construmatica.com

2.1.6.2 Resistencia mecánica

Es la capacidad que tiene el hormigón para soportar las cargas solicitadas sin romperse o agrietarse. Varían según el tipo de esfuerzos a los que esté sometido, la resistencia a la compresión habitualmente es diez veces mayor que su resistencia a la tracción. Debido a su baja resistencia a la tracción, se incorporan barras de hierro o acero al hormigón para conformar el hormigón armado.

Para la resistencia a la compresión en el presente estudio se tomará como patrón la resistencia a la edad de 28 días.

2.1.6.3 Porosidad

La porosidad es considerada de acuerdo a la proporción de huecos respecto a la masa total, esto influye en la resistencia, densidad y permeabilidad del hormigón.

2.1.7 Métodos de diseño del pavimento rígido

Los métodos de diseño para los pavimentos rígidos o de concreto más utilizados son los propuestos por AASHTO en 1993 y por Portland Cement Association (PCA) en 1984.

2.1.7.1 Método de diseño PCA

SENCICO (2010) sugiere el método PCA para el diseño estructural de pavimentos urbanos de concreto de cemento portland, este método determina el espesor de pavimentos de concreto simple y reforzado con mallas. El Método de diseño PCA considera dos criterios de falla de un pavimento para su diseño:

- Criterio de erosión: Los pavimentos con altos volúmenes de tráfico muestran fallas por bombeo y erosión de la sub-rasante o sub-base, debido al elevado número de cargas pesadas o cerca de las juntas o bordes del pavimento.
- Criterio de fatiga por flexión del pavimento: Esta falla ocurre por el exceso de cargas repetidas que producen esfuerzos de pandeo en el pavimento, resultando eventualmente en el agrietamiento por fatiga. Este criterio controla el diseño de pavimentos de la metodología PCA.

Los factores más importantes que se deberán tomar en cuenta en el diseño de pavimentos urbanos de concreto para la determinación del espesor de diseño:

- Resistencia a Flexión o Módulo de Rotura del concreto (MR).
- Resistencia de la Subrasante (Módulo K).
- Cargas de tránsito.
- Período de Diseño.
- Sardineles Integrales.
- Juntas.

2.1.7.2 Método de diseño AASHTO

El procedimiento incluido en la guía AASHTO determina el espesor D de un pavimento de hormigón para que éste pueda soportar el paso de un número W18 de ejes equivalentes de 18 kilolibras (8,2 t) sin que se produzca una disminución en el índice superior a un cierto valor Δ PSI. Dicho índice de servicio PSI es un valor que se calcula a partir de una serie de medidas en el pavimento (regularidad superficial, agrietamiento, baches), y que se ha comprobado que tiene una buena correspondencia con la calificación subjetiva que dan al mismo los usuarios.

La fórmula que relaciona las tres variables anteriores es la siguiente:

$$\log_{10}W_{18} = Z_R S_o + 7,35 \log_{10}(D + 1) - 0,06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,5 - 1} \right]}{1 + \frac{1,624 \times 1}{(D + 1)^8}} + (4,22 - 0,32p_t) \times \log_{10} \left[\frac{S_c C_d (D^{0,75} - 11,32)}{215,63 \times J \left(D^{0,75} - \frac{18,42}{\left(\frac{E_c}{k} \right)^{0,25}} \right)} \right]$$

Donde:

W18 = Número previsto de ejes equivalentes de 8.2 t, a lo largo del periodo de proyecto.

ZR = Fractil de la ley normal asociado al nivel de fiabilidad con el que se desea proyectar el pavimento.

So = Desviación estándar que combina por una parte la desviación estándar media de los errores de predicción del tráfico durante el periodo de proyecto, y por otra la desviación estándar de los errores en la predicción del comportamiento del pavimento (expresado en ejes de 8.2 t) al alcanzar un determinado índice de servicio terminal.

D = Espesor del pavimento de hormigón (en pulgadas).

Δ PSI = Diferencia entre los índices de servicio inicial y final.

Pt = Índice de servicio final.

Sc = Resistencia media del hormigón (en psi, libras por pulgada cuadrada) a flexo tracción a los 28 días (método de carga en los tercios de luz).

Cd = Coeficiente de drenaje.

J = Coeficiente de transmisión de cargas en las juntas.

Ec = Módulo de elasticidad del hormigón, en psi.

K = Módulo de reacción o de balasto (en psi, libras por pulgada cúbica) de la superficie (base, sub-base o subrasante) en la que se apoya el pavimento de hormigón.

El método de diseño para estructuras de pavimento que propone la AASHTO en la edición de 1993, se basa principalmente en la información y en los datos empíricos obtenidos de la prueba AASHO Road Test, llevada a cabo durante el periodo de 1958 a 1960 en Ottawa Illinois. “El objetivo principal de esta prueba fue determinar relaciones significativas entre el comportamiento de varias secciones de pavimento y las cargas aplicadas sobre ellas que pudiesen ser usadas en el desarrollo de criterios y procedimientos de diseño de pavimentos”.

De la evaluación de ambos métodos se ha determinado que en losas con longitudes inferiores a 450 cm reflejan mejores resultados respecto a su comportamiento mecánico, así como la disminución de espesores, ya que las losas se ven sometidas a menores cargas y sollicitaciones, en función de la estandarización de las dimensiones de los diferentes tipos de vehículos, que se ve reflejado en el número de ejes equivalentes a los que son sometidas cada una de las losas.

2.1.7.3 Esfuerzos y desplazamientos en pavimentos rígidos

2.1.7.4 Concepto de esfuerzo

Los esfuerzos a que está sometido un pavimento rígido se originan por una gran diversidad de causas, entre las que se puede mencionar los cambios uniformes y no uniformes de temperatura, cambios de humedad y cargas del tránsito.

2.1.7.5 Tipos de esfuerzos

2.1.7.5.1 Esfuerzos producidos por cambio de temperatura

Alabeo por gradiente térmico

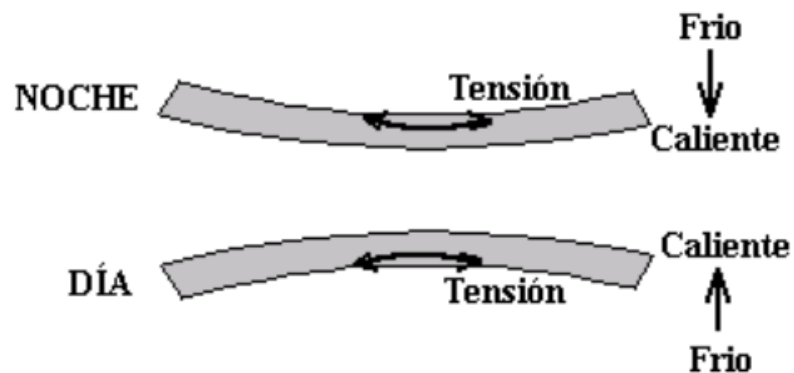
Al cambiar la temperatura ambiente durante el día, también cambia la temperatura del pavimento.

Este ciclo térmico crea un gradiente térmico en la losa, el cual produce un alabeo en la misma.

El peso propio de la losa y su contacto con la superficie de apoyo restringen el movimiento, generándose esfuerzos.

Dependiendo de la hora del día, estos esfuerzos se pueden sumar o restar de los efectos producidos por las cargas del tránsito.

Figura 2.12: Alabeo de las losas de los pavimentos de concreto



Fuente: Curso básico de diseño de pavimentos. Módulo 3, Ing. Fernando Sánchez Sabogal

Contracciones durante el fraguado.

La fricción entre la losa y la fundación, debido a la caída de temperatura durante el fraguado del concreto, produce esfuerzos en el concreto y en la armadura que contenga.

El diseño de la armadura de refuerzo de un pavimento rígido se basa en la consideración de los esfuerzos de fricción.

Los esfuerzos friccionales solo son importantes en losas de gran longitud.

Expansión y contracción por cambios uniformes de temperatura

Las aberturas de las juntas cambian a causa de los cambios de temperatura, alterando las condiciones de transferencia de carga.

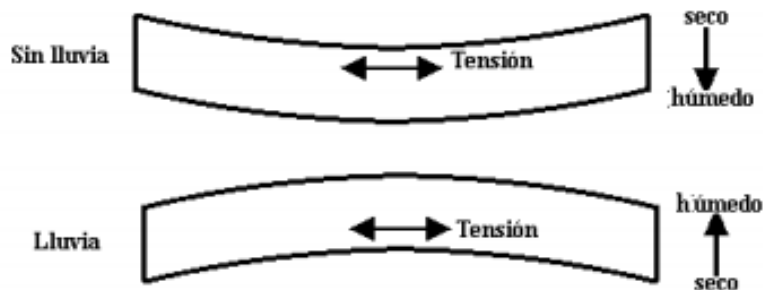
Las características de contracción controlan la abertura de las juntas transversales del pavimento.

El material que se coloque para sellar las juntas deberá ser capaz de soportar, sin desprenderse, los movimientos del concreto cuando ocurra la máxima contracción.

2.1.7.5.2 Esfuerzos producidos por cambios de humedad

El humedecimiento y secado del concreto genera un fenómeno similar al que se produce cuando se presentan gradientes térmicos. Los cambios de humedad generan un encogimiento, o un alargamiento, de menor magnitud a los que se producen por los gradientes térmicos y se deben tener en cuenta al calcular los cambios dimensionales. Los gradientes de humedad en el espesor generan encorvamientos (alabeos) en la superficie de los elementos de concreto, que pueden afectar el comportamiento de cualquier pieza puesta sobre esa superficie.

Figura 2.13: Alabeo por cambio de humedad



Fuente: Curso básico de diseño de pavimentos. Módulo 3, Ing. Fernando Sánchez

Sabogal

2.1.7.5.3 Esfuerzos producidos por las cargas del tránsito

Las losas de concreto hidráulico al estar expuestas a cargas de tránsito presentan los siguientes esfuerzos:

Esfuerzos abrasivos causados por las llantas de los vehículos.

Esfuerzos directos de compresión y cortante causados por las cargas de las ruedas.

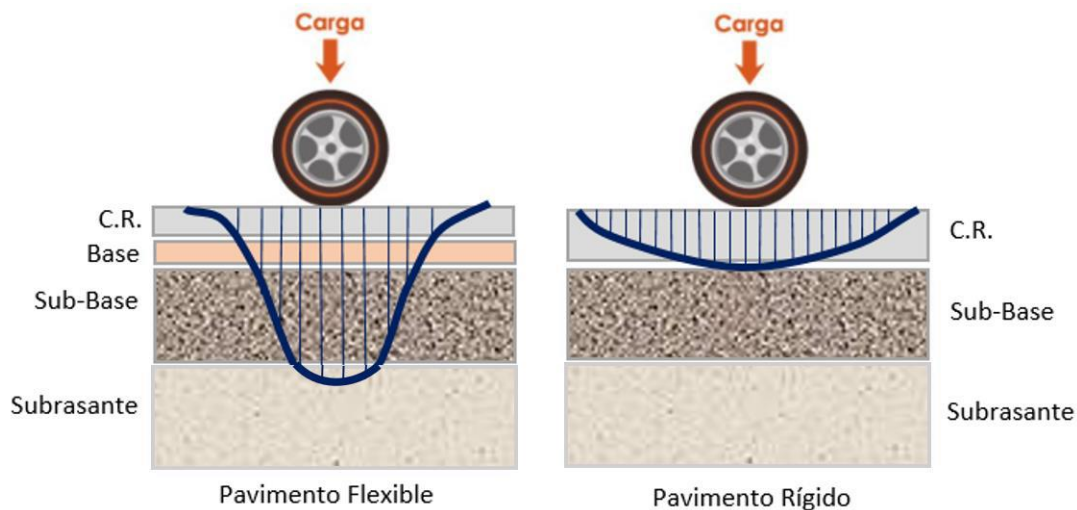
Esfuerzos de compresión y tensión que resultan de la de flexión de las losas bajo las cargas de las ruedas.

Los esfuerzos más importantes debido a las cargas son los de flexión, dado el alto impacto que tiene sobre la estructura.

2.1.7.6 Formación de fisuras por flexión en pavimentos rígidos

En un pavimento rígido, la losa de concreto sometida a cargas externas (vehículos), se generan esfuerzos que se distribuyen en un área grande del suelo (ver la Figura 2.14), con presiones máximas en el punto de aplicación de la carga (rueda del vehículo), que van disminuyendo a medida que se alejan del punto de aplicación de la carga.

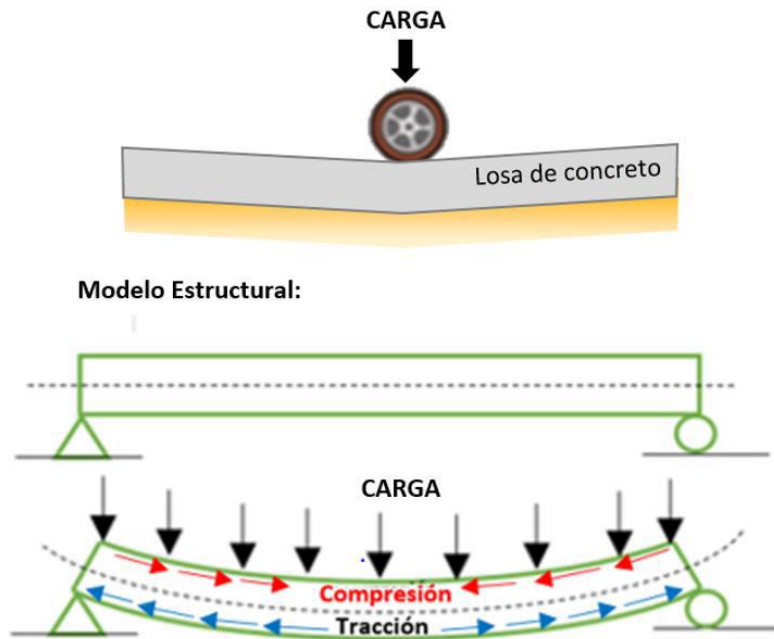
Figura 2.14: Trasmisión de cargas vehiculares al pavimento



Fuente: Elaboración propia

Esta distribución de esfuerzos genera pequeños desplazamientos verticales del pavimento rígido, y proporcionales a la magnitud del esfuerzo actuante. El comportamiento estructural del pavimento rígido puede modelarse como una viga de concreto simplemente apoyada, flexionándose por acción de las cargas vehiculares, tal como se observa en la Figura 2.15.

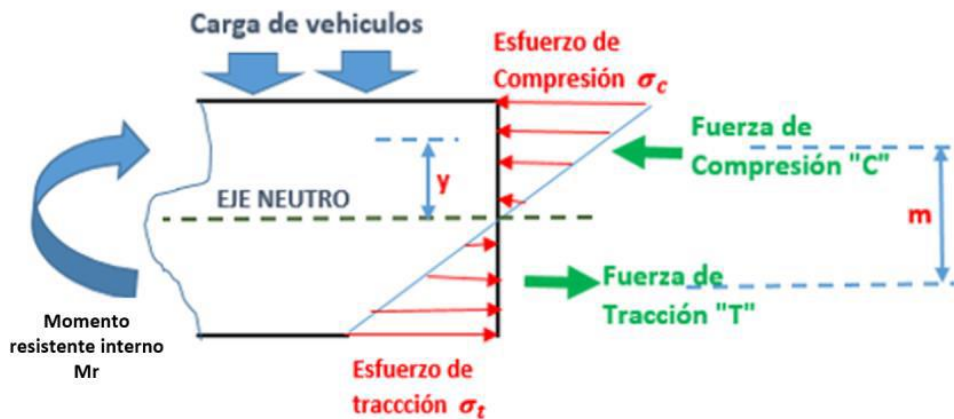
Figura 2.15: Modelo estructural simplificado de un pavimento rígido



Fuente: Elaboración propia

Si en el modelo estructural cortamos una sección transversal de la losa de concreto del pavimento, asumiendo que está trabajando dentro de un rango elástico, podemos hacer un diagrama simplificado de la distribución de esfuerzos internos de compresión y tracción que se generan en la sección de la losa, como resultado de su deformación por flexión, ver en la Figura 2.15.

Figura 2.16: Esfuerzos en sección de la losa de concreto en rango elástico

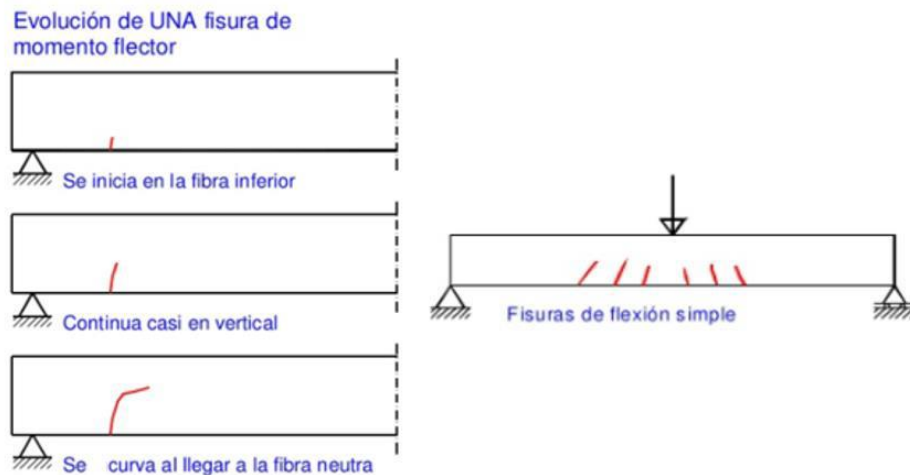


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.16, se observa que las cargas vehiculares sobre el pavimento generan los mayores esfuerzos de compresión en la parte superior de la losa de concreto, los mismos que van disminuyendo a medida que vamos bajando, hasta que el esfuerzo se vuelve nulo en una línea imaginaria denominada “eje neutro”, en el caso de un pavimento su sección es rectangular, por lo que el eje neutro pasa por la mitad del peralte de la losa de concreto. A medida que seguimos bajando, los esfuerzos se convierten en esfuerzos de tracción, haciéndose máximos en la parte más inferior de la losa de concreto.

Dentro de la clasificación de fisuras originadas en el estado endurecido, están las fisuras producidas por cargas que originan esfuerzos de flexión. Es de conocimiento que el concreto tiene una buena resistencia a los esfuerzos de compresión; pero es un material frágil a la tracción, es decir que tiene una baja resistencia a la tracción. Por lo que mientras los esfuerzos de tracción que se generan por la flexión sean menores a la capacidad resistente a flexión del concreto (módulo de rotura), la losa se flexionará y luego retornará a su posición inicial, sin sufrir ningún daño (formación de fisuras). Sin embargo, el concreto se fisurará si los esfuerzos de tracción por flexión llegan a superar al módulo de rotura del concreto (cargas adicionales no previstas) o por el exceso de cargas repetitivas de los vehículos (fisuras originadas por fatiga). Como los máximos esfuerzos de tracción están en las capas inferiores de la losa de concreto, entonces la fisura iniciará en la base de la losa y se propagará según se observa en la Figura 2.17.

Figura 2.17: Formación y propagación de fisuras por esfuerzos de flexión.



Fuente: Pérez, (2015)

Las fisuras originadas por esfuerzos a flexión se diferencian por tener mayor profundidad y aparecer de forma típica, por lo que es importante comprobar sus dimensiones y progresión de la fisura para determinar si constituyen un problema estructural en el pavimento rígido.

Es muy importante identificar las causas que originan las fisuras y grietas, patologías muy significativas en las obras de concreto, ya que permite a proyectistas y constructores que puedan plantear medidas preventivas para eliminar o disminuir su aparición.

2.1.8 Propiedades del pavimento rígido

El concreto que se empleará en este tipo de pavimentos deberá ser durable y resistente a las cargas y al desgaste.

Es necesario que cada una de estas propiedades se tenga en cuenta cuando se haga el diseño de la mezcla, por fortuna estas propiedades están ligadas directamente entre sí esto es si un concreto es fuerte es lógico suponer que sea durable y resistente al desgaste.

2.1.8.1 Propiedades del concreto

Son tres las propiedades del concreto que influyen en el diseño y en su comportamiento a lo largo de su vida útil:

- Resistencia a la tensión por flexión ($S'c$) módulo de ruptura (MR).
- Módulo de elasticidad del concreto (E_c).
- Durabilidad.

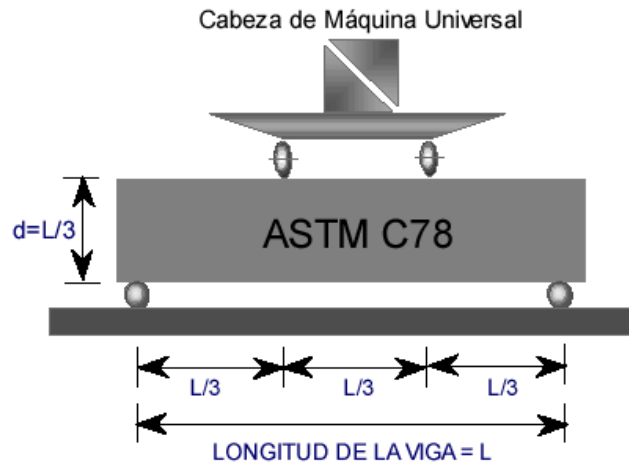
2.1.8.2 Módulo de ruptura (MR)

Los pavimentos de concreto trabajan principalmente a flexión; se recomienda que su especificación de resistencia sea trabajando a flexión, que se conoce como resistencia a la flexión por tensión ($S'c$) o Módulo de Ruptura (MR) normalmente especificada a los 28 días.

El módulo de ruptura se mide mediante ensayos de vigas de concreto aplicándoles cargas en los tercios de su claro de apoyo. Esta prueba está normalizada por la ASTM C-78. Existe una prueba similar con la aplicación de la carga al centro del claro que genera

resultados diferentes de resistencia a la flexión (aprox. 15% a 20% mayores) pero que no son los que considera AASHTO para el diseño.

Figura 2.18: Esquema de medida del módulo de rotura ASTM C-78



Fuente: "Pavimentos rígidos" Universidad Nacional de Colombia

Los valores recomendados para el Módulo de Ruptura varían desde los 41 kg/cm^2 (583 psi) hasta los 50 kg/cm^2 (711 psi) a 28 días dependiendo del uso que vayan a tener. En seguida se muestran valores recomendados, sin embargo el diseñador deberá elegir de acuerdo a un buen criterio.

De la resistencia promedio a la flexión del concreto (módulo de ruptura), el ACI especifica que este no debe ser menor de 45 kg/cm^2 a los 28 días de edad.

Pero si las características previamente conocidas de los cementos y agregados disponibles, indican que es difícil obtener esta resistencia económicamente, puede especificarse una resistencia promedio a la flexión de 42 kg/cm^2 siempre y cuando el peralte de la losa se diseñe de acuerdo con esta resistencia.

Tabla 2.6: Recomendaciones para módulos de ruptura.

Tipo de pavimento	Módulo de ruptura (MR) recomendado	
	kg/ cm ²	Psi
Autopista	48,0	682,7
Carreteras	48,0	682,7
Zonas industriales	45,0	6401
Urbanas principales	45,0	640,1
Urbanas secundarias	42,0	597,4

Fuente: “Pavimentos Rígidos” Universidad Nacional de Colombia

Según el Manual de diseño de pavimentos de concreto: para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito, recomienda los siguientes módulos de rotura, en función al T.P.D.

Tabla 2.7: Resistencia que debe alcanzar el concreto

Calidad del concreto	Número de camiones por día			
	> 300	150 - 300	25 - 150	< 25
A flexión (Mpa)	4,5	4,2	4,0	3,8

Fuente: Manual de diseño de pavimentos de concreto/ ICPC (Instituto Colombiano de Productores de Cemento)

2.1.8.3 Módulo de elasticidad del concreto (EC)

Está íntimamente relacionado con su módulo de ruptura y se determina mediante la norma ASTM C-469. Existen varios criterios con los que se puede estimar el módulo de elasticidad a partir del módulo de ruptura.

2.1.8.4 Durabilidad

En lugares donde el concreto está sujeto a condiciones severas de congelamiento y deshielos, deberá usarse concreto con aire incluido, y el proporcionamiento será tal que el agua de mezclado incluyendo el agua libre en los agregados, pero sin considerar el agua absorbida por estos, no debe exceder de 0,53 lts. por kg de cemento.

En ningún caso el agua de mezclado excederá de 0,58 lts. por kg de cemento en una revoltura el contenido de cemento no será menor de 280 kg- por metro cúbico de concreto.

2.1.9 Resistencia del concreto

La resistencia de un concreto, normalmente aumenta con la edad. Dicho aumento se produce muy rápidamente durante los primeros días posteriores a su colocación, resultando más gradual al transcurrir el tiempo, aún continuará incrementándose en una proporción más reducida durante un periodo de tiempo indefinido.

2.1.9.1 Resistencia a la compresión

Esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento. La resistencia a la compresión de un material que falla debido a la rotura de una fractura se puede definir, en límites bastante ajustados, como una propiedad independiente. Sin embargo, la resistencia a la compresión de los materiales que no se rompen en la compresión se define como la cantidad de esfuerzo necesario para deformar el material una cantidad arbitraria. La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga máxima por el área transversal original de una probeta en un ensayo de compresión.

Según el comité ACI, la resistencia promedio a la compresión del concreto a los 28 días no será menor de 280 kg/cm^2 ; esta resistencia se toma como base para el diseño de la junta y los tensores.

También se cuenta con otra referencia según la (MOP, 2002) sugiere, para estructuras como: obras de gran envergadura, puentes, elementos prefabricados, etc., utilizar un valor de resistencia a la compresión f'_c mayor a 280 kg/cm^2 .

Las anteriores referencias se tomaron como base para definir la resistencia de diseño del hormigón, de la presente investigación asumiendo un $f'_c = 300 \text{ kg/cm}^2$. Además la norma boliviana NB-011 que establece que la resistencia promedio que alcanza el cemento IP-30, es de 30 Mpa.

2.1.9.2 Ensayo para determinar la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de hormigón (ASTM C-39)

Esta norma establece el método para la determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón, utilizando estos resultados como base para el control de calidad de la dosificación del hormigón, operaciones de mezclado y colocación. A su vez en esta disertación esta prueba permite observar la acción de las fibras de acero en la mezcla ya que el espécimen ensayado no se rompe explosivamente como lo hace el

hormigón sin fibra; esto se debe a la disposición de las fibras en la mezcla que mantiene unido al hormigón cuando este falla.

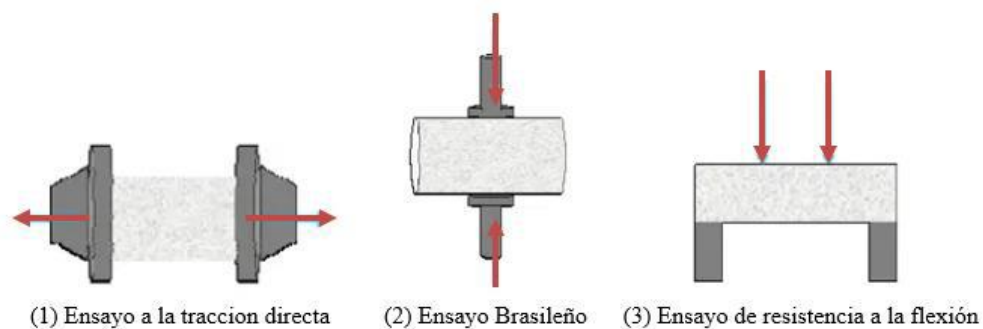
Este ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros de hormigón a una velocidad entre 3,53 a 5,30 KN/s hasta que ocurra la falla, la resistencia a compresión de la probeta y la carga máxima alcanzada se obtiene de la lectura del panel en la prensa hidráulica, la cual registra de forma automática esos datos en el instante en que se produce la falla.

2.1.9.3 Resistencia a la flexión del concreto (MR)

Según García (2012) el concreto es un material que presenta una resistencia a la tracción baja, representando entre el 10 % al 15% de la resistencia a la compresión (f'_c). Existen formas de obtener la resistencia a tracción del concreto, según como se aplican las cargas tenemos los ensayos a tracción directa, ensayos a tracción indirecta y los ensayos a flexión.

Según Saludes, Aguado, & Molins (2006) el ensayo a tracción uniaxial o tracción directa es considerado el modo más directo para determinar las propiedades de rotura de materiales frágiles, pero es un ensayo difícil de llevar a cabo, debido a que presenta inconvenientes como, la sujeción de la probeta y la dificultad de asegurar la estabilidad del ensayo. Por lo que se propusieron métodos alternativos, los ensayos indirectos, entre los cuales se tiene el ensayo brasileño, y los ensayos de resistencia a flexión (ver la Figura 2.19).

Figura 2.19: *Ensayos a tracción directa, indirecta y a flexión del concreto hidráulico*



Fuente: *García, (2012)*

National Ready Mixed Concrete Association (s.f.) define la resistencia a flexión como una medida de la resistencia a la tracción del concreto, definida como la medida de la

resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto; se expresa como el módulo de rotura (MR) en MPa o kg/cm². La resistencia a flexión se obtiene aplicando cargas a vigas de concreto con sección transversal cuadrada de 150 x 150 mm y con una longitud que mide tres veces su espesor como mínimo.

SENCICO (2010) indica que la mínima resistencia a la flexión o módulo de rotura del concreto para pavimentos urbanos rígidos de Perú es de 34 kg/cm² o 3,4 Mpa. Además, menciona que para la determinación del espesor de la losa se debe usar el módulo de rotura promedio a los 28 días.

El módulo de rotura en el diseño de pavimentos rígidos es un factor importante para determinar el espesor de la losa del pavimento rígido, y además permite controlar el agrietamiento del pavimento, originado por el exceso de cargas repetitivas de los vehículos o sobrecargas no previstas.

2.1.9.4 Ensayos para determinar la resistencia a la flexión del hormigón (ASTM C-78)

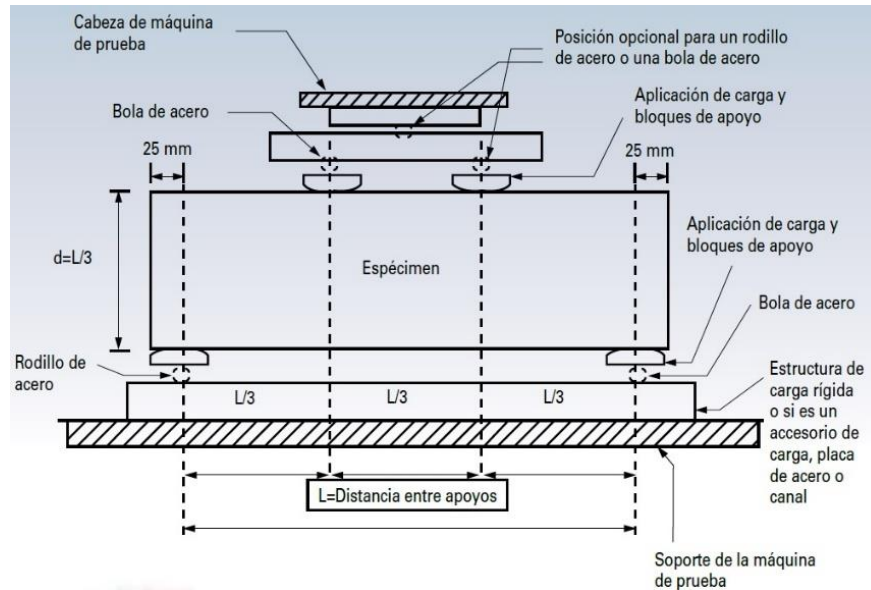
Los ensayos de resistencia a flexión, son los más usados para evaluar los concretos reforzados con fibras (FRC). Según Aire, Aguado & Molins (2013) en estos ensayos se emplean generalmente vigas y paneles de sección cuadrada o circular; los cuales permiten determinar la resistencia a la primera fisura, la resistencia a rotura por flexo-tracción y la resistencia residual a flexo-tracción. Además, los ensayos de resistencia a flexión son más sencillos y fiables que los ensayos de tracción directa (p.17).

a. Ensayo a flexión con carga a los tercios de la viga

El ensayo a flexión con cargas a los tercios de la viga está regido por la Norma ASTM C-78 y también por la Norma Técnica Peruana NTP 339.078, según INDECOPI (2012) “Este método de ensayo consiste en aplicar una carga en los tercios de la luz de la viga hasta que ocurra la falla. El módulo de rotura se calculará según la ubicación de la falla” (p.2).

El esquema del ensayo a flexión con carga en los tercios de la viga se puede apreciar en la Figura 2.20.

Figura 2.20: Esquema del ensayo a flexión con cargas a los tercios de la viga



Fuente: Aire, Aguado & Molins, (2013)

Para el cálculo del módulo de rotura, INDECOPI (2012) establece:

- Si la falla ocurre dentro del tercio medio de la luz, el módulo de rotura se calculará mediante la siguiente fórmula:

$$Mr = \frac{PL}{bh^2}$$

- Si la falla ocurre fuera del tercio medio y a una distancia de éste no mayor al 5% de la luz libre, el módulo de rotura se calculará mediante la siguiente fórmula:

$$Mr = \frac{3P_a}{bh^2}$$

- Si la falla ocurre fuera del tercio medio y a una distancia de éste mayor al 5 % de la luz libre, se rechaza el ensayo.

Donde:

Mr = Módulo de rotura, en MPa.

P = Carga máxima de rotura indicada por la máquina de ensayo, en N.

L = Luz libre entre apoyos, en mm.

A = Distancia promedio entre la línea de falla y el apoyo más cercano, medida a lo largo de la línea central de la superficie inferior de la viga, en mm.

B = Ancho promedio de la viga en la sección de falla, en mm.

H = Altura promedio de la viga en la sección de falla, en mm. (p.7-8).

b. Ensayo a flexión con carga central en la viga

El ensayo a flexión con carga central en la viga está regulado por la Norma ASTM C-293

Para el cálculo del módulo de rotura establece que será mediante la siguiente fórmula:

$$Mr = \frac{3PL}{2bh^2}$$

Donde:

Mr = Módulo de rotura, en MPa o kg/cm²

P = Carga máxima aplicada, en N o kg-f

L = Longitud entre apoyos, mm o cm

b = Ancho promedio de la viga en la sección de falla, en mm o cm

h = Altura promedio de la viga en la sección de falla, en mm o cm

Según National Ready Mixed Concrete Association (s.f.) el módulo de rotura calculado por el ensayo de la viga cargada en el punto medio es ligeramente mayor, aproximadamente en 15%, que el determinado por el ensayo de la viga cargada en los puntos tercios. El ensayo de viga con carga central es forzado a que suceda la falla cerca del punto de carga mientras que en el ensayo de viga con carga en los puntos tercios es libre de aparecer en cualquier parte del tercio central de la muestra.

Asimismo, menciona algunas desventajas de ambos ensayos, tales como que las vigas son muy pesadas y pueden ser dañadas en su manipulación y transporte. Además, las vigas deben ser curadas según la normativa y ensayadas mientras se encuentren húmedas, ya que si la viga se seca dará como resultado menores resistencias. Hay gran dificultad en el cumplimiento de estos requisitos en el lugar de trabajo por lo que es común obtener resultados del módulo de rotura generalmente bajo y no confiable.

c. Cálculo de la resistencia a flexión mediante correlaciones

Además de los métodos de ensayos a flexión mencionados para obtener el módulo de rotura del concreto, otra forma de calcular el módulo de rotura es a través de correlaciones con los resultados de los ensayos de tracción indirecta y también correlaciones con la resistencia a compresión, según National Ready Mixed Concrete Association (s.f.) “El módulo de rotura es cerca del 10% al 20% de la resistencia a compresión, dependiendo del tipo, dimensiones y volumen del agregado grueso utilizados”.

Asimismo, la Tabla N° 2.8 muestra fórmulas de correlación, según varios autores, que permiten calcular el módulo de rotura (MR) a partir de la resistencia a compresión ($f'c$) de las muestras ensayadas.

Tabla 2.8: Fórmulas de correlación entre el módulo de rotura y la resistencia a compresión

Fuente	Relación del Mr y $f'c$
ACI (ACI - 318)	$Mr = 0,62\sqrt{f'c}$
IS: 456 - 2000	$Mr = 0,7\sqrt{f'c}$
EC - 02	$Mr = 0,201 f'c$
Javier Llorach Vargas	$Mr = (10\% - 20\%) f'c$
PCA	$Mr = (12\% - 17\%) f'c$
Empresas Duravía	$Mr = (10\% - 15\%) f'c$

Fuente: Ramos, (2019)

2.1.10 Proceso de elaboración de vigas y probetas de hormigón para pavimento rígido

La elaboración de vigas y probetas con y sin adición de fibra de acero seguirán un mismo procedimiento descrito en la norma ASTM C-31 y la ASTM C-192. Cuyo proceso se implica.

2.1.10.1 Dosificación del hormigón

Consiste en el diseño de la mezcla estableciendo las cantidades de cada uno de los materiales que conformaran el hormigón, elaborada en base a las características de granulometría, propiedades físico químicas de los agregados y tipo de cemento, con el propósito de obtener propiedades adecuadas en el hormigón.

Se puede elaborar una dosificación al peso o al volumen.

2.1.10.2 Dosificación método ACI

La dosificación de mezclas de hormigón es la determinación de la combinación más económica y practica de agregados disponibles, cemento, agua y en su caso aditivo que producirá una mezcla trabajable con un endurecimiento adecuado.

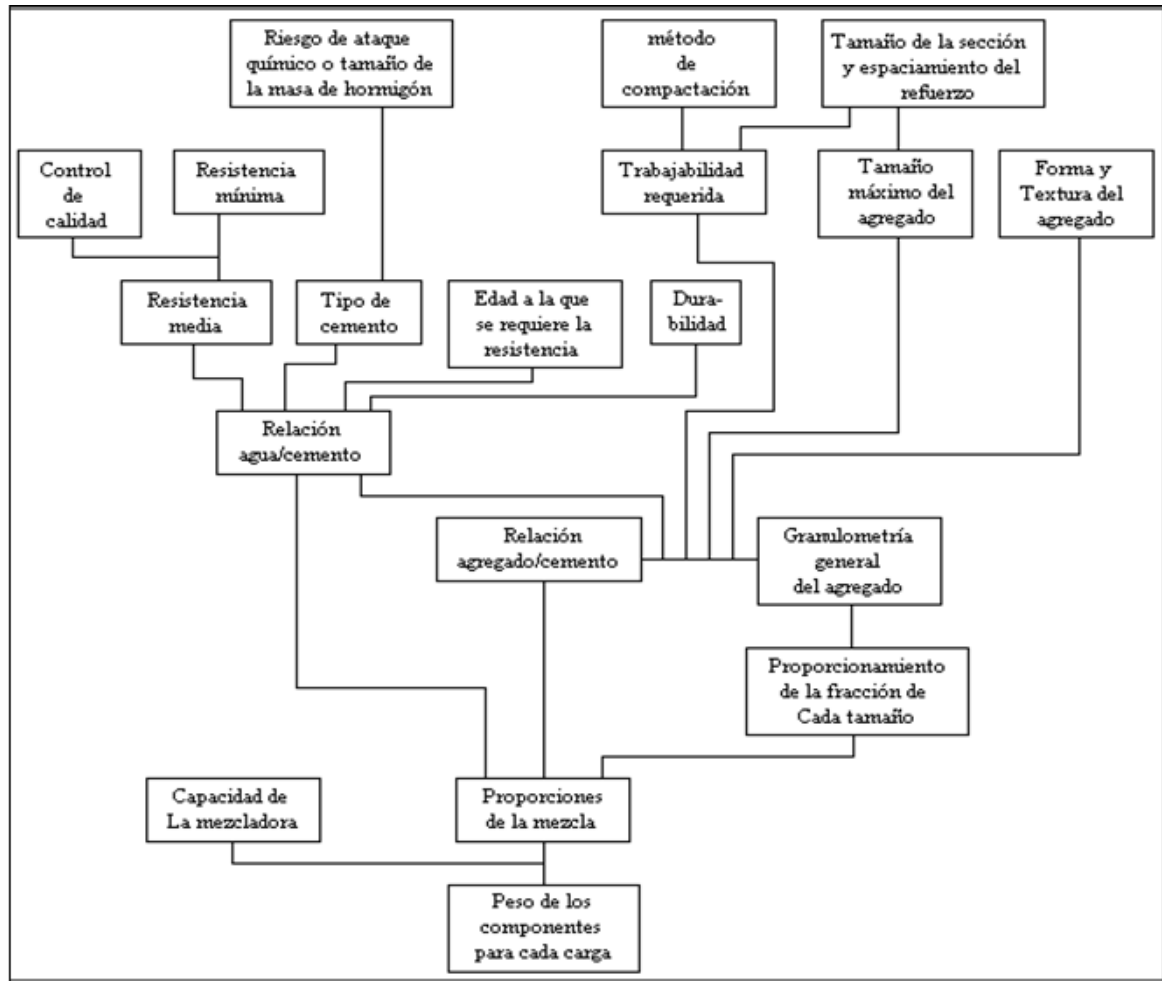
La dosificación de la mezcla de prueba puede complementarse efectivamente con ensayos de laboratorio de los materiales relacionados con el hormigón.

A continuación se explica la metodología de dosificación para hormigones, presentada por el comité ACI-211, donde se debe seguir el flujo grama de dosificación indicando en la Figura 2.21; así mismo, se debe tomar en cuenta que un diseño, en el sentido estricto de la palabra no es posible, debido a que los materiales son esencialmente variables y muchas de sus propiedades no pueden ser evaluadas con exactitud en forma cuantitativa. Por tal motivo, es necesario hacer mezclas de prueba para revisar y ajustar las proporciones de los materiales.

Para la dosificación del hormigón con este método se debe seguir los siguientes pasos:

- Selección del asentamiento.
- Selección del tamaño máximo del agregado.
- Estimación del contenido de agua de mezclado.
- Determinación de la resistencia de diseño.
- Selección de la relación agua-cemento.
- Cálculo del contenido de cemento.
- Estimación de las proporciones de los agregados.

Figura 2.21: Factores básicos de diseño de una mezcla de hormigón



Fuente: Dosificación método ACI

2.1.10.3 Mezcla

La incorporación y mezcla se ejecuta cuidadosamente para obtener homogeneidad.

Este puede ser manual o mecánico.

2.1.10.4 Prueba del cono de Abrams

La consistencia es una propiedad verificada con esta prueba, que consiste en llenar un molde metálico con tres capas de mezcla apisonadas con 25 golpes de varilla, una vez retirado el molde se mide el asentamiento que se da en la masa de hormigón con respecto a la altura inicial dada por el molde.

2.1.10.5 Llenado de moldes

Este proceso se ejecuta conforme a la norma mencionada anteriormente, básicamente consiste en el llenado de vigas rectangulares de 6”*6”*15” de madera o metálicos y cilindros normalizados (Probetas) con tres capas compactándolas cada una con 25 golpes de espiral con la varilla compactadora, para sacar el exceso de aire se emplea un martillo de goma con el que se dan golpes laterales.

2.1.10.6 Fraguado

Reacción química producida entre el cemento y el agua que provoca el endurecimiento del hormigón, motivo por el cual las vigas y probetas deben almacenarse en un lugar aislado del sol para evitar evaporación prematura del agua de amasado, esto durante 24 horas.

Entre los factores que intervienen en la duración del fraguado esta la finura del cemento, mientras más fino el proceso es más rápido, lo mismo sucede al emplear menos agua, en cuanto a los agregados estos deben estar libres de materia orgánica ya que eso retrasaría el fraguado, las elevadas temperaturas minimizan este tiempo.

2.1.10.7 Curado

Transcurridas 24 horas las probetas son desmoldadas e introducidas en una cámara de curado que mantiene la humedad del hormigón, consiguiendo que la reacción química del cemento continúe. La continuidad en el proceso de hidratación del cemento mejora la durabilidad, resistencia mecánica, estabilidad volumétrica, resistencia al desgaste e impermeabilidad.

La temperatura adecuada para el curado oscila entre los 22 a 24 °C, y el agua a usarse para este procedimiento debe ser potable, como un tiempo ideal el hormigón tiene que estar 26 días dentro del agua y un día fuera de la misma para la ruptura del hormigón a los 28 días.

2.1.10.8 Ensayo a flexión

El ensayo a flexión mide la resistencia de un material a cargas flexionantes. Se aplica una carga en el centro de una muestra, generando una curvatura. La resistencia a la flexión se define como la máxima carga que una muestra puede soportar antes de romperse, y se mide en unidades de fuerza por unidad de área. ASTM C-78.

2.1.10.9 Ensayo de compresión

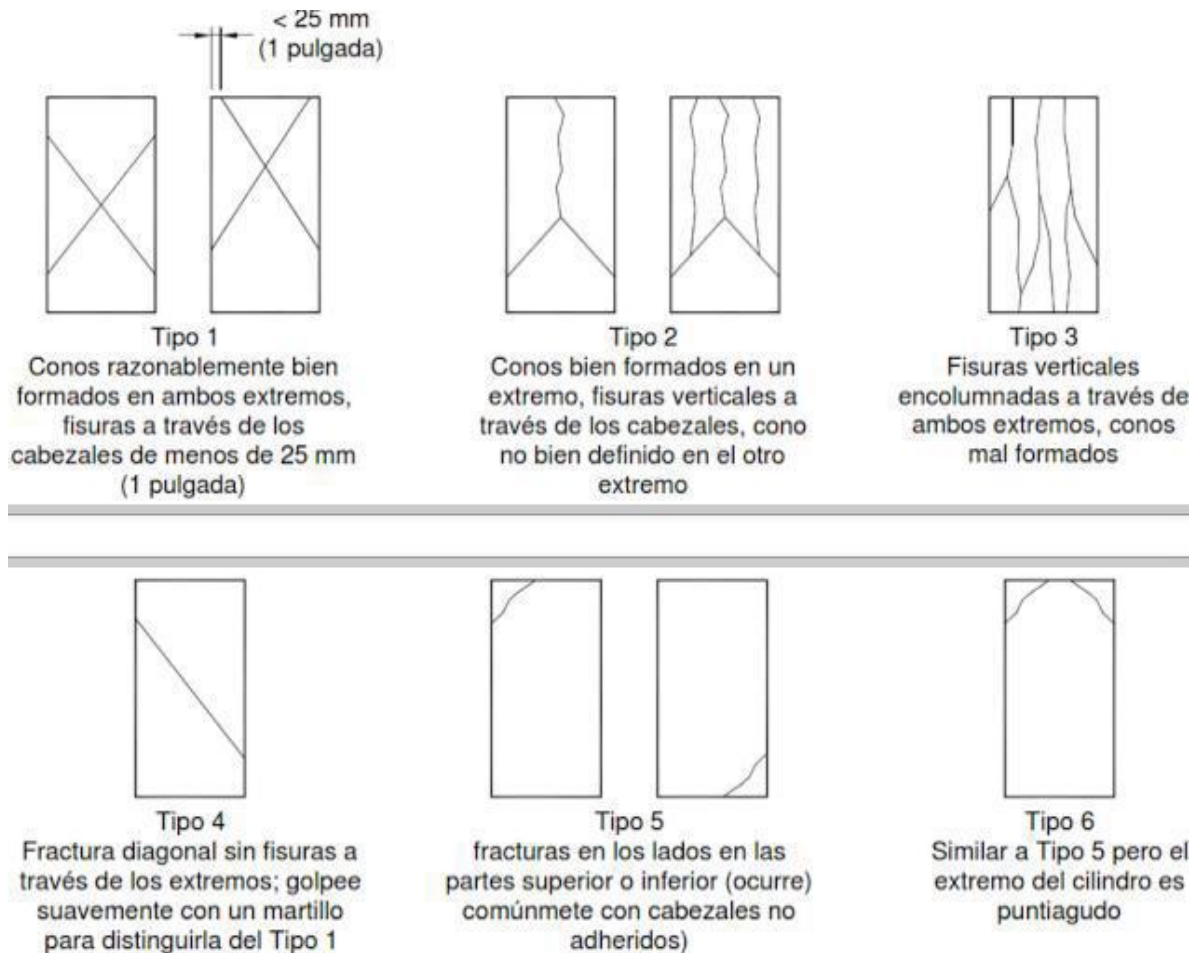
Consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros de hormigón a una velocidad entre 3,53 a 5,30 KN/s hasta que ocurra la falla, la resistencia a compresión de la probeta se obtiene dividiendo la carga máxima alcanzada para el área de la sección transversal de la muestra ensayada. ASTM C-39.

2.1.10.9.1 Tipos de falla en cilindros de hormigón ensayados a compresión

Las probetas cilíndricas de hormigón presentan ligeras fisuras de adherencia producto de la retracción del fraguado, una vez que se aplica la carga de compresión estas fisuras aumentan en número y longitud de manera lineal, al alcanzar el 90 % del esfuerzo de rotura las fisuras incrementan exponencialmente hasta convertirse en rajaduras que provocan la rotura del hormigón.

La norma ASTM C-39 indica que el cilindro de hormigón debe ser sometido a compresión hasta que se haya alcanzado la capacidad máxima y se observe que la carga disminuye constantemente, a la vez en la probeta se identifique un patrón de falla específico.

Figura 2.22: Tipos de fallas de hormigón a compresión



Fuente: Fallas en probetas de hormigón a compresión. ASTM C 39

2.1.11 Concreto reforzado con fibras (crf)

Según Vidaud, Frómeta, & Vidaud (2015) a diferencia del concreto simple, el concreto reforzado con fibras soporta no solo los esfuerzos a compresión, también los esfuerzos a tensión, flexión y cortante. Las fibras se distribuyen homogéneamente dentro de la mezcla de concreto, formando una micro-armadura que permite controlar y reducir la formación de fisuras. Además, proporcionan un refuerzo mucho más isótropo, es decir que las fibras actúan en todas las direcciones (refuerzo tridimensional), a diferencia del concreto con refuerzo convencional, donde la armadura de acero colabora solo en una o dos direcciones. Finalmente, las fibras confieren al concreto una ductilidad, la cual incrementa con una

mayor resistencia y cantidad de fibras; y por consiguiente incrementa también la tenacidad en el concreto (p.34).

Según ACI Committee 544 (2002) “El concreto reforzado con fibra (FRC) está hecho principalmente de cemento hidráulico, agregados y fibras de refuerzo discontinuas. Las fibras adecuadas para el concreto armado se han producido a partir de acero, vidrio y polímeros orgánicos (fibras sintéticas)” (p.1).

2.1.11.1 Tipos de fibras

Según Sika Perú (2011) las fibras usadas en el concreto se clasifican en general según el tipo de material y la funcionalidad de la fibra:

a. Por material:

- Fibras metálicas

Son secciones discretas metálicas elaboradas a base de acero, mayormente tienen con un bajo contenido de carbono; las cuales tienen una esbeltez, relación entre la longitud y el diámetro, desde 20 hasta 100.

- Fibras sintéticas:

Las fibras sintéticas son fabricadas por el hombre, se elaboran en base a acrílico, aramida, carbón, nylon, polipropileno, poliéster y polietileno.

- Fibras de vidrio

Las fibras de vidrio son secciones discretas, resistentes a los álcalis del cemento portland.

- Fibras naturales

- Las fibras naturales son secciones discretas hechas a base de yute, coco, caña de azúcar, madera, yute, bambú, entre otros; sus diámetros se encuentran entre 0.5 y 0.2 mm.

b. Por funcionalidad:

- Microfibras

Las microfibras controlan el fenómeno de fisuración del concreto en estado fresco, las cuales tienen dosificaciones que varían entre 0,03% a 0,15% del volumen de concreto. En este grupo, destaca el uso de las fibras de polipropileno con una dosificación en peso que

varía entre 0,3 a 1,2 kg/m³ de concreto, tienen diámetros entre 0,023 mm a 0,050 mm y pueden ser de acuerdo a su tipo de fabricación, monofilamentos o fibriladas.

- **Macrofibras**

Las macrofibras controlan la fisuración en estado endurecido y de generarse la fisura se encargan de reducir su ancho, logrando un mejor comportamiento de la estructura fisurada. Las dosificaciones varían entre 0,2% a 0,8% del volumen de concreto. En este grupo, las macrofibras más usadas son las fibras sintéticas y metálicas, con diámetros que varían entre 0,05mm a 2,00 mm y una esbeltez (L/d) que varía entre 20 a 100. Específicamente las fibras de acero requieren dosificaciones en peso entre 20 y 50 kg/m³ y las fibras sintéticas (polipropileno) entre 2 a 9 kg/m³ (p.7-11).

En la Tabla 2.9 se observa un resumen de las diferencias entre el grupo de macrofibras y microfibras:

Tabla 2.9: Características de macrofibras y microfibras

Tipo	Material	Dosificación	Diámetro	Función
Macro fibra	Fibras metálicas, sintéticas, o naturales (coco, madera, caña de azúcar, yute, bambú, etc.).	Entre 0,2% a 0,8% del volumen del concreto	Entre 0,05 mm y 2,00 mm. Relación de aspecto (Longitud / Diámetro) de entre 20 y 100.	* Evitar la fisuración del concreto en estado endurecido. * Reducir la abertura de la fisura. * Garantizar el adecuado desempeño del elemento fisurado.
Micro fibra	Las más frecuentes son las fibras de polipropileno; aunque también las hay de aramida, acrílicas, nylon, carbón.	Entre 0,03% 0,15% del volumen del concreto	Entre 0,023 mm y 0,05 mm, pueden ser monofilamento o fibriladas. Las macrofibras al tener diámetros tan pequeños se califican con el parámetro de Denier (*).	* Evitar la fisuración del concreto en estado fresco (ej. Contracción plástica)

Fuente: Vidaud, Frómata, & Vidaud, (2015)

2.1.11.1.1 Fibras de acero

ACI Committee 544 (2002) define las fibras de acero como fibras de longitudes cortas que tienen una esbeltez (longitud/diámetro) entre 20 a 100 y son de secciones transversales variadas; estas fibras se distribuyen aleatoriamente en la mezcla de concreto utilizando los procedimientos convencionales de mezcla (p.8).

Sotil & Zegarra (2015) afirman que las fibras de acero son un refuerzo primario del concreto, ya que tienen un elevado módulo de elasticidad y a diferencia de otras fibras no solo se limitan al control de fenómeno de fisuración. Su diámetro varía entre 0,25 y 0,80 mm y su longitud entre 10 y 75 mm (p.49).

Según Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi (2004) la norma ASTM A820, la especificación estándar para fibras de acero para concreto reforzado con fibras, clasifica las fibras de acero de acuerdo a su proceso de fabricación en:

- Tipo I: Alambres trefilados en frío, son aquellas fibras de alambre conformadas a frío, y además son las más fáciles de encontrar en el mercado.
- Tipo II: Hojas cortadas, las fibras de acero se cortan de las chapas de acero.
- Tipo III: Extraídas de la fundición, estas fibras resultantes tienen una sección transversal con forma de medialuna.
- Tipo IV: Otras fibras.

2.1.11.2 Parámetros básicos de las fibras

La función de refuerzo de las fibras y su eficacia para transmitir las tensiones generadas dependen de varios factores, especialmente de las características físicas y mecánicas de las fibras.

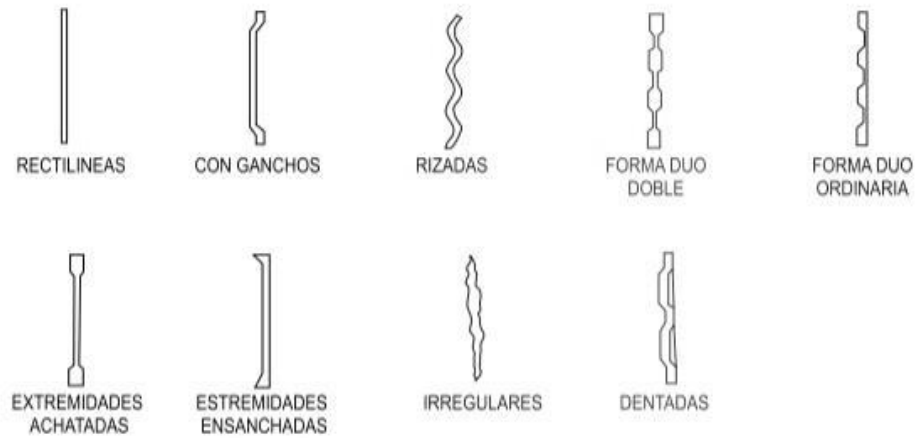
- Forma de la fibra

Según Cañette, Eguren, & García (2017) este parámetro abarca la forma de la fibra en dirección longitudinal, la forma de la sección transversal, el recubrimiento superficial o revestimiento y la presentación de las fibras.

La geometría de la fibra en dirección longitudinal influye principalmente en las condiciones de anclaje o características adherentes de la fibra. Las formas son muy

variadas, habiendo fibras rectas, onduladas, corrugadas, con ganchos, como se observa en la Figura 2.23. (p.37).

Figura 2.23: Formas en dirección longitudinal de fibras de acero

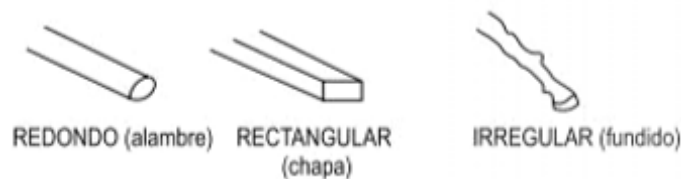


Fuente: Maccaferri, (2017)

De acuerdo a lo expuesto por el autor, una fibra de acero de forma recta sería menos adherente que una fibra de acero con ganchos en sus extremos. Por lo que es habitual encontrar fibras de acero que difieren en sus extremos con la finalidad de mejorar su anclaje.

Según Cañette, Eguren, & García (2017) las diferentes formas de la sección transversal de la fibra surgen por el proceso de fabricación de la fibra. Respecto a las fibras de acero, se presentan las secciones circulares (obtenidas mediante trefilado – tipo I), secciones rectangulares (obtenidas mayormente de fibras cortadas en láminas – tipo II) y secciones de formas irregulares (normalmente producto de la fundición del acero – tipo III), ver la Figura 2.24. (p.37).

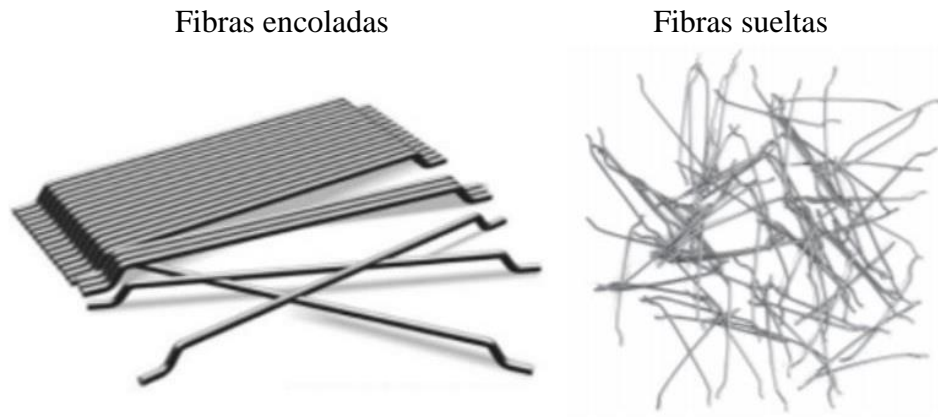
Figura 2.24: Formas de la sección transversal de fibras de acero



Fuente: Maccaferri, (2017)

Respecto a la presentación de las fibras, las fibras pueden incorporarse a las concretas sueltas o encoladas (ver la Figura 2.25). A diferencia de las fibras sueltas, las fibras encoladas al incorporarse al concreto reducen el riesgo de formación de erizos, entendiéndose como la aglomeración de fibras (ver la Figura 2.26), además se incorporan fácilmente y de manera homogénea en la mezcla de concreto.

Figura 2.25: Fibras encoladas y sueltas de acero



Fuente: Maccaferri, (2017)

Figura 2.26: Formación de "erizos" o aglomeración de fibras



Fuente: Badell, (2016)

Finalmente respecto al recubrimiento superficial de las fibras de acero, MACCAFERRI (2017) menciona que las fibras pueden tener un revestimiento superficial de zinc

(galvanizadas) para una mejor resistencia a la corrosión y garantizar la durabilidad de la fibra, en caso se aplique en ambientes de condiciones agresivas. (p.20).

- Longitud de la fibra (L_f)

Según Caballero (2017) para mejorar la eficacia de las fibras, es importante la relación que hay entre el tamaño máximo del agregado grueso (TMA) y la longitud de la fibra. Según estudios, los resultados óptimos se consiguen cuando la longitud de la fibra es aproximadamente igual al doble del tamaño máximo del agregado. Además, es recomendable que el tamaño máximo del agregado grueso empleado no sea superior a 20 mm (p.19).

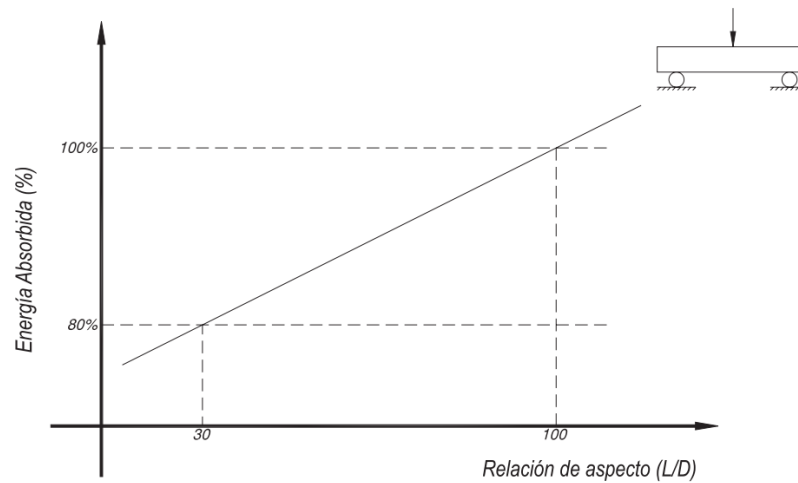
Cañette, Eguren, & García (2017) mencionan que si las fibras son muy largas, habrán dificultades de manipulación y aparición de poros en la mezcla de concreto, por otro lado si las fibras son muy cortas no se generará un buen anclaje entre la fibra y el concreto, el cual es una factor importante para transmitir los esfuerzos (p.36).

- Esbeltez o ratio de la fibra (λ)

La esbeltez es la relación entre la longitud de la fibra y el diámetro equivalente de la fibra (L_f/d_f). Este parámetro tiene influencia en el comportamiento del concreto en estado fresco y endurecido, se considera que a mayor esbeltez de las fibras son más eficientes en el control de fisuración; sin embargo, se debe limitar el largo de las fibras para evitar la acumulación de fibras o erizos durante el mezclado del concreto (p.37).

En la Figura 2.27 se puede observar que la esbeltez influye en la tenacidad del concreto reforzado con fibras; el porcentaje de energía absorbida (tenacidad) aumenta cuando la esbeltez (L/D) de la fibra es mayor.

Figura 2.27: Gráfica de energía absorbida vs esbeltez de la fibra (L/D)



Fuente: Maccaferri, (2017)

- Módulo de elasticidad o módulo de Young de la fibra

Badell (2016) menciona que el módulo de elasticidad influye en la capacidad de refuerzo de la fibra en el concreto y es el parámetro encargado del control de formación de fisuras y grietas; por lo que solo cuando el módulo de elasticidad de la fibra es al menos 3 veces mayor que el módulo de elasticidad del concreto, se obtiene un mejor control de la longitud y apertura de fisuras.

Tabla 2.10: Características mecánicas de las fibras

Tipo de fibra	Resistencia a tracción (Mpa)	Módulo de elasticidad (Gpa)	Densidad (kg/m ³)	Alargamiento de rotura (°/o)
Acero	500 - 3000	210	7800	3,5
Acero inoxidable	2100	160	7860	3,0
Vidrio	2000	60	2700	3,6
Carbono	3000	200 - 500	1900	0,5
Nylon	900	4	1100	13 - 15
Polipropileno	400 - 800	5 - 25	900	8 - 20
Poliéster	700 - 900	9,2	1400	11 - 13
Concreto	5 - 8	30	2300	-

Fuente: Blanco, (2008)

Según la Tabla 2.10 podemos observar que las fibras de polipropileno tienen un módulo de elasticidad muy similar al concreto; y por el contrario las fibras de acero poseen un módulo de elasticidad 7 veces mayor al del concreto. Por lo que se concluye, que al incorporar fibras de acero se tiene un mejor control del fenómeno de fisuración comparado con las fibras de polipropileno.

- Resistencia a tracción de la fibra ($\sigma_{máx}$)

Cañette, Eguren, & García (2017) define la resistencia a la tracción como la carga máxima a tensión que puede soportar la fibra; la cual se calcula dividiendo la carga máxima entre el área de la sección transversal media de la fibra (p.39).

Blanco (2008) menciona que la resistencia a tracción de las fibras depende de la calidad del acero, la resistencia a tracción de la fibra varía entre 400 y 1500 MPa con un bajo o medio contenido de carbono en su composición química, y hasta 2000 MPa aumentando el contenido de carbono, siendo este tipo de fibras adecuadas especialmente para concretos de alta resistencia (p.9). Según se observa en la Tabla 2.10, la resistencia a tracción de las fibras de acero varía entre 500 - 3000 MPa, mientras que de las fibras de polipropileno varía entre 400 - 800 MPa.

- Dosificación de la fibra

Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi (2004) menciona que los volúmenes de fibras de acero que se usan generalmente en el concreto varían entre el 0,25% al 2%. Sin embargo, cuando se usan volúmenes mayores al 2% de fibra de acero se disminuye la trabajabilidad de la mezcla de concreto y también la dispersión de las fibras, es decir hay menos distancia entre fibras, por lo que en este caso se requerirá de un diseño especial de las mezclas o alguna técnica especial de colado (p.154).

- Adherencia fibra-matriz

Caballero (2017) afirma que esta propiedad es fundamental para las fibras incorporadas en la mezcla del concreto, ya que cuando se produce la fisuración; las fibras forman una red que retrasa la rotura, incrementando la ductilidad del concreto. La forma de la fibra puede aumentar la adherencia física con el concreto, para que se produzca una falla en el concreto por rotura de la fibra y no por deslizamiento de la misma, como sucede generalmente en las fibras sin anclajes (fibras rectas) (p.22).

2.1.11.3 Propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibra

Las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras son influenciadas por estos factores, tales como: la geometría de la fibra, la esbeltez de la fibra, la orientación de la fibra, la distribución de la fibra dentro de la mezcla, la resistencia del concreto, dimensión máxima de los agregados u la adherencia fibra-concreto.

Las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras son:

a. Resistencia a la compresión

Caballero (2017) afirma que la resistencia a compresión del concreto no varía significativamente con la incorporación de fibras de acero, se puede obtener un incremento de resistencia a la compresión entre 0% a 15% con una dosificación en volumen no menor al 1,5% de fibras de acero en la mezcla del concreto.

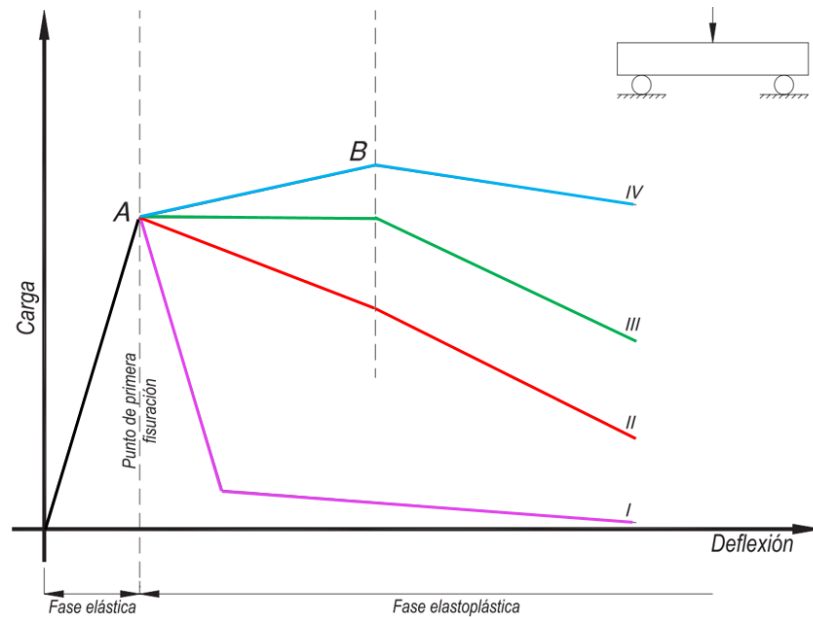
Asimismo, respecto a las fibras de polipropileno, Armas (2016) afirma que su incorporación al concreto incrementa ligeramente la resistencia a compresión en un 3% cuando se aplica una dosificación de 400 gr/m³. Además, indica que se demostró que estadísticamente este aporte no es significativo.

b. Resistencia a la flexión

Según MACCAFERRI (2017) los ensayos de flexión de elementos de concreto reforzado con fibras pueden tener diversas respuestas, las cuales son representadas generalmente por el gráfico Carga vs. Deflexión o también por el grafico Carga vs. Abertura de fisura.

El comportamiento del concreto es siempre elástico bajo cargas moderadas y no se produce ninguna fisuración en la probeta bajo el ensayo de flexión; sin embargo, cuando se incrementa la carga a partir del primer punto de fisuración (punto A), el comportamiento del concreto es totalmente diferente, el cual depende de la cantidad de fibras incorporadas a la mezcla, su geometría y sus propiedades mecánicas. A continuación, se describe el comportamiento de las siguientes curvas de la Figura 2.28.

Figura 2.28: Respuesta de ensayo a flexión mediante gráfica carga vs deflexión



Fuente: Maccaferri, (2017)

- Curva I: la curva morada representa el comportamiento de un concreto simple sin reforzar, el cual se caracteriza por ser un material frágil que colapsa inmediatamente alcanzada la carga de la primera fisuración (punto A).
- Curva II: la curva roja muestra que el concreto reforzado con fibras post-fisuración mejora su capacidad para absorber cierta carga, por lo que tiene un colapso más lento.
- Curva III: la curva verde muestra el comportamiento de un material dúctil, donde el concreto reforzado con fibra post-fisuración es capaz de soportar desplazamientos bajo una carga constante, es decir tiene un comportamiento plástico.
- Curva IV: la curva azul muestra que el concreto reforzado con fibras puede absorber cargas un poco mayores con un amplio desplazamiento (A-B) (p.10).

c. Ductilidad

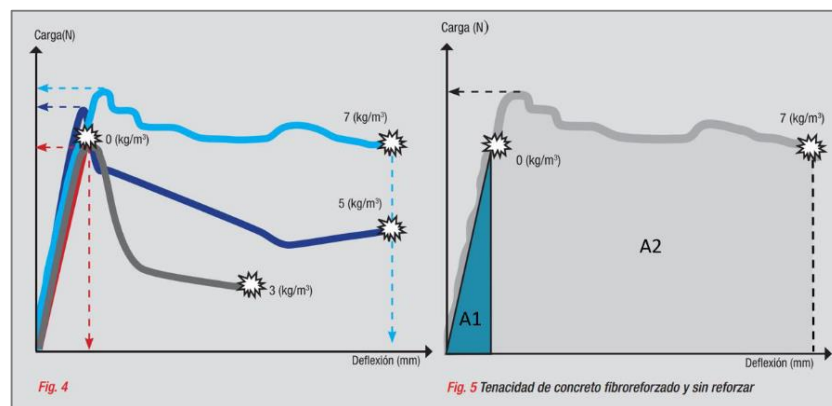
Badell (2016) define la ductilidad como el grado de deformación plástica que puede soportar un material, bajo la acción de una fuerza, hasta la rotura. La ductilidad es la propiedad opuesta a la fragilidad, que es cuando el material no acepta ninguna deformación plástica. Al incorporar las fibras, el concreto se transforma en un material

dúctil, esto se debe a que las fibras actúan como un puente de transferencia de esfuerzos de tensión a través de las fisuras generadas en el concreto.

d. Tenacidad

Para Caballero (2017) la tenacidad es el producto o el área bajo la curva carga – deflexión, que representa la capacidad de absorber energía antes de alcanzar la rotura cuando el elemento estructural está sometido a carga, por lo que a mayor tenacidad se tiene una mayor capacidad de disipar energía. Esta propiedad depende principalmente de la adherencia de las fibras en el concreto y también del contenido, tipo y esbeltez de las fibras (p.22).

Figura 2.29: Tenacidad del concreto fibroreforzado y sin reforzar



Fuente: Sika Perú, (2011)

En la Figura 2.29, se observa que el concreto con mayor tenacidad es el que contiene una dosificación de 7 kg/m^3 de fibras, ya que encierra la mayor área bajo la curva, además tiene una tenacidad mucho mayor que el concreto sin fibras (triángulo azul). Concluyendo que al incorporar fibras al concreto se incrementa significativamente su tenacidad; ello permite que el concreto después del primer punto de fisuración pueda seguir soportando cargas bajo deformaciones mucho mayores, antes de colapsar, permitiendo que la estructura se mantenga en funcionamiento.

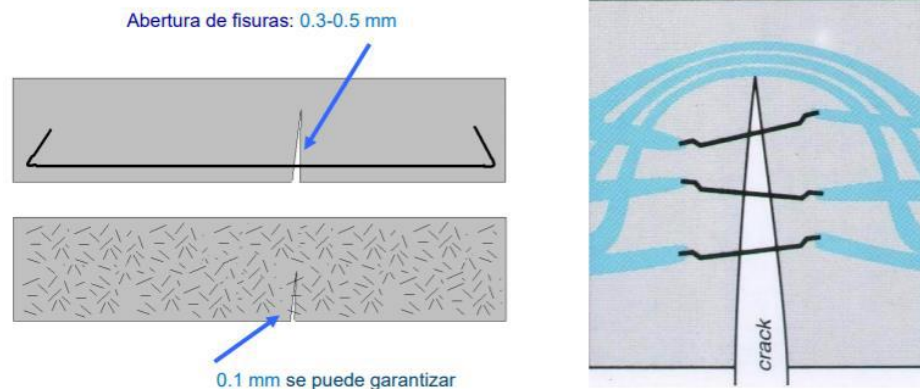
e. Resistencia a cargas dinámicas (impacto)

Según Jovells (2016) el concreto reforzado con fibras aumenta la resistencia a cargas dinámicas de 3 a 10 veces en comparación a la del concreto convencional. La adición de fibras hace que la matriz del concreto tenga una tendencia mucho menor a la desfragmentación y el arrancamiento. Asimismo, se produce un incremento significativo de la capacidad de absorción de energía por impacto, esta propiedad depende directamente de la geometría y cantidad de las fibras (p.19).

2.1.11.4 Ventajas y desventajas del uso de fibras

Según la literatura revisada, las fibras de acero son más eficientes que otro tipo de fibra, debido a que presentan una alta resistencia a la tracción, un alto módulo de Young y una gran facilidad de adherencia entre la fibra y el concreto. Las fibras de acero presentan una capacidad de resistencia post-fisuración, transformando el concreto en un material dúctil. Las fibras crean puentes de transferencia de los esfuerzos de tensión a través de las fisuras, previniendo que la apertura de la fisura sea mayor (ver la Figura 2.30). Esta característica es muy útil para elementos de superficie continua, como pisos y pavimentos rígidos.

Figura 2.30: Mecanismo de control de propagación de las fisuras



Fuente: Badell, (2016)

La Figura 2.31, es una fotografía de un ensayo de rotura de una probeta de concreto reforzado con fibras de acero mediante el ensayo a tracción uniaxial, realizado en la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), donde se puede observar que las fibras actúan formando puntos de sutura dentro del concreto, impidiendo la propagación de las fisuras y retardando el colapso.

Figura 2.31: Rotura de probeta de concreto reforzado con fibras de acero



Fuente: Saludes, Aguado, & Molins, (2006)

Por otro lado, la incorporación de fibras a la mezcla de concreto, en ocasiones reduce la trabajabilidad de la mezcla, por lo que en ese caso será necesario el uso de un aditivo plastificante, para mejorar la consistencia del concreto que permita redistribuir las fibras en la mezcla.

Según la literatura revisada, otras ventajas de los concretos reforzados con fibras de acero son:

- Menor dificultad en comparación con la colocación un refuerzo convencional con malla de acero, reduciendo los costos de mano de obra calificada, eliminando los riesgos de una mala colocación del acero y reduciendo tiempos de construcción.
- Las fibras de acero aseguran un refuerzo homogéneo, más eficaz y tridimensional, en comparación con el refuerzo convencional.
- Se puede realizar el vertido del concreto reforzado con fibras de acero directamente desde el camión o mixer, y de ser necesario también puede ser bombeado.
- Las fibras de acero son fácilmente adicionadas al concreto, tanto en planta como a pie de obra.

Respecto a las ventajas de las fibras de polipropileno en el concreto; varios autores mencionan la reducción de la formación de fisuras en el pavimento, el incremento de la resistencia a compresión y flexión del concreto y la mejora de la calidad y durabilidad del concreto y por tanto del pavimento.

Además Mármol (2010) afirma que fibras de acero, son inertes con una superficie hidrófoba, por lo que no habrá problemas relacionados con la absorción de agua.

Asimismo Valero (2015) señala como ventaja la baja densidad de las fibras de polipropileno lo que permite que esta quede embebida en el concreto durante el vibrado, de manera que no aflora a la superficie en contacto con el molde, y así la estética del elemento estructural permanece inalterada.

2.1.11.5 Aplicaciones de las fibras

Las fibras tienen aplicación en estructuras que requieren resistir los esfuerzos de tracción, tales como, losas de pavimentos rígidos, pisos industriales, pistas de aterrizaje, overlays, elementos prefabricados, concreto proyectado para obras de minería, túneles y proyectos hidráulicos, entre otros; varios estudios demuestran que las fibras mejoran la resistencia a la flexión del concreto, las cuales también se utilizan para reducir el espesor de la losa de concreto.

Respecto al concreto empleado en pavimentos, Blanco (2008) señala que requiere características particulares para dar respuesta a las exigencias estructurales, tales como:

- Resistencia a flexo-tracción: La losa de concreto de un pavimento es un elemento estructural que requiere de una elevada resistencia a flexo-tracción, ya que absorbe gran parte de los esfuerzos generados por las cargas vehiculares.
- Resistencia a fatiga: Es necesaria debido a la acción de cargas vehiculares repetitivas.
- Trabajabilidad: El concreto debe ser fácilmente trabajable con los equipos de construcción, además tener una gran cohesión.
- Mínima retracción: La retracción es un problema común en los pavimentos, cuando la superficie predomina sobre el espesor, genera la formación de fisuras no deseables. Además, en pavimentos de carreteras es necesario tener resistencias iniciales altas ya que se forman generalmente fisuras considerables.

2.1.11.6 Normas referentes al concreto reforzado con fibras

- ASTM C-1116 (2015): Estándar especificación de Concreto Reforzado con fibras y Concreto proyectado.

Esta norma informa al comprador sobre todos los tipos de concreto reforzado con fibra con los ingredientes uniformemente mezclados, las cuales pueden ser muestras y pruebas en los puntos de entrega.

- ASTM -820: Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete.
Esta norma abarca los requisitos mínimos de las fibras de acero destinadas para su uso en concreto reforzado con fibras.
- ACI Committee - Report 544.1R (2002): State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete.
Incluye los principios fundamentales de los FRC, una descripción de los tipos de fibra, métodos de dosificación y mezcla, propiedades físicas, consideraciones de diseño y aplicaciones.
- ACI Committee - Report 544.2R (1989): Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete
Este informe trata sobre los procedimientos para la preparación de muestras y analiza las pruebas de trabajabilidad, resistencia a la flexión y absorción de energía del concreto reforzado con fibra o el concreto proyectado reforzado con fibra de material de acero, vidrio, poliméricas y naturales.
- ACI Committee – Report 544.3R (2008): Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete
Esta guía cubre la especificación, dosificación, mezcla, colocación y acabado del concreto reforzado con fibras (FRC).

ACI Committee - Report 544.4R (2018): Guide to Design with Fiber - Reinforced Concrete

El fin de esta guía es proporcionar a los ingenieros pautas de diseño y recomendaciones para el uso de fibra como refuerzo en el concreto.
- Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) (2008) - Anejo 14: Recomendaciones para la utilización de hormigón con fibras.

Esta instrucción situada en el Anejo 14, establece recomendaciones específicas y complementarias para el concreto con fibras en estado fresco, en las primeras edades o en estado endurecido, donde pueden modificar algunas de sus propiedades.

2.1.12 Fibras de acero Dramix

Según IdealAlambrec Bekaert (2012), las fibras de acero Dramix son fabricadas con alambre de acero trefilado de alta resistencia, las fibras de acero Dramix poseen extremos conformados para optimizar el anclaje. El encolado en forma de peine evita la formación de bolas o erizos y garantiza un mezclado fácil, rápido y homogéneo de las fibras en el concreto.

Existen proyectos de magnitudes variables, así como puede darse la construcción de un piso industrial de 40x40 m, puede darse por otro lado la construcción de una vía de 100 km, motivo por el cual distribuye su producto en bolsas recicladas de 20 kg (Figura 2.32) o en otras conocidas como big bags que tienen un peso de alrededor de 1 t.

De acuerdo con IdealAlambrec Bekaert (2012), en una de sus publicaciones menciona lo siguiente: las fibras de acero Dramix, brindan la posibilidad de mejorar los diseños con hormigón desde un punto de vista económico ya que con el uso de estas, se reemplazará el uso de la conocida armadura convencional o malla electrosoldada, esto no solo representa una reducción de costo en cuanto al uso de menos acero, sino también la inexistencia de costos de mano de obra especializada para el armado del acero; existirá otros ámbitos en los cuales se vea reflejado la reducción de costo, que aunque menores, de todas formas es ahorro, entre ellos tenemos los gastos por bodegaje y reducción de tiempos en la ejecución de la obra por lo cual desde un punto de vista económico inclinarían al constructor a decidirse por la utilización de fibras de acero Dramix. Otro factor muy importante es la calidad de la obra, ya que según testimonios de constructores que han usado la fibra de acero Dramix, se observó que las características del hormigón eran difíciles de mejorar ya que tuvo mejoras en varios aspectos como: resistencia al impacto, fatiga, corte, entre otros; además que, con la aplicación de estas fibras se logró un control efectivo de las fisuras y gran capacidad de absorción de energía por parte del hormigón, factores que resaltan la particularidad y eficiencia del producto.

Figura 2.32: Bolsas recicladas de 20 kg



Fuente: Elaboración propia

Las fibras de acero Dramix tienen la marcación CE de la comunidad europea que se rige en la norma EN 14889-1, clasificándolas como sistema nivel o clase 1, esta clasificación quiere decir que las fibras pueden ser utilizadas en concreto, mortero o lechada.

2.1.12.1 Ventajas de la utilización de fibras de acero Dramix según IdealAlambrec (2014)

- De fácil aplicación. Distribución homogénea.
- Reducción de tiempo y costo de construcción hasta 30%.
- Ahorro de desperdicios por traslape y armado de refuerzo.
- Ahorro directo en hormigón por vertido directo del mixer en pisos o losas, no se necesita bombeo. El mixer puede transitar sobre terreno compactado.
- Reducción del costo de mantenimiento y construcción de juntas al permitir hacerlas más distanciadas.
- Menor costo de mantenimiento por tener un concreto más durable.
- Incremento de la capacidad de carga frente a los refuerzos convencionales.
- Mayor resistencia a la fatiga y al impacto.
- Mayor velocidad en ejecución comparada con los refuerzos convencionales.
- Mayor durabilidad del concreto por tener mejor control de fisuras.

2.1.12.2 Ventajas de las fibras encoladas frente a las sueltas

- Mayor facilidad de mezclar con el hormigón
 - No se forman pelotas o erizos
 - Se puede dosificar en cantidades desde 20 kg/m³ hasta 120 kg/m³
- Mejor distribución dentro de la matriz del hormigón
 - Las fibras encoladas se incorporan fácilmente al hormigón de manera homogénea y isotrópica.
 - Al ser de diámetros más finos hay más fibras por kg.
 - Menor distancia entre fibras dentro de la red virtual que se forma en la matriz del hormigón.
 - Menor dispersión dentro del hormigón, igualdad de concentración de fibras: más prestaciones.

2.1.12.3 Tipos de fibras Dramix

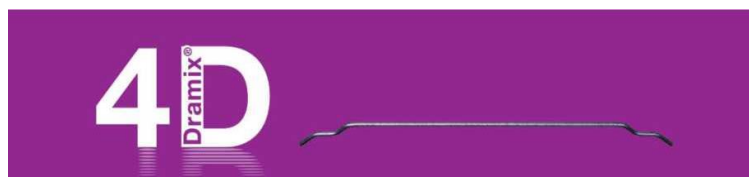
Según la utilización que se le vaya a dar a las fibras de acero Dramix se las puede encontrar en 3 grandes grupos:

Figura 2.33: Fibras de acero Dramix 3D



Fuente: Guía Dramix 5D, 4D, 3D

Figura 2.34: Fibras de acero Dramix 4D



Fuente: Guía Dramix 5D, 4D, 3D

Figura 2.35: *Fibras de acero Dramix 5D*



Fuente: Guía Dramix 5D, 4D, 3D

Como podemos observar, la diferencia entre esta gama de fibras radica en un pequeño detalle: sus terminaciones en forma de gancho que permiten que se anclen al hormigón.

Las diferencias al usar un tipo de fibra, en lugar de otro, dependerán de las necesidades del proyecto en ejecución (Tabla 2.11), se deben tomar en cuenta que aquello que se muestra en las tablas, no es más que una recomendación.

Tabla 2.11: *Tipos de fibras (aplicaciones)*

Construcciones y trabajos de ingeniería civil	5D	4D	3D
Plataformas estructurales ULS			
Estructuras de ingeniería civil			
Puentes			
Plataformas estructurales SLS			
Vías en placa			
Refuerzo secundario			
Carreteras de hormigón			
Hormigón sumergido			
Pavimentación			
Construcciones autoportantes			
Suelo soportado por pilares			
Suelos estructurales			
Pavimentos de alta resistencia			
Losas mixtas			
Suelos uniformes			
Suelos sin juntas			
Suelos con juntas			
Firmes			
Revestimientos adheridos			

Fuente: Bekaert, Dramix reforzando el futuro, 2012

A las fibras de Dramix también se las puede escoger según sus capacidades, para lo cual se muestra el siguiente cuadro comparativo (Tabla 2.12).

Tabla 2.12: Tipos de fibras (capacidades)

	5D	4D	3D
Resistencia de anclaje	=====	=====	=====
Resistencia a la tracción	=====	=====	=====
Ductilidad del alambre	=====	=====	=====
Relación L/D	=====	=====	=====
Resistencia a la tracción del hormigón con fibra de acero	=====	=====	=====

Fuente: Bekaert, *Dramix reforzando el futuro*, 2012

Se observa que la fibra de acero Dramix 5D proporciona mejores resultados que las fibras 3D y 4D; sin embargo, sin importar la gama de fibra que se escoja o el uso que se les dé, estas reflejarán una mejora en las capacidades mecánicas del hormigón.

Existe además una subclasificación de estas fibras en donde se especifica las características de cada fibra, por lo cual se tiene una nomenclatura, misma que se muestra a continuación: (Tabla 2.13)

Tabla 2.13: Nomenclatura fibras de acero Dramix

Anclaje	Encolado	Rendimiento (l/d)	Longitud	Acabado	Tensión
R: Gancho	C: Encoladas	45: Estándar	L: En mm	B: Brilloso	N: Normal
O: Recto	L: Sueltas	65: Alta calidad	-	C: Galvanizado	P: Alta
F: Plano + Gancho	-	80: Súper rendimiento	-	S: Acero inoxidable	-

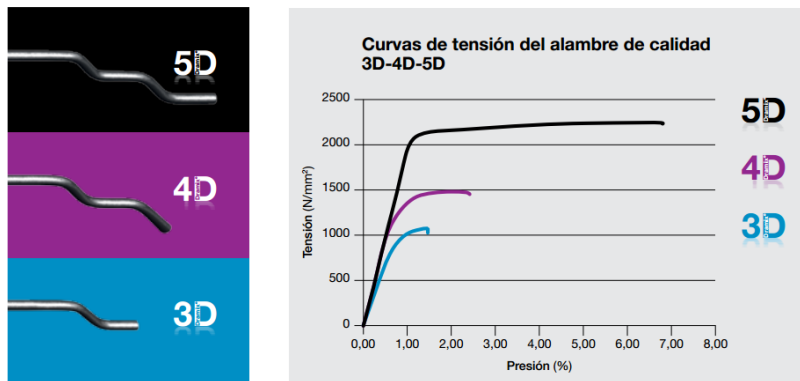
Fuente: IdealAlambrec Bekaert, *catálogo de productos*, 2012

2.1.12.4 Características de las fibras de acero Dramix

2.1.12.5 Resistencia a tracción

La resistencia a la tracción de las series 5D, 4D y 3D ofrece diferentes niveles de rendimiento en las diferentes aplicaciones. La serie 5D combina una resistencia a la tracción extrema con una capacidad de alargamiento muy específica, proporcionando unos niveles de ductilidad nunca vistos.

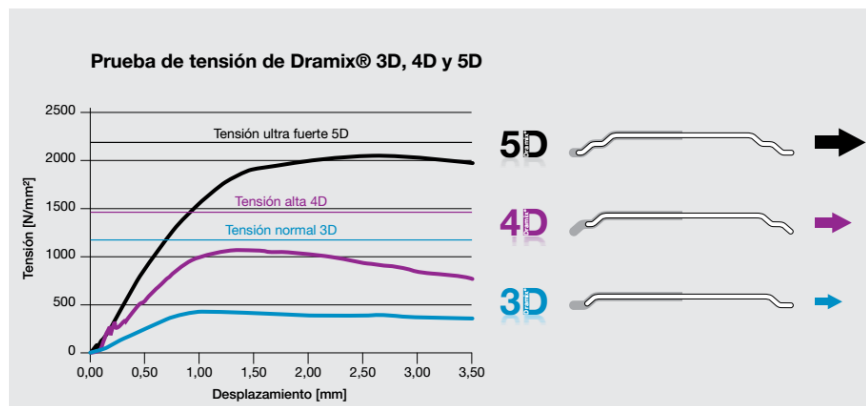
Figura 2.36: Curva de tensión vs presión



Fuente: Guía Dramix 5D, 4D, 3D

La prueba de tensión muestra claramente las diferencias de trabajo de los tres tipos de fibra Dramix. El gancho en las series 3D y 4D se deforma lentamente durante el proceso de tensión, mientras que el gancho 5D permanece firmemente anclado, pero el alambre se alarga creando mayor ductilidad.

Figura 2.37: Curva de tensión vs desplazamiento



Fuente: Guía Dramix 5D, 4D, 3D

2.1.12.6 Resistencia de anclaje

Las terminaciones de gancho de Dramix 3D aseguran la tensión que se busca en la fibra. El anclaje mejorado de Dramix 4D utiliza el mismo principio, pero se traduce en una resistencia del acero mayor. Dramix 5D, por el contrario, se ha formado para conseguir el anclaje perfecto, el mecanismo de tensión se ha reemplazado por el estiramiento de la fibra.

2.1.12.7 Resistencia del alambre

La resistencia a la tracción de una fibra de acero tiene que aumentar paralelamente a la resistencia de su anclaje. Sólo de esta manera la fibra puede resistir las fuerzas que actúan sobre ella.

Por otro lado, un alambre más fuerte no puede utilizarse con un diseño de anclaje común. Por lo tanto, la resistencia a la tracción de una fibra tiene que estar perfectamente alineada con el sistema de su anclaje y con su diámetro. Dramix 3D, 4D y 5D están diseñadas por separado para sacar el máximo provecho a la resistencia del alambre.

2.1.12.8 Ductilidad del alambre

Dramix 3D y 4D crean la ductilidad del alambre mediante la deformación lenta del gancho durante el proceso de tensión.

Esto es diferente con Dramix 5D, el alambre se alarga, proporcionando la ductilidad mediante el mismo principio que el refuerzo de acero clásico, lo cual es posible con un alambre de acero dúctil con una calidad superior y excepcional.

2.1.12.9 Especificaciones técnicas

Tabla 2.14. Especificaciones técnicas de las fibras Dramix 3D

Tipo de fibra	Dramix 3D 65/35 BG	Dramix 3D 45/35 BL	Dramix 3D 45/40 BG-BL	Dramix 3D 80/60 BG	Dramix 4D 55/60 BG-BL	Dramix 5D 65/60 BG-BL
Longitud (l)	35,00 mm	35,00 mm	40,00 mm	60,00 mm	60,00 mm	60,00 mm
Diámetro (d)	0,55 mm	0,75 mm	1,05 mm	0,75 mm	1,05 mm	0,90 mm
Relación de esbeltez (l/d)	65,00	45,00	45,00	80,00	55,00	65,00
Resistencia a la tracción	1345,00 N/mm ²	1225,00 N/mm ²	1115,00 N/mm ²	1225,00 N/mm ²	1500,00 N/mm ²	2300,00 N/mm ²
Presentación	Encolada	Suelta	Suelta	Encolada	Encolada/ Suelta	Encolada/ Suelta

Fuente: Guía Dramix 5D, 4D, 3D

2.1.13 Fibras de acero Dramix 3D

Son las fibras que brindan mayor confianza al usuario debido a sus estupendas capacidades mecánicas de resistir esfuerzos de tracción, además existen normas en varios países que regulan y respaldan su uso y aplicación en el hormigón. También es importante conocer que las fibras de acero Dramix 3D son pequeños filamentos que al ser colocados en la mezcla de hormigón, colaboran a las características mecánicas de la mezcla a que sus partículas se mantengan juntas pese al desgaste o deterioro que este haya sufrido debido a la aplicación de cargas ya a causa del tránsito vehicular, cambios bruscos de clima (al sufrir dilatación del mismo), o algún otro factor externo que podría contribuir con el deterioro o desgaste del hormigón

Este tipo de fibras son pequeños elementos similares a una grapa de sección cilíndrica, donde su relación largo - diámetro (L/D) es muy alta. Estas fibras, como se mencionó anteriormente, ayudan al hormigón a resistir grandes esfuerzos de tracción generados principalmente por la flexión. Esto a su vez, trae consigo varias ventajas en el hormigón, como es la reducción de fisuras. Esto permite generar un ahorro en los costos de mantenimiento de un elemento de hormigón, ya que, el ingreso del agua se limita, debido

a que las fibras mantienen al elemento unido por mucho más tiempo que a aquellos hormigones sin fibra.

Para la siguiente investigación se utilizarán fibras de acero de la marca comercial Dramix 3D 80/60 (Figura 2.38), por ser un tipo de fibra que se encuentra disponible en el país y ser una de las más utilizadas debido a su amplia aplicación.

Figura 2.38: Fibras de acero Dramix 3D

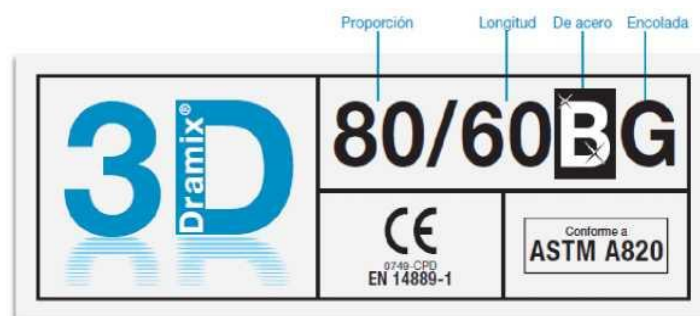


Fuente: Elaboración propia

2.1.13.1 Ficha técnica de las fibras Dramix 3D/80/60

Existen diversos tipos de fibras de acero Dramix por lo que es necesario generar fichas para cada una de ellas, y aún más importante es saber que interpretar la nomenclatura que se muestra en cada ficha, lo cual se explicará a continuación: Ejemplo de ficha: fibra de acero Dramix 3D (Figura 2.39).

Figura 2.39: Ficha técnica Dramix 3D 80/60



Fuente: Ficha técnica Bekaert

Figura 2.40: Fibra Dramix 3D 80/60



Fuente: Ficha técnica Bekaert

Dramix 3D es una solución rentable para:

- Pavimento
- Túneles
- Prefabricados
- Viviendas

Tabla 2.15: Propiedades de las fibras de acero Dramix 3D 80/60

Rendimiento de Dramix 3D 80/60						
Propiedades del material			Geometría		Red de fibra	
Resistencia a tracción	Rm, nom	1225 N/mm ²	Gama de fibras	3D	Km por m ³	2,90 km/m ³ para 10,00 kg/m ³
	Tolerancia	± 7,50 % promedio	Longitud (l)	60,00 mm		
Módulo de Young	± 200000,00 N/mm ²		Diámetro (d)	0,75 mm	Fibras/kg	4584
			Proporción (l/d)	80,00	Dosificación mínima	10,00 Kg/m ³

Fuente: Guía Dramix 5D, 4D, 3D

2.1.13.2 Certificaciones

- Norma ASTM A820
- Norma Europea EN 14889-1

2.1.13.3 Según el fabricante

El fabricante recomienda una dosificación mínima de 10 kg/m³.

2.2 Marco normativo

Tabla 2.16: Normas usadas en la investigación

N°	Descripción	Norma
1	Toma de muestras	ASTM C-172 / AASHTO T41
2	Granulometría del agregado grueso	ASTM C-136 / AASHTO T27
3	Desgaste en máquina de los Ángeles	ASTM C-131 / AASHTO T96
4	Peso específico y absorción de agua del agregado grueso	ASTM C-127 / AASHTO T85
5	Peso específico y absorción de agua del agregado fino	ASTM C-128 / AASHTO T84
6	Peso unitario de los agregados finos o gruesos	ASTM C-29 / AASHTO T19
7	Finura del cemento	ASTM C-204 / AASHTO T153
8	Peso específico del cemento Portland	ASTM C-188 / AASHTO T133
9	Dosificación del hormigón	ACI-211
10	Manual de ensayos de suelos y materiales	ABC (2009) V4
11	Manual de especificaciones técnicas generales en construcción	ABC (2011) v8
12	Resistencia a la flexión del hormigón	ASTM C-78
12	Resistencia a la compresión del hormigón	ASTM C-39

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III

CRITERIOS DE RELEVAMIENTO DE LA

INFORMACION

CAPÍTULO III

CRITERIOS DE RELEVAMIENTO DE LA INFORMACION

3.1 Criterios a utilizarse

3.1.1 Criterios de selección de banco de materiales

La ciudad de Tarija cuenta con varios bancos de materiales ubicados en diferentes ríos de esta zona los cuales proporcionan seguridad para el diseño que se realice, para la presente investigación se utilizará los agregados del Río La Victoria extraídos a la altura de comunidad del Rincón de la Victoria, la cual se encuentra ubicada al suroeste de la ciudad de Tarija en las siguientes: Coordenadas geográficas:

Latitud: 21°31'26" S y Longitud: 64° 48' 26" O.

Coordenadas UTM: 312830,52 m E y 7618785,94 m S.

Figura 3.1: Río La Victoria



Fuente: Elaboración propia.

Muestra de agregados.- Para extraer la muestra de agregados se seleccionó un sitio adecuado y se extrajo tres cubos de material para posteriormente poder realizar todos los ensayos necesarios y cumpliendo con los requisitos de tamaños de muestras mínimas y reducción de la misma de acuerdo a los aparatos y procedimiento para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos ASTM D-75 y ASTM C-702.

3.1.2 Criterios de selección de las fibras de acero Dramix 3D

Según Arango Campo (2010): "Las consecuencias estructurales de la adición de fibras de acero al hormigón, se manifiestan principalmente en estado fisurado, dotando al hormigón de una capacidad de resistencia residual y una rotura más dúctil." (p. 7)

La característica principal del porque utilizar fibras según (Arango Campo, 2010):

Las fibras son las que asumen las tensiones de tracción mientras que la matriz que las rodea mantiene su localización y orientación, actuando como un medio de transferencia de carga entre ellas, además de proteger a las fibras de los agentes agresivos del medio ambiente como la humedad y la temperatura, entre otros. (p. 25).

Las fibras de acero Dramix a emplear para este proyecto de investigación son las que importa la empresa: Importadora Campero con ubicación en la ciudad de Tarija, Av. Ballivian pasando Circunvalación a 50 mtrs, Ballivián. La fibra empleada es un producto de la empresa Beakeart de origen Belgo, la cual tiene clientes en 120 países.

Figura 3.2: Fibras Dramix 80/60

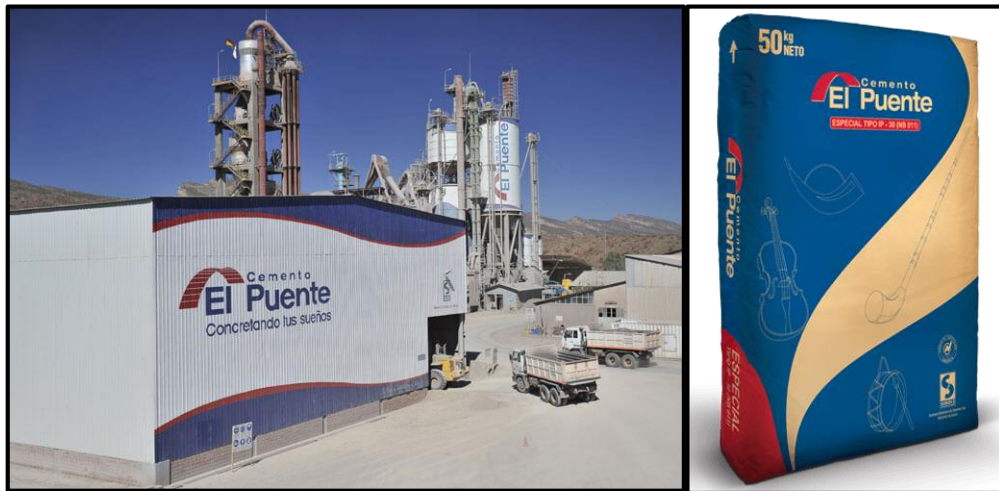


Fuente: Guía Dramix 3D

3.1.3 Criterios de Selección del cemento hidráulico

El cemento hidráulico que se utilizará para realizar los ensayos será el que se usa comúnmente en nuestro medio (Cemento El Puente IP 30) el cual es un producto de industria nacional y que cumple con las especificaciones de la NB y la ABC; la fábrica de dicho cemento se encuentra en el departamento de Tarija.

Figura 3.3: Fábrica de cemento El Puente.



Fuente: Elaboración propia

3.2 Caracterización de los materiales

Los ensayos realizados a los agregados que serán empleados en la elaboración de vigas y probetas de hormigón para pavimento rígido, son realizados en el laboratorio de resistencia de materiales de la carrera de Ing. Civil de la facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho para dicha caracterización se tendrá que llevar el material necesario extraído del banco de préstamo previamente seleccionado

Antes de realizar la caracterización se lavaron todos los materiales con agua, la grava lavada en una fuente con ayuda del tamiz N° 4 y la arena también se lavó en el tamiz N° 200 y fueron debidamente secados en el horno de dicho laboratorio, luego se hizo enfriar para ser almacenados en lugar seco en bolsas de yute.

Todas las planillas de todos los ensayos realizados a los materiales que se utilizarán para elaborar esta investigación están en el anexo II y también todas las fotos de cada ensayo se encuentran en el anexo I.

3.2.1 Ensayo de granulometría (AASHTO T-27); (ASTM C-136)

Se realiza el ensayo a los agregados fino y grueso, los materiales mencionados se hace pasar por los tamices que determina la norma ASTM C-136, con el fin de verificar si son los adecuados para la elaboración de probetas y vigas de hormigón de pavimento rígido.

Granulometría de la grava.- Para realizar este ensayo primero se debe cuartear la muestra en 4 partes iguales, después se toma 5 kg de muestra por cada parte para colocar en los tamices, como la grava tiene un TMN.= 1” se utiliza tamices desde 1” al N° 4 en orden descendente, se coloca la muestra y se procede a ubicar los tamices en el equipo rotor y dejar que esté un tiempo mínimo de 15 minutos, si al sacar la muestra del equipo no está bien tamizada se tiene que hacer otra vez el tamizado o hacerlo de forma manual una vez hecho bien el tamizado se tienen que pesar lo que se quedó retenido en cada tamiz para hacer los cálculos, y establecer si la curva se encuentra o no dentro de los límites siguiendo la normativa establecida.

A continuación, se muestran los resultados de la granulometría de los 3 ensayos realizados

Tabla 3.1: Registro de resultados de granulometría del agregado grueso

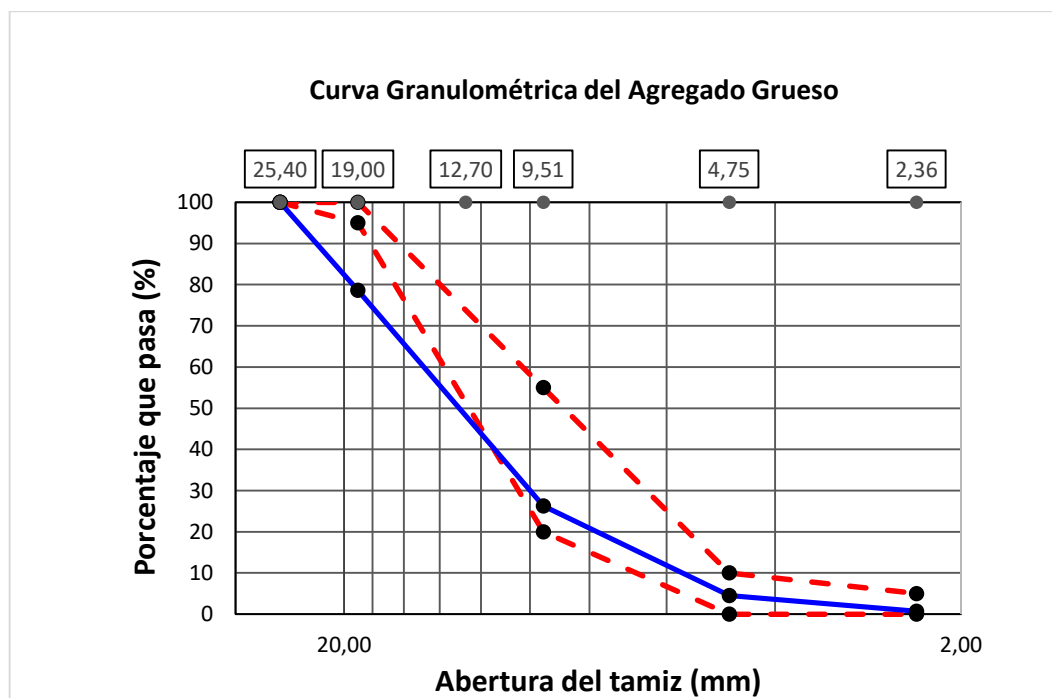
Granulometría ASTM C-136		Identificación de la muestra:				Río La Victoria			
		Fecha de ensayo:				28/04/2022			
Resultados		Ensayo 1				Ensayo 2			
Masa inicial de la muestra (g)		5000				5000			
Tamiz		Masa retenida (gr)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)	Masa retenida (gr)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
Pulg.	mm								
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	1049,80	21,00	21,00	79,00	1186,00	23,72	23,72	76,28
1/2"	12,70	1779,10	35,58	56,58	43,42	2121,00	42,42	66,14	33,86
3/8"	9,51	770,50	15,41	71,99	28,01	845,00	16,90	83,04	16,96
N° 4	4,75	1080,30	21,61	93,59	6,41	809,00	16,18	99,22	0,78
N° 8	2,36	309,10	6,18	99,78	0,22	38,00	0,76	99,98	0,02
Base		11,10	0,22	100,00	0,00	0,50	0,01	99,99	0,01
Masa total retenida (g)		4999,90				4999,50			
Diferencia de masas (g)		0,10				0,50			
Módulo de finura		7,43				7,72			

Continuación de la tabla anterior

Ensayo 3				Promedio	% que pasa según la especificación (AASHTO T-27)	
5000					Porcentaje que pasa (%)	Límite inferior
Masa retenida (gr)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)			
0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100	100
971,30	19,43	19,43	80,57	78,62	95	100
1321,00	26,42	45,85	54,15	43,81	-	-
1020,10	20,40	66,25	33,75	26,24	20	55
1370,80	27,42	93,66	6,34	4,51	0	10
220,20	4,40	98,07	1,93	0,73	0	5
96,40	1,93	100,00	0,00	0,00	-	-
4999,80				4999,73		
0,20				0,27		
7,23				7,46		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.4: Curva granulométrica promedio del agregado grueso – grava



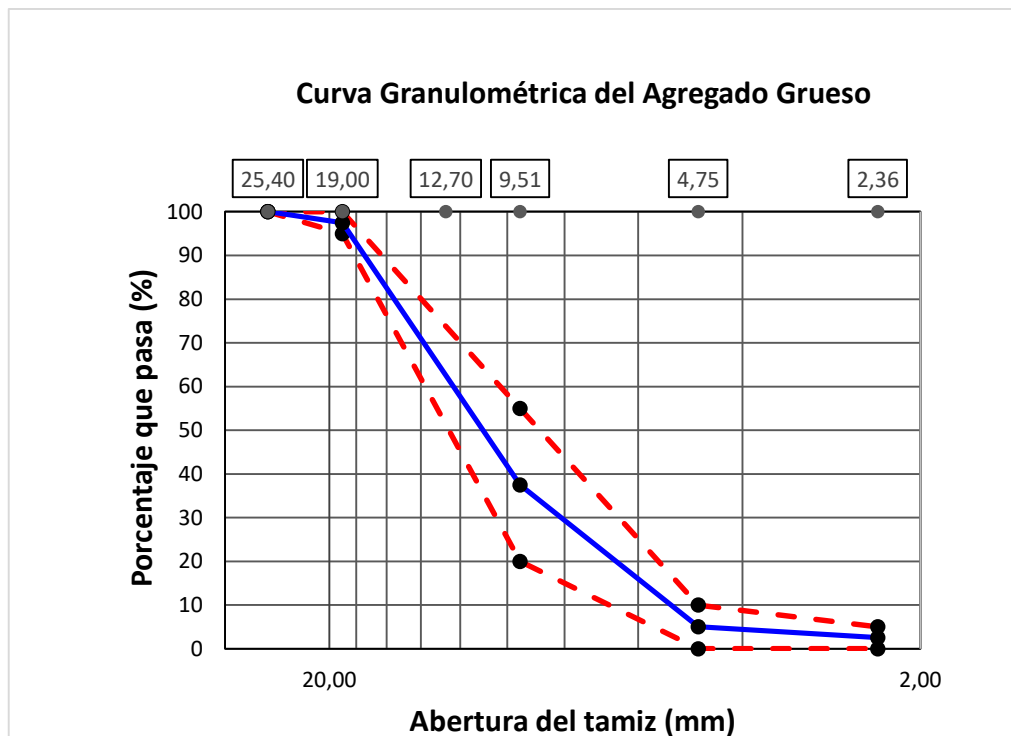
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2: Granulometría ideal del agregado grueso (Río La Victoria)

Tamiz		Porcentaje que pasa (%)	% que pasa según la especificación (AASHTO T-27)	
Pulg.	mm		Límite inferior	Límite superior
1"	25,40	100,00	100	100
3/4"	19,00	97,50	95	100
3/8"	9,51	37,50	20	55
N° 4	4,75	5,00	0	10
N° 8	2,36	2,50	0	5
Base		0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.5: Curva granulométrica confeccionada del agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

Granulometría de la arena.- El ensayo granulométrico de la arena se hace igual forma que los anteriores ensayos ya mencionados solo que varía el tamaño de los tamices aquí se utiliza desde el tamiz 3/8" al N° 200 y se toma una muestra de 500 gr de igual manera se coloca la rotor durante 15 minutos transcurrido el tiempo se saca del equipo y se procede a pesar lo retenido en cada tamiz para hacer los cálculos y obtener la curva granulométrica y así poder verificar si está dentro de los límites.

Tabla 3.3: Registro de resultados de granulometría del agregado fino

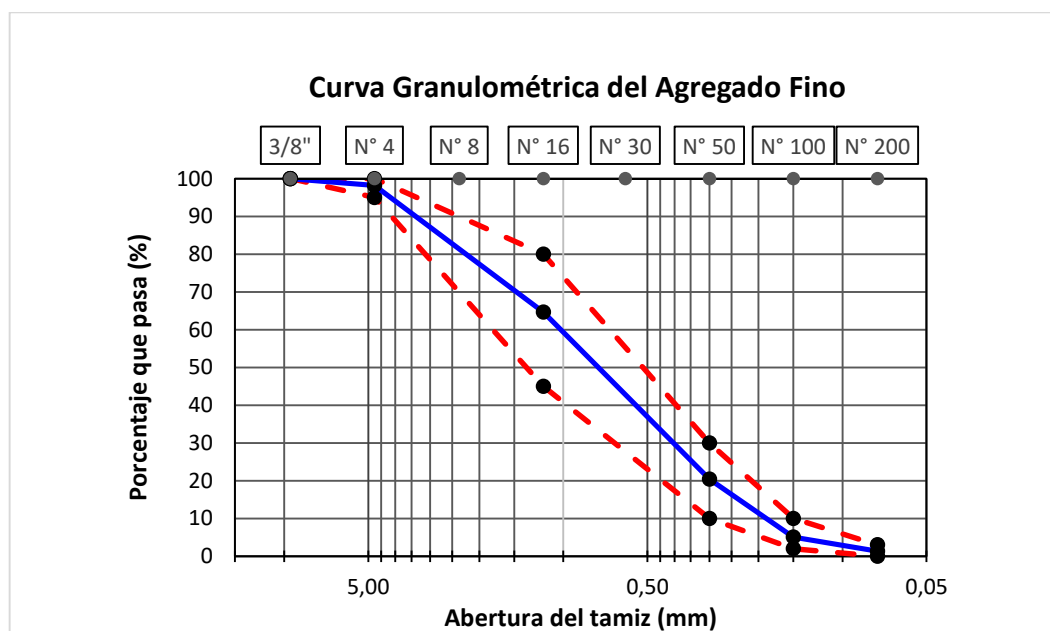
Granulometría ASTM C136		Identificación de la muestra:				Río La Victoria			
		Fecha de ensayo:				21/04/2022			
Resultados		Ensayo 1				Ensayo 2			
Masa inicial de la muestra [g]		500				500			
Tamiz		Masa retenida (gr)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)	Masa retenida (gr)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
Pulg.	mm								
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00
N° 4	4,75	17,00	3,40	3,40	96,60	6,50	1,30	1,30	98,70
N° 8	2,36	43,20	8,64	12,04	87,96	53,80	10,76	12,06	87,94
N° 16	1,18	107,80	21,56	33,60	66,40	120,90	24,18	36,24	63,76
N° 30	0,60	106,60	21,32	54,92	45,08	121,20	24,24	60,48	39,52
N° 50	0,30	113,90	22,78	77,70	22,30	113,70	22,74	83,22	16,78
N° 100	0,15	83,70	16,74	94,44	5,56	71,60	14,32	97,54	2,46
N° 200	0,08	22,00	4,40	98,84	1,16	10,80	2,16	99,70	0,30
Base		5,60	1,12	99,96	0,00	1,40	0,28	99,98	0,00
Masa total retenida [g]		499,80				499,90			
Diferencia de masas [g]		0,20				0,10			
Módulo de finura		2,76				2,91			

Continuación de la tabla anterior

Ensayo 3				Promedio	% Que Pasa Especificación (AASHTO T - 27)	
500					Porcentaje que pasa (%)	Límite inferior
Masa retenida (gr)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)			
0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100	100
3,20	0,64	0,64	99,36	98,22	95	100
59,10	11,82	12,46	87,54	87,81	-	-
119,20	23,84	36,30	63,70	64,62	45	80
108,80	21,76	58,06	41,94	42,18	-	-
99,20	19,84	77,90	22,10	20,39	10	30
74,50	14,90	92,80	7,20	5,07	2	10
23,80	4,76	97,56	2,44	1,30	0	3
11,90	2,38	99,94	0,00	0,00	-	-
499,70				499,80		
0,30				0,20		
2,78				2,82		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.6: Curva granulométrica promedio agregado fino – arena



Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Ensayo de peso específico y absorción de agua en agregados gruesos (AASTHO T-85); (ASTM C-127)

Este ensayo establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos. Para este ensayo se realizó la medición del peso específico para la grava.

La muestra se lava inicialmente con agua hasta eliminar completamente el polvo u otras sustancias extrañas adheridas a la superficie de las partículas; se seca a continuación en un horno a 100 °C - 110 °C. Después se la sumerge en agua y se la seca, además se secan las partículas redondas sobre un paño a continuación, se determina el peso de la muestra en el estado de saturación con superficie seca (S.S.S.).

Posteriormente, se coloca la muestra en el interior de la canastilla metálica y se especifica su peso sumergida en el agua, a una temperatura ambiente de 25 °C.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASTHO T-85 y ASTM C-127.

Tabla 3.4: Datos del ensayo de peso específico para el agregado grueso

Determinación	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
A (Peso en el aire de la muestra seca)	2969,70	2968,90	2968,60	
B (Peso en el aire muestra saturada-superficie seca) (gr/cm ³)	3000,00	3000,00	3000,00	
Peso canastillo + muestra sumergida en agua	2738,60	2734,50	2735,00	
Peso canastillo sumergido en agua	883,00	883,00	883,00	
C (Peso sumergido en agua de la muestra saturada)	1855,60	1851,50	1852,00	
D = B - C	1144,40	1148,50	1148,00	
E = A - C	1114,10	1117,40	1116,60	
F = B - A	30,30	31,10	31,40	
Peso específico aparente (gr/cm ³)	2,67	2,66	2,66	2,66
Peso específico a granel (gr/cm ³)	2,59	2,59	2,59	2,59
Peso específico saturado y superficie seca (gr/cm ³)	2,62	2,61	2,61	2,62
(%) Porcentaje de absorción	1,02	1,05	1,06	1,04
				2,62

Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Ensayo de peso específico y absorción de agua del agregado fino (AASTHO T-84) (ASTM C-128)

Este ensayo tiene como objetivo la determinación del peso específico aparente, lo mismo que la cantidad de agua que se absorbe en el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso.

El peso específico aparente es la relación entre el peso del agua correspondiente a su volumen aparente; este ensayo establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de los áridos finos.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASTHO T-84 y ASTM C-128.

Tabla 3.5: Datos del ensayo de peso específico del agregado fino

Determinación	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
Matraz	1	2	3	
Temperatura	23,00	23,00	23,00	
Peso de la muestra (gr)	500,00	500,00	500,00	
Peso del matraz (gr)	195,70	166,90	177,70	
Peso del matraz + agua + muestra(gr)	994,70	970,70	986,90	
W (peso del agua agregado al matraz)	299,00	303,80	309,20	
A (peso de la muestra secada al horno)	485,40	484,90	485,10	
V (volumen del matraz)	500,00	500,00	500,00	
P. E. a granel (gr/cm ³)	2,41	2,47	2,54	2,48
P. E. saturado con sup. seca (gr/cm ³)	2,49	2,55	2,62	2,55
P. E. aparente (gr/cm ³)	2,60	2,68	2,76	2,68
(%) porcentaje de absorción	3,01	3,11	3,07	3,06
				2,57

Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Ensayo de peso unitario de los agregados (AASTHO T-19) (ASTM C-29)

El peso unitario de los áridos dados se puede determinar sobre volumen suelto o sobre volumen compactado. Para ello se emplea un recipiente cilíndrico de volumen conocido. Los volúmenes empleados son normalmente 0,1 – 0,5 1,0 pies (2,83 -14,16 -28,31litros), según el tamaño de los áridos ensayados.

Para medir el peso unitario con áridos sueltos, se llena el recipiente por un procedimiento normalizado y se determina el peso de los áridos contenidos por un recipiente lleno.

Para medir el peso compactado, se llena el recipiente en tres capas aproximadamente iguales, aplicando a cada capa determinados procedimientos de agitación o apisonado según el tamaño de los áridos en el ensayo.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASTHO T-19 y ASTM C-29.

3.2.4.1 Ensayo de peso unitario a los agregados pétreos (Río La Victoria)

Tabla 3.6: Datos y resultados del ensayo de peso unitario de la grava

Descripción		Unidad	Muestra		
			1	2	3
Peso unitario suelto	Peso del recipiente	gr	5720,00	5720,00	5720,00
	Peso muestra + recipiente	gr	21550,00	21540,00	21520,00
	Peso del agregado seco	gr	15830,00	15820,00	15800,00
	Volumen recipiente	cm ³	9919,00	9919,00	9919,00
	Peso unitario seco	gr/cm ³	1,60	1,59	1,59
	Promedio	gr/cm ³	1,59		
Peso unitario compactado	Peso del recipiente	gr	5720,00	5720,00	5720,00
	Peso muestra + recipiente	gr	22365,00	22305,00	22340,00
	Peso del agregado seco	gr	16645,00	16585,00	15078,00
	Volumen recipiente	cm ³	9919,00	9919,00	9919,00
	Peso unitario seco	gr/cm ³	1,68	1,67	1,52
	Promedio	gr/cm ³	1,62		
Peso unitario de la grava		gr/cm ³	1,61		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7: Datos y resultados del peso unitario de la arena

Descripción		Unidad	Muestra		
			1	2	3
Peso unitario suelto	Peso del recipiente	gr	2605,00	2605,00	2605,00
	Peso muestra + recipiente	gr	7085,00	7160,00	7140,00
	Peso del agregado seco	gr	4480,00	4555,00	4535,00
	Volumen recipiente	cm ³	3026,00	3026,00	3026,00
	Peso unitario seco	gr/cm ³	1,48	1,51	1,50
	Promedio	gr/cm ³	1,49		
Peso unitario compactado	Peso del recipiente	gr	2605,00	2605,00	2605,00
	Peso muestra + recipiente	gr	7575,00	7600,00	7580,00
	Peso del agregado seco	gr	4970,00	4995,00	4975,00
	Volumen recipiente	cm ³	3026,00	3026,00	3026,00
	Peso unitario seco	gr/cm ³	1,64	1,65	1,64
	Promedio	gr/cm ³	1,65		
Peso unitario de la grava		gr/cm ³	1,57		

Fuente: Elaboración propia

3.2.5 Ensayo de desgaste por medio de la máquina de los Ángeles (AASTHO T-96); (ASTM C-131)

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y de degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento.

Debido a las condiciones de esfuerzo-deformación, la carga de la rueda es transmitida a la superficie del pavimento a través de la llanta como una presión vertical aproximadamente uniforme y alta. La estructura del pavimento distribuye los esfuerzos de la carga, de una máxima intensidad en la superficie hasta una mínima en la subrasante.

Por esta razón los agregados que están en la superficie, como son los materiales de base y capa de rodadura, deben ser más resistentes que los agregados usados en las capas inferiores, sub base, de la estructura del pavimento, la razón se debe a que las capas

superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de cargas del tránsito.

Por otro lado, los agregados transmiten los esfuerzos a través de los puntos de contacto donde actúan presiones altas. El ensayo de desgaste de los Ángeles, ASTM C-131 o AASTHO T-96, mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o a la abrasión.

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores a 37,50 mm (1 1/2") y agregados gruesos de tamaños mayores de 19,00 mm (3/4"), por medio de la máquina de los Ángeles.

Los aparatos y procedimiento para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASTHO T-96 y ASTM C-131.

Tabla 3.8: Datos y resultados del ensayo de desgaste para la grava

Gradación B Carga abrasiva con 11 esferas a 32,50 rpm, revoluciones		
Pasado	Retenido	Cantidad tomada (g)
3/4"	1/2"	2500,50
1/2"	3/8"	2500,00
Retenido tamiz de corte N° 12 (1,70 mm)		3930,20
Diferencia		1070,30
Porcentaje de desgaste (%)		21,40

Fuente: Elaboración propia

3.2.6 Ensayos realizados al cemento portland

El cemento que se utilizará para la dosificación del hormigón en el presente trabajo será un cemento del Tipo I (IP 30) de la marca El Puente, el cual cumple con las especificaciones de la norma boliviana NB.

Los ensayos que se realizarán al cemento serán:

- Peso específico del cemento

3.2.6.1 Ensayo del peso específico del cemento portland (El Puente IP 30) (ASTM C-188) (AASHTO T-133)

Este ensayo tiene por objeto establecer el método para determinar el peso específico del cemento hidráulico. Su principal utilidad está relacionada con el diseño y el control de las mezclas de hormigón.

Los equipos y procedimientos se detallan en los métodos ASTM C-188 y AASHTO T-133.

Para el cálculo del peso específico del cemento portland se utilizará la siguiente ecuación:

$$P.E. = \text{Peso del cemento (gr.)} / \text{Volumen desplazado (ml.)}$$

Tabla 3.9: Datos y resultados del peso específico del cemento portland

Peso de la muestra de cemento = 64 (g)				
Ensayo	Volumen inicial (ml)	Volumen líquido + Muestra (ml)	Diferencia de volumen (ml)	P. E. del cemento (gr / cm ³)
1	300,00	320,50	20,50	3,12
2	300,00	319,50	19,50	3,28
3	300,00	321,00	21,00	3,05
Promedio				3,15

Fuente: Elaboración propia

3.3 Análisis de resultados

Para la caracterización de los áridos componentes del concreto que se utilizó en la ejecución de la investigación, se hizo una comparación con los rangos establecidos por las siguientes normas.

Tabla 3.10: Rangos de valores específicos según normativas

Característica	Unidad	Especificación		Norma
		Min.	Max.	
Tamaño máximo (grava)	mm	-	38,00	ASTM C-33
Tamaño máximo (arena)	mm	-	951,00	ASTM C-33
Módulo de finura (arena)	-	2,30	3,10	ASTM C-33
Peso específico (arena y grava)	g/cm ³	2,40	2,90	ASTM C-33
Peso volumétrico (arena y grava)	kg/m ³	1200	1760	ASTM C-33
% de absorción (grava)	%	-	≤ 2	NCh 163
% de absorción (arena)	%	-	≤ 3	NCh 163
Desgaste de los Ángeles (grava)	%	-	< 50	ASTM C-33

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.11: Resultados de los ensayos de laboratorio

Característica	Unidad	Río La Victoria	
		Grava	Arena
Tamaño máximo	mm	25,40	4,75
Tamaño máximo nominal	mm	19,00	-
Módulo de finura	-	7,46	2,82
Peso específico	g/cm ³	2,62	2,55
Peso volumétrico	kg/m ³	1620,00	1650,00
% de absorción	%	1,04	3,06
Desgaste de los Ángeles (grava)	%	21,40	-

Fuente: Elaboración propia

Realizando la anterior comparación mediante las normas especificadas en la Tabla 3.11, se comprobó que los áridos (grava y arena) extraídos de los bancos de préstamo del Río La Victoria cumplen con las condiciones de construcción especificadas para la elaboración del concreto utilizado en pavimentos rígidos.

Se evaluó el cemento antes de usar como aglomerante en la mezcla para la elaboración de las probetas y vigas en estudio, de acuerdo a normas.

Tabla 3.12: Rangos de valores específicos del cemento según normas

Característica	Unidades	Especificación		Norma
		Min.	Max.	
Peso específico (cemento)	g/cm ³	2,90	3,15	NB-064
Finura del cemento	%	< 5	< 10	ASTM C-204

Fuente: Elaboración propia

La relación que se utiliza para determinar el porcentaje de finura es la siguiente:

Si el % Finura es menor al 5%, significa que este es un cemento Portland de endurecimiento rápido.

Si el % es menor que el 10%, es que es un cemento Portland para uso ordinario.

Tabla 3.13: Resultados de los ensayos de laboratorio cemento “El Puente”

Característica	Unidad	Cemento El Puente
Peso específico (cemento)	g/cm ³	3,14
Finura del cemento	%	2,07

Fuente: Análisis del comportamiento de pavimento de concreto con fibras de polipropileno aplicado a losas cortas pg. 113

De acuerdo a las especificaciones, este cemento es de endurecimiento rápido y sus valores están dentro del rango especificado por norma NB-064.

3.4 Dosificación del hormigón

Después de haber elaborado los ensayos en agregados a utilizarse previos a la dosificación, verificando que estos cumplen con las normas y son aptos para utilizarse, se procede a calcular la dosificación del hormigón para una resistencia a la compresión de 300 kg/cm^2 , mediante el método ACI el cual está basada en la norma ACI. Para lo cual se requiere de los siguientes datos obtenidos en el laboratorio de ensayos de tecnología del hormigón y resistencia de los materiales de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho:

La dosificación del hormigón del presente trabajo se realizará para la utilización de los agregados convencionales en estado seco, por lo que no se efectuara las correcciones debido al contenido de humedad de los agregados.

Para realizar la dosificación por este método se debe seguir los siguientes pasos:

- Selección del asentamiento.
- Selección del tamaño máximo del agregado.
- Estimación del contenido de agua de mezclado.
- Determinación de la resistencia de diseño.
- Selección de la relación agua-cemento.
- Cálculo del contenido de cemento.
- Estimación de las proporciones de los agregados

Tabla 3.14: Características de los agregados

Ensayo	Unidad	Valor
Módulo de finura de la arena (MF)	s/u	2,82
Peso unitario Compactado de la grava (PUC)	kg/m ³	1620
Peso específico de la arena (yf)	gr/cm ³	2,55
Peso específico de la grava (yg)	gr/cm ³	2,62
Absorción de la arena (Aa)	%	3,06
Absorción de la Grava (Ag)	%	1,04
Humedad de la Arena (Ha)	%	0,00
Humedad de la Grava (Hg)	%	0,00
Tamaño máximo Nominal (TMN)	Pulg.	3/4"
Tamaño Máximo (TM)	Pulg.	1 "
Peso específico del cemento	gr/cm ³	3,14

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.15: Características del diseño

Característica	Unidad	Valor
Resistencia de diseño (fck´)	kg/cm ²	300,00
Resistencia Característica (fck) (Tabla 2.15) (Anexos)	kg/cm ²	385,00
Asentamiento (S) (Tabla 11.4) (Anexos)	cm	2,50
Requerimiento de Agua (A) (Tabla 11.6) (Anexos)	kg/m ³	180,45
Relación Agua / Cemento (a/c) (Tabla 11,13) (Anexos)	s/u	0,39
Vol. Agr. Grueso / Vol. unitario hormigón (b/bo) (Tabla 11.15) (Anexos)	s/u	0,62

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.16: Cálculo de la cantidad de materiales

Característica	Unidad	Valor
Peso Agregado Grueso (Pag)	kg/m ³	= (b/bo)xPUC
		1038,69
Peso cemento (Pc)	kg/m ³	= A / (a/c)
		453,85
Volumen de Agregado Grueso (Vag)	lt/m ³	= Pag/γg
		401,25
Volumen del cemento (Vc)	lt/m ³	= Pc/γc
		144,54
Volumen de Arena (Vaf)	lt/m ³	= 1000-A-Vag- Vc
		277,31
Peso del agregado fino (Paf)	kg/m ³	= Vaf x γf
		686,46

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.17: Peso seco de los ingredientes por (m³) de hormigón

Material	Peso seco kg/m ³	Volumen absoluto lt/m ³	Peso específico gr/cm ³
Agua	177,00	177,00	1,00
Cemento	453,85	144,54	3,14
Grava	1038,69	401,25	2,59
Arena	686,46	277,21	2,48
Total	2355,99	1000,00	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.18: Peso húmedo de los materiales

Característica	Unidad	Valor
Peso Húmedo de la arena (Pha)	kg/m ³	= Paf x (1 + Ha)
		686,46
Peso Húmedo de la Grava (Phg)	kg/m ³	= Pag x (1 + Hg)
		1038,69
Corrección del agua		
Agua corregida a la grava (Acg)	lt/m ³	= Pag x (Ag - Hg)
		10,82
Agua corregida a la Arena (Acf)	lt/m ³	= Paf x (Aa - Ha)
		20,41
Total Agua Corregida (Atc)	lt/m ³	= Acg + Acf 37,51
		31,23

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.19: Resumen de resultados de la dosificación

Material	Peso por 1m ³ (H°)		Relación
	Seco kg/m ³	Húmedo kg/m ³	
Agua	177,00	208,23	0,39
Cemento	453,85	453,85	1,00
Grava	1038,69	1038,69	2,29
Arena	686,46	686,46	1,51
Total	2355,99	2387,22	-

Fuente: Elaboración propia

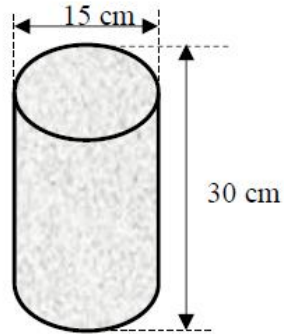
La dosificación obtenida del cálculo de esta investigación es en proporción de:

Cemento	Arena	Grava
1,0	2,0	2,0

3.4.1 Dosificación de hormigón para probetas cilíndricas

Dimensión del molde de probetas cilíndricas

Figura 3.7: Dimensión de los moldes de probetas cilíndricas



Fuente: Elaboración propia

$$V = \pi * r^2 * h$$

$$V = 0,0052 \text{ m}^3$$

3.4.1.1 Dosificación para 3 probetas cilíndricas de hormigón

Probetas sin refuerzo de fibra

Tabla 3.20: Dosificación de cilindros de hormigón sin refuerzo

0,00 % de fibra de acero		
Material	Seco	Húmedo
	(kg) para 3 probetas	(kg) para 3 probetas
Agua	3,29	3,94
Cemento	10,39	10,39
Grava	17,83	17,83
Arena	9,89	9,89
Total	41,40	42,05

Fuente: Elaboración propia

Probetas con refuerzo de fibra

Tabla 3.21: Dosificación de cilindros de hormigón con refuerzo

10,00 kg/m³ de fibra de acero		
Material	Seco	Húmedo
	(kg) para 3 probetas	(kg) para 3 probetas
Agua	3,21	3,79
Cemento	8,46	8,46
Grava	17,83	17,83
Arena	12,65	12,65
Fibra	0,18	0,18
Total	42,33	42,90
15,00 kg/m³ de fibra de acero		
Material	Seco	Húmedo
	(kg) para 3 probetas	(kg) para 3 probetas
Agua	3,21	3,79
Cemento	8,46	8,46
Grava	17,83	17,83
Arena	12,65	12,65
Fibra	0,27	0,27
Total	42,42	42,99
20,00 kg/m³ de fibra de acero		
Material	Seco	Húmedo
	(kg) para 3 probetas	(kg) para 3 probetas
Agua	3,21	3,79
Cemento	8,46	8,46
Grava	17,83	17,83
Arena	12,65	12,65
Fibra	0,36	0,36
Total	42,51	43,08

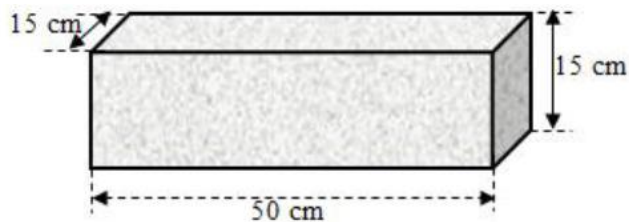
Continuación de la tabla anterior

25,00 kg/m ³ de fibra de acero		
Material	Seco	Húmedo
	(kg) para 3 probetas	(kg) para 3 probetas
Agua	3,21	3,79
Cemento	8,46	8,46
Grava	17,83	17,83
Arena	12,65	12,65
Fibra	0,45	0,45
Total	42,60	43,17
30,00 kg/m ³ de fibra de acero		
Material	Seco	Húmedo
	(kg) para 3 probetas	(kg) para 3 probetas
Agua	3,21	3,79
Cemento	8,46	8,46
Grava	17,83	17,83
Arena	12,65	12,65
Fibra	0,53	0,53
Total	42,68	43,26

Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Dosificación de hormigón para probetas prismáticas (vigas)

Figura 3.8: Dimensión de los moldes de vigas



Fuente: Elaboración propia

$$V = h * l * a$$

$$V = 0.01125 \text{ m}^3$$

3.4.2.1 Dosificación para 1 probeta prismática (viga) de hormigón

Vigas sin refuerzo de fibra

Tabla 3.22: Dosificación de vigas de hormigón sin refuerzo

0,00 kg/ m³ de fibra de acero		
Material	Seco	Húmedo
	(kg) para 1 viga	(kg) para 1 viga
Agua	2,27	2,68
Cemento	5,98	5,98
Grava	12,61	12,61
Arena	8,95	8,95
Total	29,82	30,23

Fuente: Elaboración propia

Vigas con refuerzo de fibra

Tabla 3.23: Dosificación de vigas de hormigón con refuerzo

10,00 kg/m³ de fibra de acero		
Material	Seco	Húmedo
	(kg) para 1 viga	(kg) para 1 viga
Agua	2,27	2,68
Cemento	5,98	5,98
Grava	12,61	12,61
Arena	8,95	8,95
Fibra	0,13	0,13
Total	29,95	30,35
15,00 kg/m³ de fibra de acero		
Material	Seco	Húmedo
	(kg) para 1 viga	(kg) para 1 viga
Agua	2,27	2,68
Cemento	5,98	5,98
Grava	12,61	12,61
Arena	8,95	8,95
Fibra	0,19	0,19
Total	30,01	30,42

Continuación de la tabla anterior:

20,00	kg/m³ de fibra de acero	
Material	Seco	Húmedo
	(kg) para 1 viga	(kg) para 1 viga
Agua	2,27	2,68
Cemento	5,98	5,98
Grava	12,61	12,61
Arena	8,95	8,95
Fibra	0,25	0,25
Total	30,08	30,48
25,00	kg/m³ de fibra de acero	
Material	Seco	Húmedo
	(kg) para 1 viga	(kg) para 1 viga
Agua	2,27	2,68
Cemento	5,98	5,98
Grava	12,61	12,61
Arena	8,95	8,95
Fibra	0,32	0,32
Total	30,14	30,54
30,00	kg/m³ de fibra de acero	
Material	Seco	Húmedo
	(kg) para 1 viga	(kg) para 1 viga
Agua	2,27	2,68
Cemento	5,98	5,98
Grava	12,61	12,61
Arena	8,95	8,95
Fibra	0,38	0,38
Total	30,20	30,61

Fuente: Elaboración propia

3.4.3 Vaciado del hormigón en moldes

Para empezar a elaborar las probetas Previamente se hizo el lavado y secado al horno de los agregados necesarios, después se los almaceno en un lugar donde no haya humedad ni suciedad. Hasta el momento del vaciado donde se procede a pesar todos los materiales necesarios de acuerdo a la dosificación hecha.

Figura 3.9: Materiales pesados previo al vaciado



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.10: Preparación de moldes para probetas cilíndricas y rectangulares



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11: Mezclado de hormigón



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.12: Cono de Abrams (asentamiento)



Fuente: Elaboración propia

Se hace la prueba de asentamiento para comprobar que la mezcla está en el rango de asentamiento deseado, si no lo está, hay que repetirla. En este caso se cumple con el asentamiento establecido. A medida que se aumentaba la cantidad de fibra de acero, aumentaba la consistencia al hormigón, pero se llegó a cumplir el asentamiento mínimo de 2,5 cm establecido al momento de realizar la dosificación.

Figura 3.13: Llenado de moldes de probetas cilíndricas



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.14: Llenado de moldes de probetas rectangulares



Fuente: Elaboración propia

3.4.4 Curado de probetas cilíndricas y rectangulares (vigas)

Luego de pasadas las 24 horas de fraguado del hormigón, se procede al curado de las probetas cilíndricas y prismáticas. El curado se realizará sumergiendo las probetas en una piscina de agua durante 28 días

Figura 3.15: Desmolde y curado de probetas



Fuente: Elaboración propia

Las características físicas de las vigas al momento de poner a curar y después de ser curadas mantenían el color y tenían un poco de porosidad, además de una textura lisa, la porosidad era más notoria al momento que se incrementaba la cantidad de fibra de acero.

3.4.5 Ensayo para determinar la resistencia a compresión del hormigón

El ensayo a compresión según norma ASTM C-39 se realiza cuando la probeta ya cumplió el tiempo de curado en la piscina, una vez cumplido el tiempo se saca de la piscina y se deja secando a temperatura ambiente, pasado las 24 horas de secado se procede a realizar el ensayo a compresión de la probeta.

3.4.5.1 Procedimiento y equipo para el ensayo

Para comenzar con el proceso del ensayo a compresión necesitamos algunos datos que se debe introducir a la máquina como ser: el peso, el diámetro, la altura, la edad en días a la que se está realizando el ensayo.

Una vez determinada las dimensiones y el peso de las probetas se procede como se aprecia en la Figura 3.16.

Figura 3.16: Pesado de probeta



Fuente: Elaboración propia

En cuanto al peso se notó un pequeño aumento un tanto uniforme a medida que se incrementaba la cantidad de fibra de acero, las probetas con una dosificación de 30 kg/m^3 eran ligeramente más pesadas que el resto de especímenes.

Figura 3.17: Ensayo a compresión

<p>Datos para iniciar el ensayo</p>	<p>Resultados del ensayo</p>
<p>Inicio del ensayo</p>	<p>Fin del ensayo</p>

Fuente: Elaboración propia (laboratorio de hormigón UAJMS)

3.4.5.2 Resultados de la resistencia a compresión

Tabla 3.24: Registro de valores de la resistencia a compresión del hormigón

N°	Fibra de acero (kg/m ³)	Fecha de Ensayo	Edad (días)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Masa (kg)	Carga (KN)	Resistencia a compresión	
									(MPa)	(kg/cm ²)
1	0,00	30/05/22	7	15,00	30,50	176,72	13,05	400,00	22,63	230,68
2		22/06/22	28	15,00	30,40	176,72	12,98	535,80	30,32	309,07
3		22/06/22	28	15,00	30,40	176,72	12,93	523,10	29,60	301,75
4		22/06/22	28	15,01	30,50	176,95	12,84	531,00	30,01	305,90
5		23/06/22	28	15,01	30,40	176,95	12,90	527,30	29,80	303,76
6		23/06/22	28	15,01	30,50	176,95	12,86	530,30	29,97	305,49
7		23/06/22	28	15,02	30,50	177,19	12,91	535,90	30,25	308,31
8	10,00	08/09/22	7	15,20	30,50	181,46	12,95	500,50	27,58	281,16
9		28/09/22	28	15,10	30,30	179,08	12,86	572,00	31,94	325,60
10		28/09/22	28	15,10	30,40	179,08	12,83	580,30	32,40	330,32
11		28/09/22	28	15,40	30,40	186,27	12,90	617,70	33,16	338,05
12		28/09/22	28	15,40	30,40	186,27	12,86	609,40	32,72	333,50
13	15,00	08/09/22	7	15,10	30,50	179,08	12,92	539,80	29,75	303,26
14		29/09/22	28	15,10	30,30	179,08	12,87	623,10	34,79	354,69
15		29/09/22	28	15,20	30,50	181,46	12,89	636,40	35,07	357,51
16		29/09/22	28	15,10	30,40	179,08	12,87	626,30	34,97	356,51
17		29/09/22	28	15,10	30,50	179,08	12,91	628,70	35,11	357,87
18	20,00	01/09/22	7	15,10	30,30	179,08	12,95	567,70	31,70	323,15
19		22/09/22	28	15,20	30,50	181,46	12,96	658,80	36,31	370,09
20		22/09/22	28	15,20	30,50	181,46	12,97	680,90	37,52	382,51
21		22/09/22	28	15,10	30,50	179,08	12,92	659,40	36,82	375,35
22		22/09/22	28	15,00	30,00	176,72	12,96	650,30	36,80	375,12
23	25,00	05/09/22	7	15,00	30,00	176,72	13,02	576,40	32,62	332,52
24		26/09/22	28	15,20	30,50	181,46	13,05	672,00	37,03	377,51
25		26/09/22	28	15,10	30,50	179,08	13,08	683,50	38,17	389,07
26		26/09/22	28	15,20	30,40	181,46	13,09	695,10	38,31	390,48
27		26/09/22	28	15,10	30,40	179,08	13,00	689,40	38,50	392,43
28	30,00	23/2/23	28	15,10	30,50	179,08	13,10	679,30	37,93	386,68
29		23/2/23	28	15,20	30,40	181,46	13,08	678,10	37,37	380,93
30		23/2/23	28	15,10	30,50	179,08	13,12	682,60	38,12	388,56

Fuente: Elaboración propia

3.4.6 Ensayo para determinar la resistencia a la flexión del hormigón

Este método de ensayo se hace para determinar la resistencia a la flexión del concreto según la norma ASTM C-78. Utilizando una viga simple con carga en los tercios medios y apoyos en sus extremos.

3.4.6.1 Procedimiento y equipo para el ensayo

Se hacen las vigas en moldes prismáticos con las dimensiones requeridas de (15 x 15 x 50) cm. Los moldes son metálicos, cada lateral longitudinal está unida con bisagras a la placa inferior y con mariposas a los laterales transversales, el molde se abre de los 4 lados y facilita sacar la viga.

Se desmoldan a las 24 horas, para hacer el curado durante 28 días. Tiempo en el cual se realizó el ensayo de las vigas, para determinar su resistencia a la flexión.

Las vigas se ensayaron en la prensa hidráulica que se dispone en el laboratorio de hormigón, en donde se acomodaron para aplicarles carga, se pusieron los apoyos a aproximadamente 2,5 cm de los bordes de la viga. La carga fue aplicada a L/3, como se aprecia en la Figura 3.18.

Figura 3.18: Colocado de viga en el soporte de ensayo a flexión



Fuente: Elaboración propia

Una vez determinada las dimensiones de la viga la secuencia de pasos se muestra a continuación.

Figura 3.19: Pesado de probeta



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.20: Ensayo a flexión

<p>Datos para iniciar el ensayo</p>	<p>Resultados del ensayo</p>
<p>Inicio del ensayo</p>	<p>Fin del ensayo</p>

Fuente: Elaboración propia (laboratorio de hormigón UAJMS)

3.4.6.2 Resultados de la resistencia a flexión

Tabla 3.25: Registro de valores de resistencia a la flexión del hormigón

Nº	Fibra de acero (kg/m ³)	Fecha de Ensayo	Edad (días)	L (cm)	a (cm)	h (cm)	Área (cm ²)	Peso (Kg)	Carga (KN)	Carga (Kg)	Resistencia a Flexión (MR)	
											(Mpa)	(Kg/cm ²)
1	0,00	01/07/22	7	50,20	15,10	15,10	76,00	26,78	29,20	2976,55	3,84	38,90
2		21/07/22	28	50,20	15,20	15,10	76,51	26,85	31,90	3251,78	4,17	42,22
3		22/07/22	28	50,00	15,20	15,00	76,00	26,78	31,20	3180,43	4,11	41,85
4		22/07/22	28	50,00	15,20	15,10	76,51	26,59	30,90	3149,85	4,04	40,90
5		22/07/22	28	50,00	15,20	15,10	76,51	26,81	31,70	3231,40	4,14	41,96
6	10,00	03/10/22	7	50,10	15,20	15,10	76,51	26,82	30,00	3058,10	3,92	39,71
7		03/10/22	28	50,10	15,20	15,10	76,51	26,82	33,00	3363,91	4,31	43,68
8		03/10/22	28	50,20	15,20	15,10	76,51	26,67	32,20	3282,36	4,21	42,62
9		04/10/22	28	50,10	15,20	15,10	76,51	26,78	32,50	3312,95	4,25	43,02
10		04/10/22	28	50,20	15,20	15,10	76,51	26,80	32,90	3353,72	4,30	43,55
11	15,00	08/10/22	7	50,20	15,20	15,10	76,51	26,91	30,90	3149,85	4,04	40,90
12		08/10/22	28	50,10	15,20	15,10	76,51	26,89	33,70	3435,27	4,40	44,60
13		10/10/22	28	50,20	15,20	15,10	76,51	26,80	33,50	3414,88	4,38	44,34
14		11/10/22	28	50,10	15,20	15,10	76,51	26,886	33,90	3455,66	4,43	44,87
15		12/10/22	28	50,20	15,20	15,10	76,51	26,873	33,70	3435,27	4,40	44,60
16	20,00	01/09/22	7	50,00	15,00	15,20	76,00	26,940	32,70	3333,33	4,30	43,28
17		22/09/22	28	50,10	15,20	15,10	76,51	27,59	35,40	3608,56	4,63	46,85
18		12/10/22	28	50,20	15,20	15,10	76,51	26,85	36,10	3679,92	4,72	47,78
19		12/10/22	28	50,20	15,20	15,10	76,51	26,87	34,40	3506,63	4,50	45,53
20		13/10/22	28	50,00	15,00	15,00	75,00	26,90	36,60	3730,89	4,88	49,75
21	25,00	08/09/22	7	50,20	15,00	15,20	76,00	27,35	35,10	3577,98	4,62	46,46
22		27/09/22	28	50,20	15,20	15,10	76,51	27,37	38,30	3904,18	5,01	50,69
23		09/10/22	28	50,20	15,20	15,10	76,51	27,40	39,50	4026,50	5,16	52,28
24		09/10/22	28	50,10	15,20	15,10	76,51	27,12	37,40	3812,44	4,89	49,50
25		10/10/22	28	50,10	15,20	15,00	76,00	27,10	38,90	3965,34	5,12	52,18
26	30,00	23/02/23	28	50,20	15,20	15,10	76,51	27,38	38,80	3955,15	5,07	51,35
27		23/02/23	28	50,10	15,20	15,10	76,51	27,47	39,54	4030,58	5,17	52,33
28		23/02/23	28	50,20	15,20	15,10	76,51	27,49	39,80	4057,08	5,20	52,68

Fuente: Elaboración propia

3.5 Análisis y comparación de resultados

Los resultados que fueron obtenidos mediante los ensayos a compresión y flexión se analizan y representan mediante las tablas a continuación, cada una de acuerdo a la dosificación establecida en la presente investigación, se hace el promedio de datos de las probetas de hormigón simple y hormigón fibroreforado estos resultados se grafican para observar el comportamiento de la gráfica media para cada dosificación. A través de estos resultados se realizan las respectivas observaciones del proyecto.

En el caso de las vigas, se calcula el módulo de rotura y la carga última que soportan estos elementos.

Tabla 3.26: Resultados de la resistencia a compresión del hormigón patrón

Número de muestra	Edad (días)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)
2	28	309,07
3	28	301,75
4	28	305,90
5	28	303,76
6	28	305,49
7	28	308,31
Resistencia promedio a 28 días		305,71

Fuente: Elaboración propia

3.5.1 Requisitos de aceptación de la resistencia a compresión del hormigón según la ACI-318R

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

2)

a) Cuando la resistencia especificada es 350 kg/cm² o menor, ningún resultado individual de resistencia puede estar por debajo de la resistencia especificada en más de 35 kg/cm².

b) Cuando la resistencia especificada es mayor 350 Kg/cm² ningún resultado individual de resistencia promedio de la resistencia de dos cilindros puede ser menor que el 90 % de la resistencia especificada.

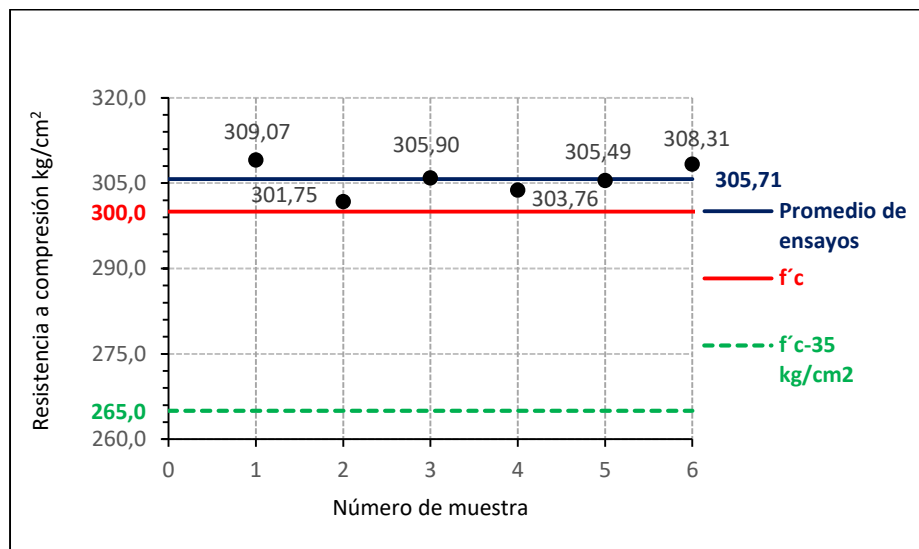
Tabla 3.27: Evaluación de la resistencia a compresión del hormigón (patrón) ACI 318- NTE INEN 1855

$f'c = 300,00 \text{ kg/cm}^2$ Límite de aceptación $n = 265,00 \text{ kg/cm}^2$

Ensayo N°	Fecha de Ensayo	Edad 28 días			Promedio	Rango	Criterios de aceptación	
		Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3			Prom.3 > $f'c$	Ensay. > $f'c - 35f'c$
1	22/06/22	309,07	301,75	305,90	305,572	7,33	si	si
2	23/06/22	303,76	305,49	308,31	305,855	1,73	si	si

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.21: Cumplimiento de los requisitos de resistencia a compresión



Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

De acuerdo a los resultados obtenidos se cumple con los dos requisitos de aceptación de la resistencia a compresión del hormigón, ningún ensayo promedio ni individual se encuentra por debajo de los límites establecidos como se aprecia en la Figura 3.21.

Este tipo de análisis nos sirve para garantizar la seguridad en el proyecto que se está ejecutando y tener alertas oportunas y tomar acción si fuese necesario.

En base a los criterios analizados anteriormente se logró obtener una resistencia promedio a compresión de buena calidad que cumple con las exigencias establecidas por la norma ACI 318R - NTE INEN 1855.

3.5.2 Requisitos de aceptación de la resistencia a flexión del hormigón según la ACI-318R

Tabla 3.28: Resultados de la resistencia a flexión del hormigón patrón

Número de muestra	Edad (días)	Resistencia a flexión (Kg/cm ²)
1	7	38,90
2	28	42,22
3	28	41,85
4	28	40,90
5	28	41,96
Resistencia promedio a 28 días		41,73

Fuente: Elaboración propia

- 1) El promedio aritmético de cualquiera de tres pruebas consecutivas es igual o superior al módulo de rotura especificado Mr.
- 2) Ningún resultado individual del ensayo de resistencia puede estar 5 kg/cm² por debajo del módulo de rotura especificado.

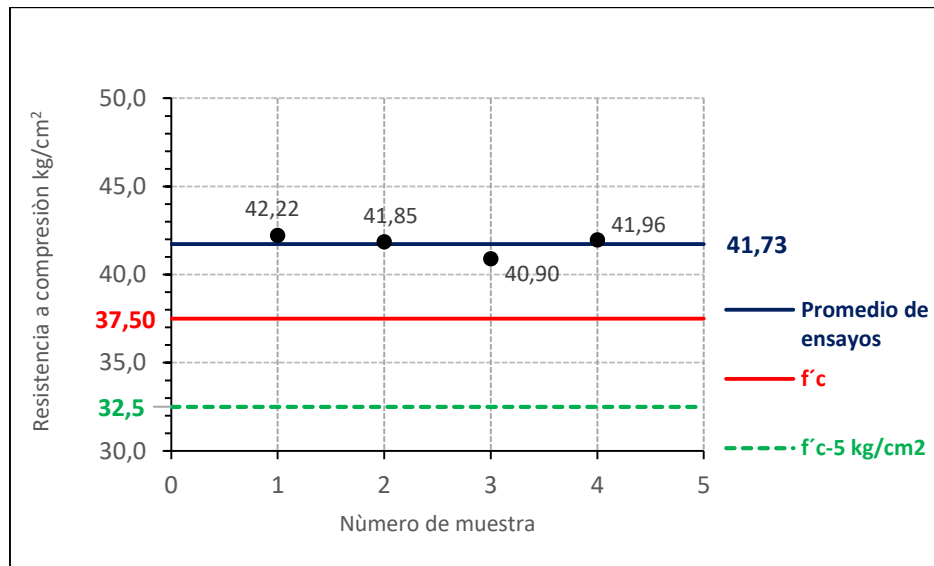
Tabla 3.29: Evaluación de la resistencia a flexión del hormigón (patrón) según ACI 318-NTE INEN 1855

$$f'c = 37,50 \text{ Kg/cm}^2 \quad \text{Límite de aceptación} = 32,50 \text{ Kg/cm}^2$$

Ensayo N°	Fecha de Ensayo	Edad 28 días		Promedio	Rango	Criterios de aceptación	
		viga 1	viga 2			Prom.2 > f'c	Ensay. > f'c - 35f'c
1	21/07/22	42,22	41,85	42,035	0,37	si	si
2	22/07/22	40,90	41,96	41,428	1,06	si	si

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.22: Cumplimiento de los requisitos de resistencia a flexión



Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

De acuerdo a los resultados obtenidos se cumple con los dos requisitos de aceptación de la resistencia a flexión del hormigón, ningún ensayo promedio ni individual se encuentra por debajo de los límites establecidos como se aprecia en la Figura 3.22.

En base a los criterios analizados anteriormente se establece que la resistencia a flexión del hormigón convencional es de buena calidad y cumple con los requisitos establecidos por la ACI 318R - NTE INEN 1855.

3.5.3 Objetivo de adicionar fibras a pesar el cumplimiento de las especificaciones técnicas

Los concretos utilizados en pavimentos deben cumplir con especificaciones técnicas en cuanto a la resistencia a la flexión y compresión. Pueden presentarse los siguientes casos:

Tabla 3.30: Caso del cumplimiento de las especificaciones técnicas del concreto

Caso	Descripción	Adición de aditivos
a)	Concreto con resistencias a flexión y compresión mayores a las especificaciones	No es necesario la incorporación de ningún aditivo
b)	Concreto con resistencias a flexión y compresión menores a las especificaciones	Adición de aditivos, como fibras de acero, que mejoran las resistencias hasta cumplir con las especificaciones
c)	Concreto con resistencias a flexión y compresión que cumplen las especificaciones, pero se requiere mejorar otras propiedades como la adherencia pasta-agregados para evitar la fisuración	Adición de fibras Dramix 3D para mejorar dichas propiedades

Fuente: Elaboración propia

El objetivo de adicionar fibras a pesar del cumplimiento de las especificaciones técnicas es mejorar la propiedad de adherencia pasta - agregados para evitar la fisuración.

Por ejemplo, en el caso del proyecto de la Carretera Nacional N-340 en España, la reducción del agrietamiento se evaluó mediante inspecciones visuales y mediciones de la longitud y ancho de las grietas a lo largo de varios años. De esta manera, se pudo determinar que la reducción de agrietamiento fue mucho menor en comparación con un pavimento de hormigón sin fibras de acero.

En otros casos, se pueden realizar ensayos específicos para evaluar la resistencia a la fisuración o al agrietamiento del pavimento, como el ensayo de flexión, realizando inspecciones visuales y comparar los resultados obtenidos con y sin el uso de fibras de acero.

En base a lo mencionado anteriormente se realizó la evaluación visual de fisuración a los ensayos de flexión en vigas con i sin refuerzo de fibra.

Todas las vigas de hormigón sin fibra durante el ensayo a flexión se fisuraron y seguidamente se partieron en 2 como se observa la Figura 3.23, produciéndose una falla explosiva al finalizar el ensayo.

Figura 3.23: Falla de la viga sin refuerzo de fibra



Fuente: Elaboración propia

En cambio las vigas de hormigón reforzado con fibras de acero al momento de finalizar el ensayo a flexión no permiten la rotura de la viga debido a que provoca un cosido interno de la estructura, solo se observa una pequeña fisura en la viga como se puede apreciar en la Figura 3.24.

Figura 3.24: Falla de la viga reforzada con fibra



Fuente: Elaboración propia

En base al anterior análisis se puede evidenciar como las fibras actúan ante la presencia de fisuras, evitando el desprendimiento de las partículas y miembros del hormigón.

Se concluye que la fibra de acero ayuda a mejorar la adherencia pasta – agregados para evitar la fisuración de la losa de pavimento rígido y aumentar su vida útil.

Por lo tanto si se usa las fibras de acero como refuerzo para el hormigón aplicado a pavimento rígidos no solo se conseguirá un aumento considerable en la resistencia a compresión y flexión, sino que también se podrá evitar o reducir la fisuración consiguiendo los beneficios mostrados en la Tabla 3.31.

Tabla 3.31: Beneficios al prevenir la fisuración en pavimentos rígidos:

Beneficio	Descripción
Mejora la durabilidad y prolonga la vida útil	Prevenir la fisuración mantiene la integridad estructural del pavimento, prolongando su vida útil y evitando costosas reparaciones y mantenimiento.
Ahorra costos a largo plazo	Prevenir la fisuración reduce la necesidad de reparaciones y mantenimiento costosos, lo que hace que el pavimento rígido sea una opción económica y rentable.
Mejora la seguridad vial	Prevenir la fisuración en el pavimento rígido reduce la posibilidad de accidentes de tráfico y mejora la seguridad vial.
Reduce el impacto ambiental	Prevenir la fisuración reduce la cantidad de residuos y emisiones de CO2 asociados con la eliminación de fisuras y el mantenimiento del pavimento.
Mejora la apariencia y la presentación	Prevenir la fisuración mantiene una apariencia atractiva y presentable del pavimento rígido, lo que mejora la imagen de la zona y aumenta su atractivo para los residentes y visitantes.

Fuente: Departamento de Transporte de Estados Unidos

A continuación también se puede mencionar otros que ofrece la adición de fibras de acero en algunos proyectos a nivel internacional.

Tabla 3.32: *Tiempo de evaluación de mejoras conseguidas en proyectos internacionales de pavimentos rígidos y hormigón mediante el uso de fibras de acero.*

Proyecto	Mejoras conseguidas	Fuente	Tiempo de evaluación
Carretera Nacional N-340, España	Reducción del agrietamiento y de la formación de baches en un 30%	Álvarez, J., Castro, J., & Perez, F. (2014). Análisis de la influencia de las fibras de acero en las propiedades del hormigón. DYNA, 81(185), 74-80.	A lo largo de varios años.
Aeropuerto Internacional de San Francisco, EE.UU.	Aumento de la resistencia al desgaste en un 40% y reducción del agrietamiento en un 50%	Wu, W., & Tia, M. (2007). Performance evaluation of fiber-reinforced concrete in airfield pavements. Journal of materials in civil engineering, 19(10), 859-866.	A lo largo de varios años.
Autopista Ruta 5, Chile	Reducción de agrietamiento y formación de baches en un 45% y aumento de la resistencia a la fatiga en un 35%	Quiroz, J., Gálvez, J. C., & Silva, C. A. (2019). Aplicación de fibras de acero en pavimentos de hormigón. Revista de Obras Públicas, 166(3599), 47-52.	6 meses
Parque Tecnológico de Andalucía, España	Reducción del agrietamiento en un 70% y aumento de la resistencia a la flexión en un 25%	García-Donas, J. G., & Díaz-López, Á. J. (2012). Aplicación de fibras de acero en la construcción de pavimentos. Informes de la Construcción, 64(526), e019.	9 meses
Proyecto de construcción de un centro comercial, Chile	Aumento de la resistencia a la flexión en un 50%	Cabrera, J. G., & Rojas, G. (2016). Aplicación de fibras de acero en hormigón para pavimentos industriales. Ingeniería en la Agricultura, 7(1), 13-22.	3 meses

Fuente: <https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/>

3.5.4 Análisis de resultados del hormigón endurecido con la inclusión de fibra de acero

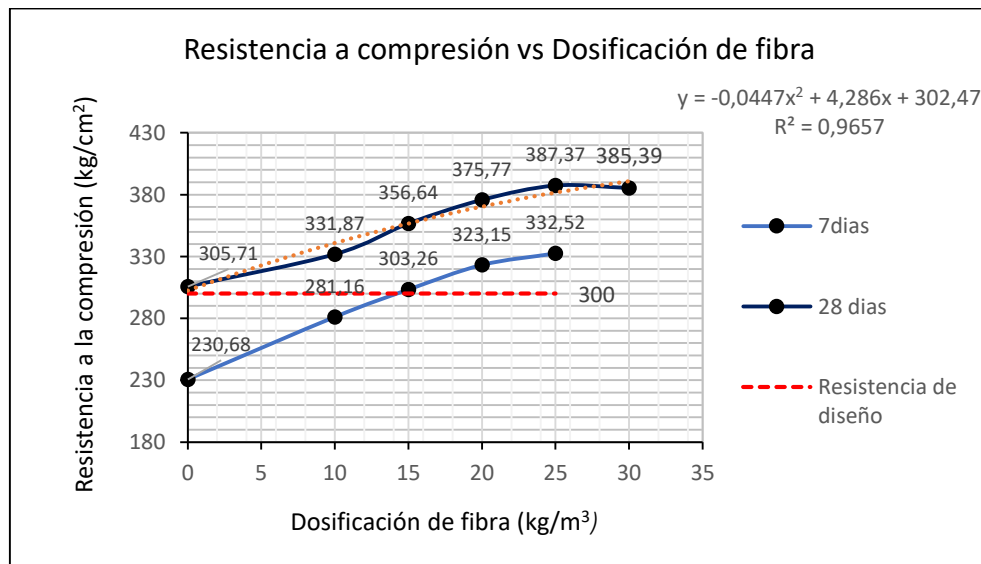
Resistencia a compresión

Tabla 3.33: Resumen de la resistencia a compresión del hormigón

Dosificación Fibra (Kg/m ³)	Resistencia a la compresión (Kg/cm ²)	
	7 días	28 días
0,00	230,68	305,71
10,00	281,16	331,87
15,00	303,26	356,64
20,00	323,15	375,77
25,00	332,52	387,37
30,00	-	385,39

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.25: Variación de la resistencia a rión vs Dosificación de fibra acero



Fuente: Elaboración propia

Observando los resultados de la Tabla 3.33. Se ve que la resistencia a compresión del hormigón patrón (0 kg de fibra de acero) llego a una resistencia promedio de 305,12 kg/cm², cumpliendo así con la resistencia de diseño de 300 kg/cm².

A partir de los resultados obtenidos se vuelve a confirmar que los agregados del Río La Victoria son aptos y cumplen con los requisitos establecidos para su uso en la elaboración de hormigón para pavimentos rígidos.

Se hace la comparación de resultados entre probetas cilíndricas sin refuerzo y probetas cilíndricas con refuerzo de fibras de acero, analizando la carga máxima permisible y el valor de la resistencia la compresión alcanzada.

Al hacer el anterior análisis, se notó que el hormigón con inclusión de fibra de acero alcanza el 85,40 % de la resistencia a compresión a la edad de 7 días, comparado con el hormigón patrón que llega al 75,60 % de su resistencia a compresión a los 7 días de edad. Lo cual se convierte en una ventaja más sobre el uso de la fibra de acero Dramix 3 D.

De acuerdo a la Figura 3.25, donde se ve el incremento de la resistencia del hormigón con inclusión de fibra de acero, se comprueba que la resistencia a compresión tiene un incremento de valores significativos. Además se denota claramente que las fibras favorecen a un mejor comportamiento en su deformación y absorción de esfuerzos.

Los valores del incremento de resistencia a compresión están representados en la Tabla 3.34.

Tabla 3.34: Incremento de la resistencia a compresión del hormigón con fibra

Dosificación Fibra de (Kg/m ³)	Resistencia a la compresión (Kg/cm ²)	Incremento	
		Absoluto (kg/cm ²)	Porcentaje (%)
0,00	305,12	0,00	0,00
10,00	331,87	26,75	8,77
15,00	356,64	51,52	16,89
20,00	375,77	70,64	23,15
25,00	387,37	82,25	26,96
30,00	385,39	79,67	26,06

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior se muestra el porcentaje de incremento de la resistencia a compresión para cada dosificación, ahí se ve claramente la correlación que existe al añadir fibras de acero a la mezcla, donde a mayor cantidad de fibra de acero mayor resistencia a compresión, llegando a obtener un 27% más de resistencia que el hormigón convencional para una dosificación de 25kg/m³. Equivalente a una resistencia a compresión máxima promedio de 387,27 kg/cm². A partir de ese punto para una dosificación de 30 kg/m³ la resistencia baja a 385,39 kg/cm².

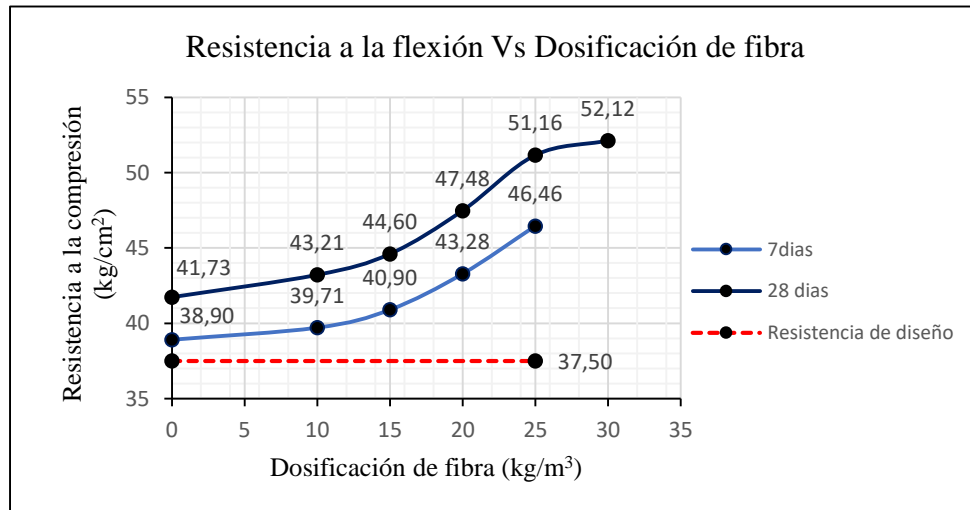
Resistencia a flexión

Tabla 3.35: Resumen de la resistencia a flexión del hormigón

Dosificación de fibra (Kg/m ³)	Resistencia a flexión (Kg/cm ²)	
	7 días	28 días
0	38,90	41,73
10	39,71	43,21
15	40,90	44,60
20	43,28	47,48
25	46,46	51,16
30	-	52,12

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.26: Variación de la resistencia a flexión vs Dosificación de fibra de acero



Fuente: Elaboración propia

Observando los resultados de la Tabla 3.35. La variación de resistencia en vigas sometidas a flexo - tracción dio buenos resultados, como se sabe esta resistencia está en el orden del 10 % al 15% de la resistencia a compresión, para esta investigación se asumió un valor medio de 12,5% entonces se puede ver en la Figura 3.26, que el hormigón patrón (0 kg/m³ de fibra de acero) llegó a una resistencia de 41,73 kg/cm² en vigas. Siendo un valor mayor a la resistencia de diseño que es 37,5 kg/cm².

Luego de analizar los resultados de la resistencia a flexión del hormigón patrón, se llega a alcanzar la resistencia de diseño y con ello se tiene el conocimiento necesario para afirmar que los resultados de la dosificación en proporciones de 1:1,50: 2,11. Es una dosificación adecuada y que todos los componentes del hormigón son aptos y cumplen con los requisitos para el uso en la elaboración del hormigón de pavimento rígido.

A partir de la resistencia del hormigón patrón, la resistencia a flexión va aumentando en forma gradual en función al incremento de la fibra de acero como se observa en la Figura 3.26.

A continuación se puede ver en la Tabla 3.36 el incremento de la resistencia a flexión del hormigón en porcentaje, respecto a la resistencia del hormigón patrón para cada dosificación establecida.

Tabla 3.36: Incremento de la resistencia a flexión con la inclusión de fibra de acero

Dosificación de fibra (kg/m ³)	Resistencia a la flexión (MR) (kg/cm ²)	Incremento	
		Absoluto (kg/cm ²)	Porcentaje (%)
0,00	41,73	0,00	0,00
10,00	43,21	1,48	3,60
15,00	44,60	2,87	6,90
20,00	47,48	5,75	13,80
25,00	51,16	9,43	22,60
30,00	52,12	10,39	24,90

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior se muestra el incremento de la resistencia a flexión en valor absoluto y en porcentaje para cada dosificación, ahí se ve claramente la correlación que existe al añadir fibras de acero a la mezcla, donde a mayor cantidad de fibra de acero mayor

resistencia a compresión, llegando a obtener un valor absoluto de 10,39 kg/cm² que corresponde a un 25% más de resistencia que el hormigón convencional para una dosificación de 30 kg/m³. Equivalente al módulo de rotura máximo promedio de 52,12 kg/cm².

3.5.5 Cálculo de la dosificación óptima a usar en una aplicación práctica

3.5.5.1 Dosificación óptima de fibra de acero basado en un análisis de la eficiencia en la resistencia a flexión

El estudio se realizó incorporando fibras de acero Dramix 3D en las siguientes dosificaciones: 10, 15, 20, 25 y 30 kg/m³ y en base a los resultados obtenidos se determinó el % óptimo a usar en una aplicación práctica.

La tabla siguiente muestra los resultados de la eficiencia en la resistencia a flexión (η MR), en función de la carga última que puede soportar obtenida de los ensayos realizados en concreto reforzado con fibras de acero, en función de la dosificación adicionada.

La eficiencia de la resistencia a flexión del concreto, viene dado por:

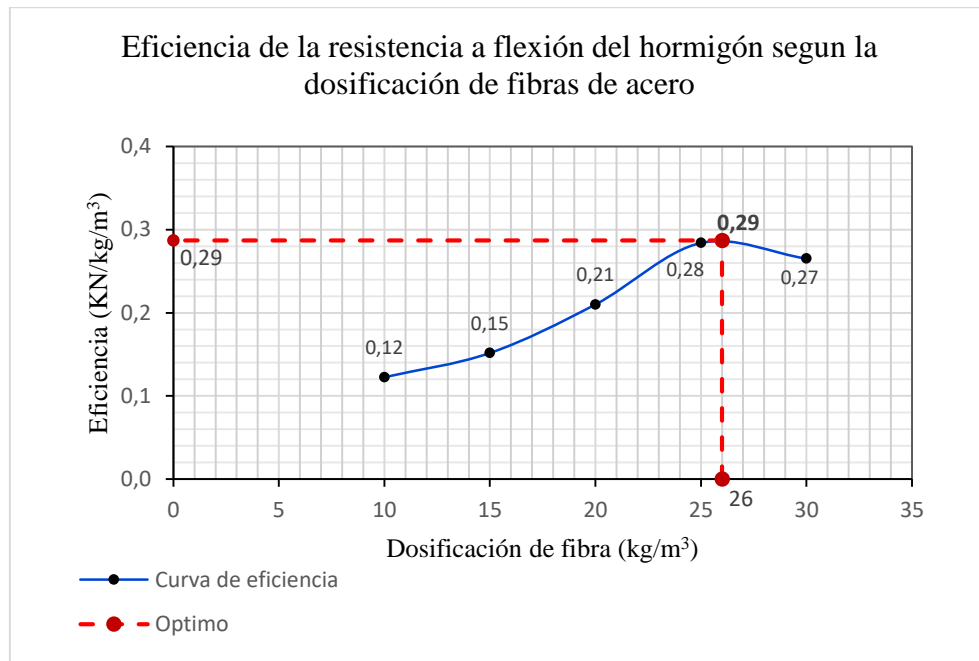
$$Eficiencia = \frac{carga\ absoluta}{dosificacion}$$

Tabla 3.37: Eficiencia del hormigón con fibras de acero

Dosificación de fibras de acero (Kg/m ³)	Resistencia a flexión (Kg/cm ²)	Carga última (KN)	Carga última absoluta (KN)	Eficiencia $\left(\frac{kN}{kg/m^3}\right)$
0,00	41,73	31,43	0,00	-
10,00	43,21	32,65	1,23	0,12
15,00	44,60	33,70	2,28	0,15
20,00	47,48	35,63	4,20	0,21
25,00	51,16	38,53	7,10	0,28
30,00	52,12	39,38	7,96	0,27

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.27: Eficiencia óptima de la resistencia a flexión



Fuente: Elaboración propia

En la tabla se muestra la eficiencia de un hormigón con fibras de acero a diferentes dosificaciones (expresadas en kg/m^3) y la carga última que puede soportar (expresada en kN).

La eficiencia se refiere a la relación entre la carga última absoluta (expresada en kN), y la dosificación de fibra (expresadas en kg/m^3).

- Al observar los valores de la eficiencia en la gráfica, se puede determinar que para una dosificación de fibras de acero de 26 kg/m^3 , se alcanza la máxima eficiencia de $0,29 \text{ (KN/kg/m}^3)$. A partir de ese punto eficiencia disminuye ligeramente a una dosificación de 30 kg/m^3 , aunque la carga última absoluta aumenta ligeramente.
- Es importante tener en cuenta que la dosificación óptima de fibras de acero puede variar según las especificaciones y condiciones específicas de cada proyecto. Por lo tanto, en esta investigación se recomienda una dosificación óptima de fibra de acero de 26 kg/m^3 , alcanzando así una resistencia promedio a la flexión aproximada de 52 kg/cm^2 .

3.5.5.2 Dosificación óptima de fibra de acero basado en un análisis de la resistencia a compresión

Para independizar los resultados de la resistencia a flexión del concreto, tomaremos como variable dependiente al incremento de la resistencia a compresión del concreto ($\Delta\% f'c$), el cual es adimensional, y dependerá solo de la dosificación de fibra.

La tabla que se muestra a continuación muestran los resultados del incremento porcentual en la resistencia a compresión ($\Delta\% f'c$) de los ensayos realizados con concreto reforzado con fibras de acero, en función de la dosificación de fibras de acero adicionada. El incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto, viene dado por:

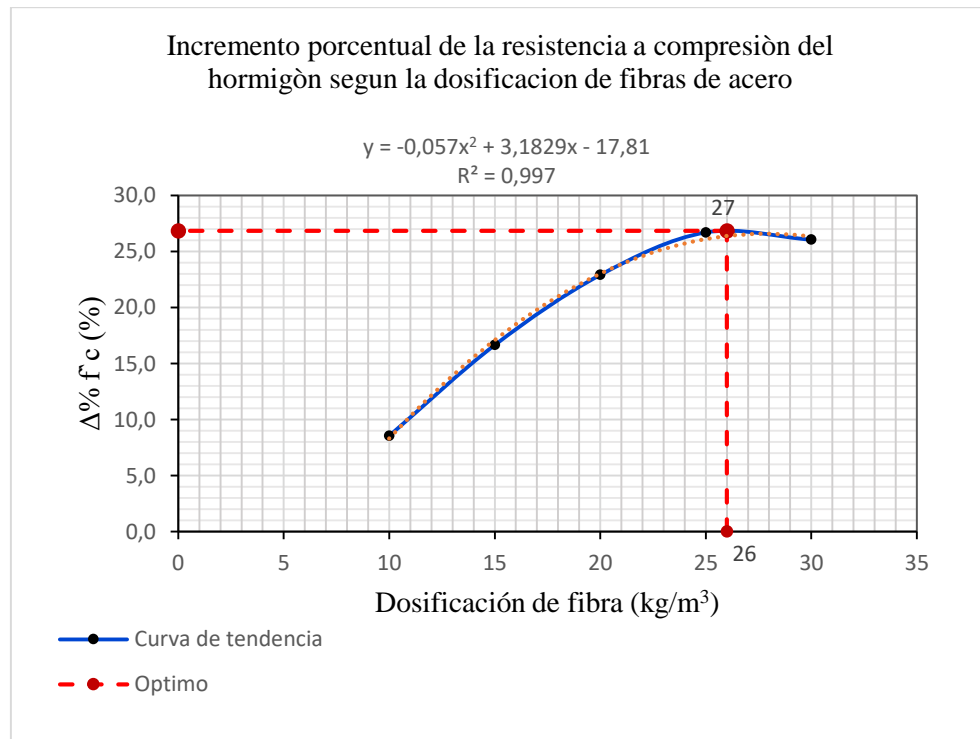
$$Eficiencia = \left(\frac{f'c \text{ concreto con fibras}}{f'c \text{ concreto sin fibras}} - 1 \right) \times 100$$

Tabla 3.38: Resultados del incremento porcentual en la resistencia a compresión

Dosificación de fibras de acero (Kg/m³)	f'c concreto sin fibras (Kg/cm²)	f'c concreto con fibras (Kg/cm²)	$\Delta\% f'c$
10,00	305,71	331,87	8,56
15,00	305,71	356,64	16,66
20,00	305,71	375,77	22,91
25,00	305,71	387,37	26,71
30,00	305,71	385,39	26,06

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.28: Dosificación óptima de fibra de fibra de acero



Fuente: Elaboración propia

Se procedió a generar una curva de tendencia o regresión al conjunto de resultados; obteniendo el siguiente resultado:

$$\Delta\% f'c = -0,057D^2 + 3,1829D - 17,81$$

El coeficiente de correlación $R = 0,997$ indica que existe una correlación muy alta entre la variable independiente “dosificación de fibra de acero” y la variable dependiente “incremento porcentual de la resistencia a compresión del concreto”, lo que puede evidenciarse con la función de regresión, que permite calcular el valor promedio del $\Delta\% f'c$ en función de los valores de la dosificación de fibra de acero.

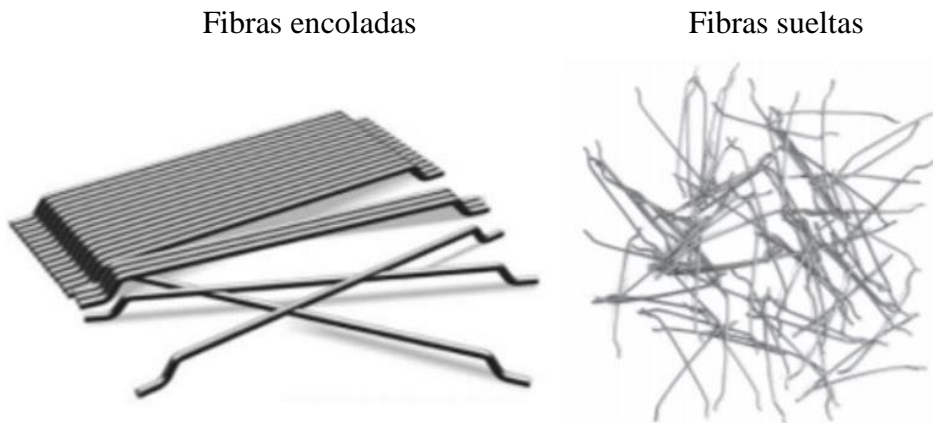
En base a lo desarrollado, se observó que:

- Existe una alta correlación entre el incremento porcentual de la resistencia a la flexión del concreto respecto a la dosificación de fibras de acero que se le adicione.

- El máximo incremento porcentual de la resistencia a compresión del concreto con fibras de acero será del 27 % como promedio, lo que se logra con dosificaciones de fibra de acero de 26 Kg/m³, alcanzando una resistencia promedio a la compresión de 388 kg/cm².
- La mínima dosificación de fibras de acero corresponderá con la sugerida por los fabricantes de este insumo, y que corresponde a 10 Kg/m³.
- La máxima dosificación de fibras de acero recomendada en esta investigación es de 26 Kg/m³, ya que valores superiores a esa dosificación ya no logran un mayor incremento porcentual en la resistencia a flexión del concreto.
- Dosificaciones de fibras de acero mayores a 26 Kg/m³, traen una reducción en el incremento porcentual de la resistencia a la flexión del concreto, la que puede ser explicada por problemas de trabajabilidad de la mezcla, así como por la formación de erizos de fibras que forman poros en la matriz del concreto.

3.5.6 Justificación el uso de la fibra (encolada y no encolada)

Figura 2.29: Fibras encoladas y sueltas de acero



Fuente: Maccaferri, (2017)

La fibra Dramix 3D encolada se utiliza en comparación con la fibra no encolada debido a varias ventajas:

- Mayor resistencia: Las fibras encoladas están mejor adheridas entre sí, lo que proporciona una mayor resistencia a la tracción y flexión.
- Mayor durabilidad: La encoladura de las fibras ayuda a protegerlas de la humedad y la corrosión, lo que aumenta la durabilidad del material.
- Fácil de mezclar: La mezcla de fibra encolada es más fácil de hacer y mezclar en comparación con la fibra suelta ya que se encuentra unida y no se dispersa.
- Mejor distribución: La fibra encolada se distribuye de manera más homogénea en la matriz de concreto, lo que proporciona una mejor distribución de las cargas y una mayor resistencia a la fisuración.

Figura 3.30: Distribución de la fibra de acero



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la distribución de la fibra durante se logró una mezcla homogénea en el hormigón ver Figura 3.30, debido a que la fibra empleada viene encolada y esto evita la formación de grumos o pelotas de fibras conocidas como erizos.

Para conseguir separar la viga con inclusión de fibra, y ver su distribución se tuvo que esforzar bastante por medio de golpes de la misma.

3.5.7 Justificación el uso del IP 30 en comparación con el IP 40

En general, el uso de cemento IP 30 en comparación con el IP 40 en Bolivia depende de las especificaciones y requerimientos del proyecto de construcción en cuestión.

Las justificaciones son las siguientes:

- El objeto de la presente investigación es evaluar las propiedades mecánicas del hormigón reforzado con fibras de acero Dramix 3 D, las cuales se verán reflejadas indistintamente si se usa el cemento IP 30 o el IP 40.
- La disponibilidad en el mercado local del cemento IP 30 está al alcance de cualquier persona, se lo consigue en cualquier ferretería. Mientras que el cemento IP 40 no se consigue fácilmente, y peor aún en pequeñas cantidades, además de ser más costoso que el cemento IP 30.
- En este caso, se está comparando el cemento IP 30 con el IP 40. Si bien es cierto que el IP 40 tiene una resistencia promedio a la compresión mayor que el IP 30, es importante tener en cuenta que la resistencia necesaria para un proyecto en particular puede variar según los requisitos específicos de la estructura.

Se justifica el uso del cemento IP 30 en comparación con el IP 40 en base varios proyectos de pavimentos rígidos ya realizados en el país mencionados en la tabla siguiente, los cuales tienen una resistencia de diseño a la compresión y a la flexión dentro del rango aceptable para el cemento IP 30.

Además que al elegir el cemento IP 30 para la investigación, se puede demostrar que es posible lograr un buen rendimiento y calidad en la construcción de pavimentos rígidos a un costo más bajo.

Tabla 3.39: Resistencia de diseño de obras de pavimento rígido

Proyecto	Resistencia a compresión kg/cm² a los 28 días	Resistencia a flexión kg/cm² a los 28 días
Construcción de pavimento rígido calle final José Antonio Tonelli. Gobierno Autónomo Municipal de Chuquisaca	210 Tipo A	37 a mayor
Contrato de rehabilitación y cumplimiento de estándares de la ruta 09 Santa Cruz - Trinidad - San Javier ABC	210 - 300 Tipo A - A1	37 a mayor
Conservación vial Camargo - El Puente - San Lorenzo - Tarija (Item: reemplazo de lozas) Administradora Boliviana de Carreteras	180 o mayor tipo B a mayor	30 a mayor
Conservación vial tramo Lp10: Viacha - Charaña Administradora Boliviana de Carreteras	180 a 300 tipo A - A1	37 a mayor
Conservación tramo Pt07 Kuchu Ingenio - Cotagaita Administradora Boliviana de Carreteras	210 tipo A a mayor	37 a mayor
Conservación tramo Pt11 Villazon Cañas - Límite departamental Potosí - Tarija Administradora Boliviana de Carreteras	210 tipo A a mayor	37 a mayor
Conservación tramo Pt08 Hornillos Tupiza Villazon / Hornillos Cotagaita Administradora Boliviana de Carreteras	210 tipo A a mayor	37 a mayor
Conservación tramo Potosí Uyuni Administradora Boliviana de Carreteras	210 tipo A a Mayor	37 a mayor
Mejoramiento vial de sectores puntuales el tramo Unduavi -Chulumani Administradora Boliviana de Carreteras	180 tipo B a mayor	30 a mayor

Fuente: Sistema de contrataciones estatales

3.5.8 Diseño de espesores para tráfico ligero, mediano y pesado, y subrasantes de diferentes resistencias (mala, buena y excelente)

Trafico

$$\text{Ligero} \quad 250 \quad \text{Veh/h} \longrightarrow \text{TPD} = \frac{250}{0,12} = 2083 \text{ veh/h}$$

$$\text{Mediano} \quad 800 \quad \text{Veh/h} \longrightarrow \text{TPD} = \frac{800}{0,12} = 6667 \text{ veh/h}$$

$$\text{Pesado} \quad 1600 \quad \text{Veh/h} \longrightarrow \text{TPD} = \frac{1600}{0,12} = 13333 \text{ veh/h}$$

Cálculo de los ejes equivalentes ESAL's (W18)

$$W18 = TPD * 365 * \left(1 + \frac{1}{100}\right)^n$$

$$\text{Ligero w18} = 2083 * 365 * \left(1 + \frac{5}{100}\right)^{20} = 2.017.289 \text{ (ESAL'S)}$$

$$\text{Mediano W18} = 6667 * 365 * \left(1 + \frac{5}{100}\right)^{20} = 6.456.681 \text{ (ESAL'S)}$$

$$\text{Pesado W18} = 13333 * 365 * \left(1 + \frac{5}{100}\right)^{20} = 12.912.393 \text{ (ESAL'S)}$$

Subrasante

Tabla 3.40: Calidad de la subrasante en función al CBR

Categoría	CBR (%)	Comportamiento como subrasante
S1	$CBR \leq 3$	Malo
S2	$3 < CBR \leq 5$	Regular
S3	$5 < CBR \leq 10$	Bueno
S4	$CBR > 10$	Excelente

Fuente: Elaboración propia

Valores de CBR asumidos en función a la calidad de la subrasante

Mala	→	CBR= 2,5 %
Buena	→	CBR= 7 %
Exelente	→	CBR= 12 %

Casos de diseño de espesores

Tabla 3.41: *Combinaciones del tipo de tráfico en función a la calidad de la subrasante*

Ligero – Mala	Mediano - Mala	Pesado - Mala
Ligero – Buena	Mediano – Buena	Pesado – Buena
Ligero - Excelente	Mediano - Excelente	Pesado - Excelente

Fuente: *Elaboración propia*

Ejemplo de cálculo (Ligero-Mala)

Entradas al programa:

- Confiabilidad (R)= 85%
- Desviacion Estandar (So)= 0,45
- Serviciabilidad inicial = 4,5
- Serviciabilidad final = 2,5
- Modulo de reaccion de la subrasante (K); $CBR = 2,5 \%$

$$K = 2,55 + 52,5(\text{Log CBR}) \quad \text{Mpa/m} \quad \rightarrow \quad \text{CBR} \leq 10$$

$$K = 46,0 + 9,08(\text{Log CBR})^{4,34} \quad \text{Mpa/m} \quad \rightarrow \quad \text{CBR} > 10$$

$$K= 23 \quad \frac{\text{Mpa}}{\text{m}} = 86 \text{ pci} \quad \rightarrow \quad \text{CBR} \leq 10$$

$$K= 46 \quad \frac{\text{Mpa}}{\text{m}} = 170 \text{ pci} \quad \rightarrow \quad \text{CBR} > 10$$

- Modulo de elasticidad del concreto (Ec)= $15100 \sqrt{f'_c}$

$$f'_c = 306 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$Ec = 264017 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 3755165 \text{ Psi}$$

- Modulo de rotura del concreto (Mr)= $42 \frac{kg}{cm^2} = 594 \text{ Psi}$
- Coeficiente de transmision de carga (J) = 3,2
- Coeficiente de drenaje (Cd)= 1,1
- Numero de ejes equivalentes (W18) = 2017289 (ESAL'S)

Para el cálculo del espesor de la losa se empleó La “Ecuación AASHTO 93”

Figura 3.31: Distribucion de la fibra de acero

The screenshot shows a software window titled "Ecuación AASHTO 93" with the following fields and values:

- Tipo de Pavimento:** Pavimento flexible, Pavimento rígido
- Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So):** 85 % Z_r=-1.037, So = 0.45
- Serviciabilidad inicial y final:** PSI inicial = 4.5, PSI final = 2.5
- Módulo de reacción de la subrasante:** k = 86 pci
- Información adicional para pavimentos rígidos:**
 - Módulo de elasticidad del concreto - E_c (psi) = 3755165
 - Módulo de rotura del concreto - S_c (psi) = 594
 - Coefficiente de transmisión de carga - (J) = 3.2
 - Coefficiente de drenaje - (Cd) = 1.1
- Tipo de Análisis:** Calcular D, Calcular W18. W18 = 2017289
- Espesor de losa (plg):** D = 8.1

Buttons: "Calcular" and "Salir"

Fuente: Ecuación AASHTO 93

- Espesor de la losa (D)= 8,1 Plg= **20,6 cm**

Tabla 3.42: Resultado del diseño de espesores para una dosificación de 0 kg/m^3

Casos	Espesor de la losa (D)	
	plg	cm
Ligero - Mala	8,1	20,6
Ligero - Buena	7,6	19,3
Ligero - Excelente	7,6	19,3
Mediano - Mala	9,7	24,6
Mediano - Buena	9,3	23,6
Mediano - Excelente	9,2	23,4
Pesado - Mala	10,8	27,4
Pesado - Buena	10,4	26,4
Pesado - Excelente	10,3	26,2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.43: Resultado del diseño de espesores para una dosificación de 10 kg/m^3

Casos	Espesor de la losa (D)	
	plg	cm
Ligero - Mala	7,9	20,1
Ligero - Buena	7,5	19,1
Ligero - Excelente	7,5	19,1
Mediano - Mala	9,5	24,1
Mediano - Buena	9,2	23,4
Mediano - Excelente	9,1	23,1
Pesado - Mala	10,6	26,9
Pesado - Buena	10,2	25,9
Pesado - Excelente	10,2	25,9

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.44: Resultado del diseño de espesores para una dosificación de 15 kg/m^3

Casos	Espesor de la losa (D)	
	plg	cm
Ligero - Mala	7,7	19,6
Ligero - Buena	7,4	18,8
Ligero - Excelente	7,3	18,5
Mediano - Mala	9,3	23,6
Mediano - Buena	9,1	23,1
Mediano - Excelente	8,9	22,6
Pesado - Mala	10,4	26,4
Pesado - Buena	10,1	25,7
Pesado - Excelente	10,0	25,4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.45: Resultado del diseño de espesores para una dosificación de 20 kg/m^3

Casos	Espesor de la losa (D)	
	plg	cm
Ligero - Mala	7,5	19,1
Ligero - Buena	7,2	18,3
Ligero - Excelente	7,0	17,8
Mediano - Mala	9,0	22,9
Mediano - Buena	8,8	22,4
Mediano - Excelente	8,6	21,8
Pesado - Mala	10,0	25,4
Pesado - Buena	9,8	24,9
Pesado - Excelente	9,7	24,6

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.46: Resultado del diseño de espesores para una dosificación de 25 kg/m^3

Casos	Espesor de la losa (D)	
	plg	cm
Ligero - Mala	7,2	18,3
Ligero - Buena	6,9	17,5
Ligero - Excelente	6,7	17,0
Mediano - Mala	8,7	22,1
Mediano - Buena	8,4	21,3
Mediano - Excelente	8,3	21,1
Pesado - Mala	9,7	24,6
Pesado - Buena	9,4	23,9
Pesado - Excelente	9,3	23,6

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.47: Resultado del diseño de espesores para una dosificación de 26 kg/m^3

Casos	Espesor de la losa (D)	
	plg	cm
Ligero - Mala	7,1	18,0
Ligero - Buena	6,8	17,3
Ligero- Excelente	6,7	17,0
Mediano -Mala	8,6	21,8
Mediano - Buena	8,4	21,3
Mediano - Excelente	8,2	20,8
Pesado -Mala	9,6	24,4
Pesado - Buena	9,4	23,9
Pesado - Excelente	9,2	23,4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.48: Resultado del diseño de espesores para una dosificación de 30 kg/m^3

Casos	Espesor de la losa (D)	
	plg	cm
Ligero - Mala	7,1	18,0
Ligero - Buena	6,8	17,3
Ligero - Excelente	6,6	16,8
Mediano - Mala	8,6	21,8
Mediano - Buena	8,3	21,1
Mediano - Excelente	8,2	20,8
Pesado - Mala	9,6	24,4
Pesado - Buena	9,3	23,6
Pesado - Excelente	9,2	23,4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.49: Resumen de resultados del diseño de espesores

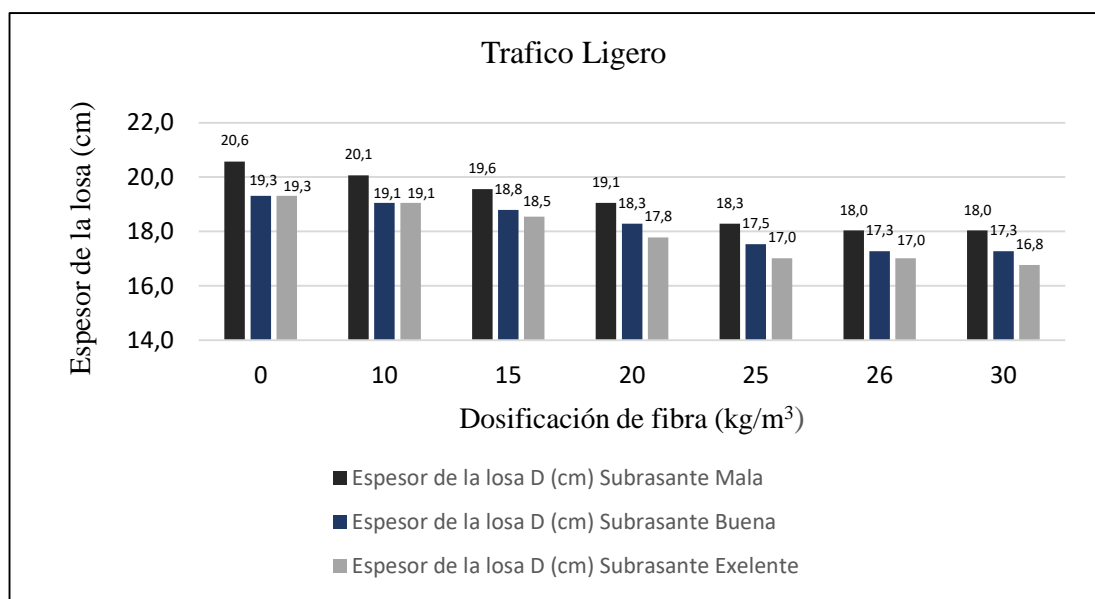
Dosificación de fibra (Kg/m^3)	Espesor de la losa D (cm)			
	Tráfico	Subrasante		
		Mala	Buena	Excelente
0,0	Ligero	20,6	19,3	19,3
10,0		20,1	19,1	19,1
15,0		19,6	18,8	18,5
20,0		19,1	18,3	17,8
25,0		18,3	17,5	17,0
26,0		18,0	17,3	17,0
30,0		18,0	17,3	16,8
0,0	Mediano	24,6	23,6	23,4
10,0		24,1	23,4	23,1
15,0		23,6	23,1	22,6
20,0		22,9	22,4	21,8
25,0		22,1	21,3	21,1
26,0		21,8	21,3	20,8
30,0		21,8	21,1	20,8

Dosificación de fibra (Kg/m ³)	Espesor de la losa D (cm)			
	Tráfico	Subrasante		
		Mala	Buena	Excelente
0,0	Pesado	27,4	26,4	26,2
10,0		26,9	25,9	25,9
15,0		26,4	25,7	25,4
20,0		25,4	24,9	24,6
25,0		24,6	23,9	23,6
26,0		24,4	23,9	23,4
30,0		24,4	23,6	23,4

Fuente: Elaboración propia

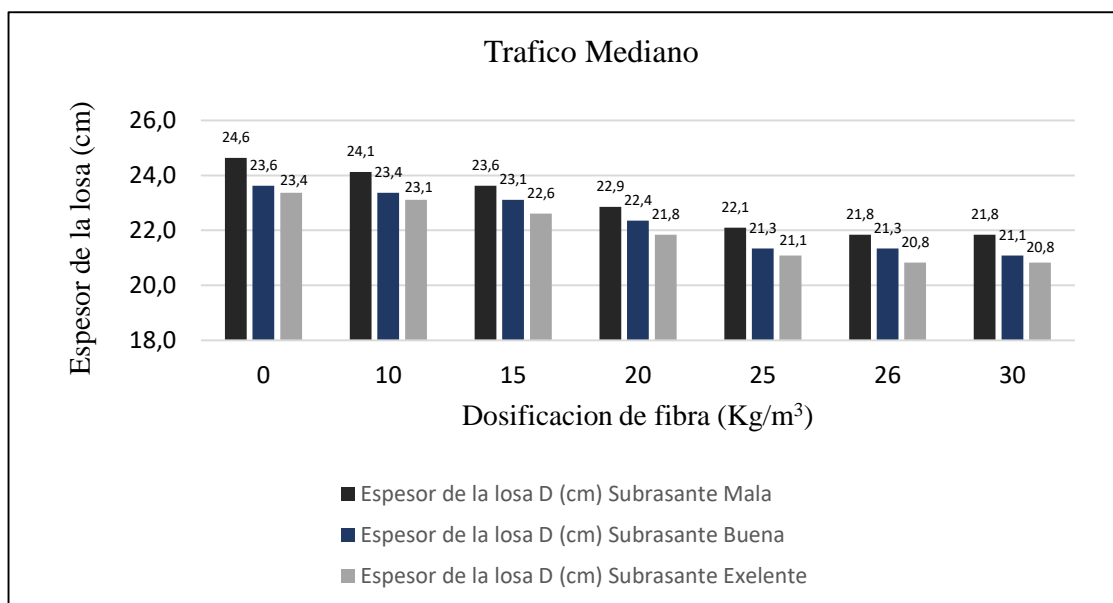
Graficas de los resultados obtenidos

Figura 3.32: Espesor de losa vs Dosificación de fibra (trafico ligero)



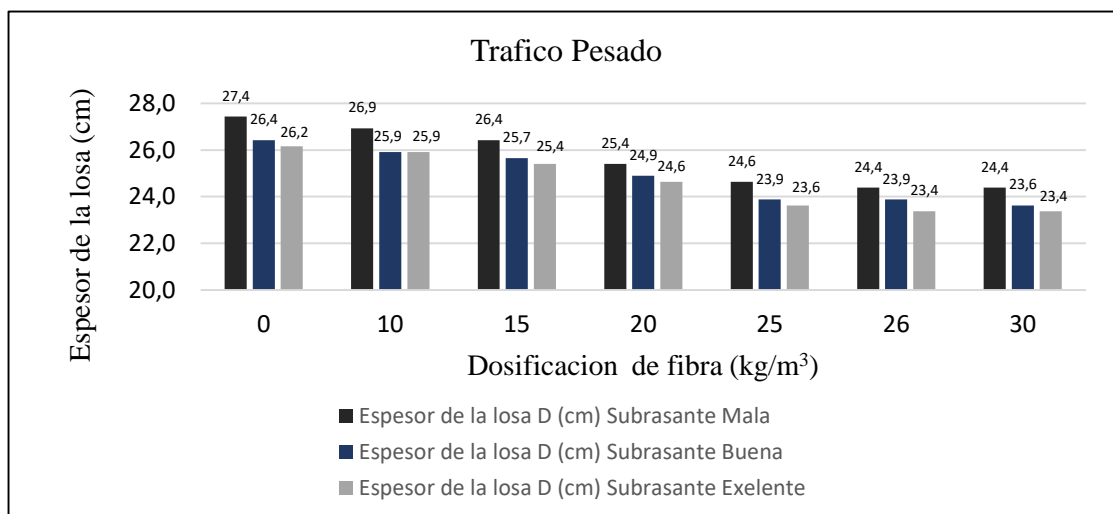
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.33: Espesor de losa vs Dosificación de fibra (tráfico mediano)



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.34: Espesor de losa vs Dosificación de fibra (tráfico pesado)



Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

Los anteriores gráficos muestran los resultados de las pruebas realizadas en diferentes dosificaciones de fibra y condiciones de subrasante y tráfico, y cómo afectan al espesor de la losa del pavimento. Podemos hacer algunas observaciones sobre cómo los diferentes factores que afectan el espesor de la losa del pavimento.

Primero, a medida que aumenta la dosificación de fibra, el espesor de la losa disminuye. Por ejemplo, en el caso de un tráfico "Ligero", cuando la dosificación de fibra es de 0 kg/m³, el espesor de la losa es de 20,6 cm, pero cuando la dosificación de fibra es de 26 kg/m³, el espesor de la losa disminuye a 18,0 cm. Esto sugiere que la adición de fibra puede reducir la cantidad de material necesario para construir el pavimento.

Segundo, la condición de la subrasante y el nivel de tráfico también influyen en el espesor de la losa del pavimento. Cuando la subrasante es mala o el tráfico es más pesado, se requiere un espesor mayor de losa para soportar el pavimento. Por ejemplo, para el caso de tráfico "Pesado", cuando la subrasante es mala y el tráfico es pesado, el espesor de la losa es de 27,4 cm, mientras que cuando la subrasante es excelente y el tráfico es pesado, el espesor de la losa es de sólo 23,4 cm.

Al analizar los resultados, se puede observar que para todas las combinaciones de tráfico y calidad de subrasante, el espesor de la losa disminuye cuando la dosificación de fibra aumenta de 26 a 30 kg/m³. Sin embargo, la disminución es muy pequeña, en general de sólo 0,2 cm. Además, para la mayoría de las combinaciones, el espesor de la losa para una dosificación de 30 kg/m³ es similar y la mayoría de las combinaciones igual al correspondiente valor para 26 kg/m³. Por lo tanto, se puede concluir que el aumento en la dosificación de fibra de 26 a 30 kg/m³ no tiene un efecto significativo en el espesor de la losa. Es por esta razón también que la dosificación óptima de fibra es de 26 Kg/m³.

En general, esta tabla proporciona información útil para ayudar a determinar la dosificación de fibra y el espesor de la losa necesaria para construir un pavimento que cumpla con los requisitos de la subrasante y el tráfico en diferentes situaciones.

3.5.9 Evaluación técnica, económica y ambiental del uso de la fibra.

La fibra de acero Dramix 3D es un material compuesto por fibras de acero de alta resistencia, diseñado para ser utilizado como refuerzo en hormigón. A continuación se presentará una evaluación técnica, económica y ambiental sobre el uso de esta fibra en construcciones.

Evaluación técnica: La fibra de acero Dramix 3D tiene una alta resistencia a la tracción, lo que la hace ideal para su uso en refuerzo de hormigón. Además, gracias a su forma tridimensional, se integra de forma efectiva en la estructura del hormigón, mejorando su resistencia al agrietamiento y su capacidad de soporte de carga.

En comparación con otros métodos de refuerzo de hormigón, como las barras de acero tradicionales, la fibra de acero Dramix 3D ofrece una mayor ductilidad y una mayor capacidad para resistir cargas dinámicas.

Evaluación económica: La fibra de acero Dramix 3D puede resultar más costosa que otros materiales de refuerzo de hormigón, como las barras de acero. Sin embargo, su uso puede reducir los costos generales de la construcción, ya que su aplicación es más rápida y sencilla, lo que reduce los costos de mano de obra y tiempo de construcción. Además, el uso de la fibra de acero Dramix 3D puede permitir la reducción del espesor del hormigón, lo que también puede reducir los costos de construcción.

Evaluación ambiental: El uso de la fibra de acero Dramix 3D en construcciones puede tener un impacto ambiental positivo, ya que reduce la cantidad de acero utilizado en la construcción y, por lo tanto, la cantidad de energía necesaria para producirlo. Además, al reducir el espesor del hormigón, se utiliza menos material en la construcción, lo que reduce la cantidad de recursos naturales utilizados y la cantidad de residuos generados.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que la producción de la fibra de acero Dramix 3D también requiere el uso de recursos naturales y energía, y que la eliminación de residuos de construcción y demolición sigue siendo un desafío importante.

CAPÍTULO IV
PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE
RESULTADOS

CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis estadístico

Para evaluar la calidad del hormigón del presente trabajo, se siguió los criterios del Comité ACI 214R. El mismo hace notar que las variaciones en la resistencia pueden ser evaluadas mediante un análisis estadístico, tomando en cuenta la desviación estándar y el coeficiente de variación, los cuales se pueden asociar al grado de control del concreto en el proyecto.

4.1.1 Análisis estadístico de las propiedades mecánicas del hormigón endurecido

Tabla 4.1: Valores de referencia de la desviación estándar para establecer la calidad del hormigón

Desviación estándar S para la población total			Coefficiente de variación V dentro de la prueba	Estándar de control de calidad
kg/cm ²	Mpa	psi	%	
Hasta 28	Hasta 2,8	Hasta 400	< 3,0	Excelente
28 a 35	2,8 a 3,4	400 a 500	3,0 a 4,0	Muy bueno
35 a 42	3,4 a 4,1	500 a 600	4,0 a 5,0	Bueno
42 a 49	4,1 a 4,8	600 a 700	5,0 a 6,0	Aceptable
> 49	> 4,8	> 700	> 6	Deficiente

Fuente: Comité ACI - 214R

4.1.1.1 Resultados del análisis estadístico

Tabla 4.2: Análisis estadístico de las propiedades del hormigón endurecido con 0 kg/m³ de fibra de acero

Variable	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Calidad del hormigón según ACI
Resis. Comp. (kg/cm ²)	305,71	305,69	0,00	2,74	0,90	Excelente
Resis. Flex. (Kg/cm ²)	41,73	41,90	0,00	0,58	1,38	Excelente

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.3: Análisis estadístico de las propiedades del hormigón endurecido con 10 kg/m³ de fibra de acero

Variable	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Calidad del hormigón según ACI
Resis. Comp. (kg/cm ²)	331,87	331,91	0,00	5,25	1,58	Excelente
Resis. Flex. (Kg/cm ²)	43,21	43,28	0,00	0,49	1,13	Excelente

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.4: Análisis estadístico de las propiedades del hormigón endurecido con 15 kg/m³ de fibra de acero

Variable	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Calidad del hormigón según ACI
Resis. Comp. (kg/cm ²)	356,64	357,01	0,00	1,43	0,40	Excelente
Resis. Flex. (Kg/cm ²)	44,60	44,60	44,60	0,22	0,48	Excelente

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.5: Análisis estadístico de las propiedades del hormigón endurecido con 20 kg/m³ de fibra de acero

Variable	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Calidad del hormigón según ACI
Resis. Comp. (kg/cm ²)	375,77	375,24	0,00	5,11	1,36	Excelente
Resis. Flex. (Kg/cm ²)	47,48	47,32	0,00	1,77	3,73	Muy bueno

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.6: Análisis estadístico de las propiedades del hormigón endurecido con 25 kg/m³ de fibra de acero

Variable	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Calidad del hormigón según ACI
Resis. Comp. (kg/cm ²)	387,37	389,78	0,00	6,72	1,73	Excelente
Resis. Flex. (Kg/cm ²)	51,16	51,43	0,00	1,32	2,59	Excelente

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.7: Análisis estadístico de las propiedades del hormigón endurecido con 30 kg/m³ de fibra de acero

Variable	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Calidad del hormigón según ACI
Resis. Comp. (kg/cm ²)	385,39	386,68	0,0	3,97	1,03	Excelente
Resis. Flex. (Kg/cm ²)	52,12	52,33	0,00	0,69	1,32	Excelente

Fuente: Elaboración propia

En el presente trabajo se utilizará la media aritmética en todos los casos para el análisis de resultados de las propiedades mecánicas del hormigón.

Interpretación:

Del análisis estadístico obtenido se puede observar que los resultados de la desviación estándar son muy buenos; los cuales están dentro del rango de muy bueno y excelente calidad del hormigón de acuerdo a los valores de referencia que se tomaron de la norma ACI 214R.

4.2 Prueba de hipótesis

La prueba de hipótesis también llamada hipótesis estadísticas derivadas se refiere a dar un valor de veracidad o falsedad de la hipótesis planteada en una investigación mediante los resultados obtenidos.

Se sigue los siguientes pasos:

- a. Determinar la normalidad de datos
- b. Formular la hipótesis del problema
- c. Aplicar el estadístico adecuado
- d. Interpretar los resultados
- c. Conclusión estadística considerando la variable

4.2.1 Determinar la normalidad de datos

Tabla 4.8: Resumen de resistencias obtenidas

N°	Resistencia a compresión (Kg/cm ²)	Módulo de rotura (Kg/cm ²)
1	325,60	43,68
2	330,32	42,62
3	338,05	43,02
4	333,50	43,55
5	354,69	44,60
6	357,51	44,34
7	356,51	44,87
8	357,87	44,60
9	370,09	46,85
10	382,51	47,78
11	375,35	45,53
12	375,12	49,75
13	377,51	50,69
14	389,07	52,28
15	390,48	49,50
16	392,43	52,18
17	386,68	51,35
18	380,93	52,33
19	388,56	52,68

Fuente: Elaboración propia

Supuesto de normalidad

Paso 1: Plantear hipótesis de normalidad

Ho = Los datos siguen la distribución normal

H1 = Los datos no siguen la distribución normal

Paso 2: Nivel de significancia

NC = 0,95

$\alpha = 0,05$

$\alpha / 2 = 0,025$

Paso 3: Test de normalidad

Si $n > 50$ se aplica Smirnov - Kolmogorov

Si $n > 50$ se aplica Shapiro - Wilk

- Como la muestra es menor a 50 datos se usa el test de normalidad de Shapiro - Wilk

Figura 4.1: Resultados de la prueba de normalidad

Resumen de procesamiento de casos						
	Válido		Casos Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Resistencia a compresion	19	100,0%	0	0,0%	19	100,0%
Resistencia a traccion	19	100,0%	0	0,0%	19	100,0%

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Resistencia a compresion	,148	19	,200*	,903	19	,054
Resistencia a traccion	,182	19	,099	,903	19	,056

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.
a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: Programa SPSS Statistics

Paso 4: Criterio de decisión

$$\begin{matrix} 0,054 \geq \\ 0,056 \geq \end{matrix} \left\{ \begin{matrix} 0,05 \text{ se acepta la } H_0 \text{ y se rechaza la } H_1 \end{matrix} \right.$$

Paso 5: Resultado y conclusión

Como el p valor es mayor que la significancia no tengo evidencia para rechazar la H_0

Conclusión: Los datos se ajustan a la ley Normal.

Hipótesis del problema

Paso 1: Plantear hipótesis del problema

Hipótesis nula H_0 = La fibra de acero no tiene efecto en la variación de la resistencia a compresión y flexión: $\mu = 300\text{kg/cm}^2; 30\text{kg/cm}^2$

Hipótesis alterna H_1 = La fibra de acero tiene efecto en la variación de la resistencia a compresión y flexión: $\mu \neq 300\text{kg/cm}^2; 30\text{kg/cm}^2$

Paso 2: Nivel de significancia

$$NC = 0,95$$

$$\alpha = 0,05$$

$$\alpha / 2 = 0,025$$

Paso 3: Prueba estadística

Si $n > 30$ se aplica la distribución normal

Si $n < 30$ se aplica t - Student

• Como $n < 30$ datos de aplica t - Student

4.2.1.1 Prueba de hipótesis t de Student

Resistencia a compresión	Resistencia a flexión
--------------------------	-----------------------

Datos:

$$\bar{x}_1 = 366,46$$

$$n_1 = 19,00$$

$$s_1 = 21,95$$

$$s_1^2 = 481,99$$

$$\mu_1 = 300,00$$

Datos:

$$\bar{x}_2 = 47,48$$

$$n_2 = 19,00$$

$$s_2 = 3,66$$

$$s_2^2 = 13,14$$

$$\mu_2 = 37,50$$

A continuación es necesario verificar el supuesto de varianza.

Prueba de razón de varianza

Estadístico de prueba $F = \frac{s_1}{s_2} = 6,00$

$$p\text{-valor} = 0,00020$$

$$0,00009 < \lceil 0,05 \text{ se rechaza la } H_0$$

Conclusión: No se asumen varianzas iguales

A continuación se emplean las expresiones cuando no se asumen varianzas iguales:

Grados de libertad

$$v = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{(s_1^2/n_1)^2}{n_1 - 1} + \frac{(s_2^2/n_2)^2}{n_2 - 1}}$$

$$v = 21,31$$

$$v = 21,00$$

Estadístico de prueba t teórico

$$t_{\alpha/2} = 2,08$$

Estadístico de prueba o t experimental

$$t_c = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

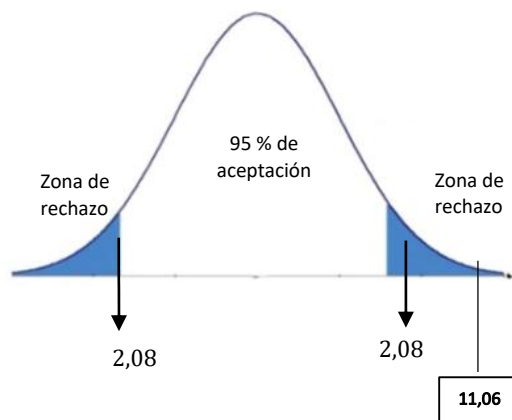
$$t_c = 11,06$$

P valor

$$p\text{-valor} = 0,000000028$$

Paso 4: Criterio de decisión

En función a t 11,06 > 2,08
En función a p valor 0,000000028 < 0,05 } se rechaza la H₀



Paso 5: Resultado y conclusión

- El t_c cae en la zona de rechazo, entonces se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna
- El p valor es menor que la significancia se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna

Conclusión: La fibra de acero tiene efecto en la variación de la resistencia a compresión y flexión en el hormigón.

4.3 Especificación técnica

Las especificaciones técnicas son los documentos en los cuales se definen las normas, exigencias y procedimientos a ser empleados y aplicados en todos los trabajos de construcción de obras, elaboración de estudios, fabricación de equipos.

En el caso de la realización de estudios o construcción de obras, éstas forman parte integral del proyecto y complementan lo indicado en los planos respectivos y en el contrato. Son muy importantes para definir la calidad de los trabajos en general y de los acabados en particular.

4.3.1 Especificación técnica del pavimento rígido

a) Definición

Pavimento de concreto.- Es un pavimento rígido, de concreto de cemento hidráulico, con o sin refuerzo, que se diseña y construye para resistir las cargas o como indiquen los planos.

b) Descripción

Este trabajo consiste en la construcción sobre sub rasante, y base preparada y aceptada previamente, de la losa de pavimento de concreto, de acuerdo con los planos, incluyendo la fabricación y el manejo, colocación, compactación, acabado, curado y protección del concreto de acuerdo con lo indicado en estas especificaciones, ajustándose a los alineamientos horizontal y vertical, espesores y secciones típicas de pavimentación, dentro de las medidas y tolerancias estipuladas, de conformidad con estas especificaciones, disposiciones especiales y/o planos del proyecto.

c) Materiales

Los materiales para pavimentos de concreto de cemento hidráulico, deben llenar los requisitos siguientes:

Cementos hidráulicos.- Estos cementos deben cumplir con una clase de resistencia de 28 MPa (4,000 psi, 280 kg/cm²) o mayor.

Agregado fino.- Debe consistir en arena natural o manufacturada, compuesta de partículas duras y durables, que llene los requisitos sobre cantidad de finos allí estipuladas. El agregado fino debe ser almacenado separadamente del agregado grueso, en pilas independientes para las diversas procedencias, debiéndose controlar sus características y condiciones por medio de ensayos de laboratorio, para hacer los ajustes en la dosificación, en el momento de la elaboración del concreto.

Agregado grueso.- Debe consistir en grava o piedra trituradas, trituradas parcialmente o sin triturar, procesadas adecuadamente para formar un agregado clasificado, que llene los requisitos de desgaste o abrasión y la limitación de partículas planas y alargadas.

Agua.- El agua para mezclado y curado del concreto o lavado de agregados debe ser preferentemente potable, limpia y libre de cantidades perjudiciales de aceite, ácidos, álcalis, azúcar, sales como cloruros o sulfatos, material orgánico y otras sustancias que puedan ser nocivas al concreto o al acero. El agua proveniente de abastecimientos o sistemas de distribución de agua potable puede usarse sin ensayos previos.

Fibra de acero.- Contratista deberá suministrar resultados de medición de resistencia residual conforme a la norma ASTM C-1609. Se establece el valor de 0,9 MPa como resistencia residual mínima a obtener.

Las fibras tendrán la designación según la norma ASTM C-1116. Serán formadas por monofilamentos con una longitud mínima de 50 mm y una longitud máxima de 63 mm y tendrán una relación de aspecto máxima (longitud dividida entre el diámetro equivalente de la fibra) de 150.

La cantidad de fibra de acero agregada al hormigón deberá ser suficiente para obtener una resistencia residual (R150, 3) del 20% de la resistencia establecida en el proyecto (0,9 MPa), medida en vigas de acuerdo a la norma ASTM C-1609, para una deformación máxima de 3 mm. Alternativamente se podrá aceptar el valor equivalente de ductilidad medido de acuerdo a la norma ASTM C-1399.

La dosificación de la fibra de acero será como mínimo de 10 kg/m^3 pero no superará los 26 kg/m^3 , a menos que el contratista pueda demostrar en una prueba en obra que la mezcla del hormigón es viable y no se produce aglutinación de las macro fibras.

Procedimiento de la puesta en obra de la fibra usada

La puesta en obra de la fibra de acero Dramix 3D no requiere de mano de obra calificada y el procedimiento para su aplicación se describe a continuación:

- Preparación del terreno: Antes de empezar a instalar la fibra de acero, se debe asegurar que la superficie de trabajo está limpia, libre de obstáculos y nivelada.
- Mezcla del concreto: Se debe mezclar el concreto siguiendo las especificaciones del fabricante y asegurarse de que esté bien mezclado antes de añadir la fibra de acero.
- Adición de la fibra: Se debe añadir la fibra de acero Dramix 3D a la mezcla de concreto y mezclar de manera uniforme para asegurar una distribución adecuada de las fibras en el concreto fresco.
- Colocación del concreto: Se debe colocar el concreto fresco en el lugar deseado y nivelarlo para asegurar una superficie plana.
- Compactación del concreto: Se debe compactar el concreto fresco utilizando un vibrador de concreto para asegurar una buena densidad y una adecuada distribución de las fibras de acero.
- Secado: Se debe permitir que el concreto se seque adecuadamente antes de continuar con cualquier otra actividad.
- Verificación de la calidad: Finalmente, se debe verificar la calidad de la instalación y asegurarse de que el concreto cumpla con las especificaciones del fabricante y los requisitos del proyecto.

Es importante seguir estos pasos y especificaciones para asegurar una aplicación de calidad y garantizar la eficacia de la fibra de acero Dramix 3D en el concreto.

Aditivos.- El aditivo que se utilizará para el concreto será empleado, con la aprobación previa del Supervisor y de acuerdo a las instrucciones del fabricante. Debe demostrarse que el aditivo es capaz de mantener esencialmente la misma composición y rendimiento del concreto de la mezcla básica. Previa a la autorización del uso de aditivos, el contratista deberá realizar mezclas de pruebas de campo, utilizando los materiales y equipo a emplear en el proyecto u obra. Si se emplea más de un aditivo, debe cuidarse de que los efectos deseables de cada uno se realicen y no interfieran entre sí. Cuando se empleen aditivos acelerones en tiempo caluroso, deben tomarse las precauciones necesarias para evitar un fraguado del concreto.

Requisitos para la clase y resistencia del concreto

El concreto de cemento hidráulico para pavimentos, debe ser como mínimo clase 28 (4,000 psi o 245 kg/cm²) con una resistencia a compresión AASHTO T -22 (ASTM C-39), promedio mínima de 28 MPa (4,000 psi o 28 kg/cm²) y una resistencia a la flexión AASHTO T-97 (ASTM C-78), promedio mínima de 4,2 MPa (600 psi o 42,2 kg/cm²), determinadas sobre especímenes preparados según AASHTO T-126 (ASTM C-192) y AASHTO T-23 (ASTM C-31), ensayados a los 28 días.

Tabla 4.9: Composición del concreto de cemento hidráulico para pavimentos

Relación agua cemento máx.	Temperatura del concreto	Asentamiento AASHTO T - 119	Tamaños agregados AASHTO M - 43	Resistencia a la compresión AASTHO T-22	Resistencia a la flexión AASHTO T- 97
0,38	20 ± 10 °C	20 - 40 mm	Nro. 57 o 67	28 Mpa	4,2 Mpa

Fuente: Elaboración propia

Estas especificaciones se refieren al hormigón de cemento Portland, para la losa de hormigón de pavimento rígido. Requisitos de construcción.

a) Equipo para pavimentación

El Contratista debe suministrar el equipo adecuado al procedimiento de construcción previsto. El equipo propuesto debe ser inspeccionado y/o ensayado y aprobado previamente por el supervisor.

Procedimiento de formaleta deslizante.- Debe consistir en pavimentadoras o terminadoras autopropulsadas, capaces de extender, consolidar, enrasar y acabar el concreto fresco

colocado frente a ellas, en una sola pasada completa de la máquina, de modo que se requiera un mínimo de acabado manual, para proporcionar un pavimento denso y homogéneo.

b) Colocación y compactación del concreto

Acondicionamiento de la superficie.- Las losas de concreto deben ser construidas sobre la superficie de la sub - rasante, sub-base o base, previamente preparadas, de conformidad con las Especificaciones Generales.

c) Acabado, texturizado y ranurado del concreto. Texturizado y ranurado utilizando pavimentadora de formaleta deslizante.-

Inmediatamente detrás de la alisadora o llana mecánica de la pavimentadora, y una vez el concreto está próximo a perder el brillo se procede al texturizado y ranurado según se describe en las Especificaciones Generales

Texturizado y ranurado utilizando formaletas fijas.- Debe hacerse preferentemente con un carro o marco texturizador o ranurador como los indicados para la pavimentadora deslizante. En zonas pequeñas e irregulares donde esto no sea factible tanto el texturizado fino longitudinal como el texturizado grueso o ranurado transversal pueden hacerse manualmente con ayuda de rastrillos o escobas adecuados.

d) Alisado

Después del enrasado y nivelado indicados, la superficie debe ser uniformizada, alisándola transversal o longitudinalmente, o en ambos sentidos, por medio de una llana o flotador de tipo adecuado.

De preferencia, el alisado se debe ejecutar en el sentido longitudinal, excepto en los lugares en los que esta forma no sea factible. El alisado puede ser efectuado manualmente o por máquinas alisadoras que produzcan resultados equivalentes.

Alisado longitudinal La llana o flotador de tipo longitudinal, operado desde un andamio, debe ser aplicado con un movimiento de aserrado, conservándolo en posición paralela al eje de la vía y desplazándolo gradualmente de un lado al otro del pavimento. La llana o flotador debe moverse hacia adelante, la mitad de su longitud y la operación se repite hacia atrás.

Alisado transversal La llana o flotador transversal debe ser operado a lo ancho del pavimento, principiando en uno de sus bordes, moviéndolo gradualmente hasta el centro y regresándolo de nuevo al borde. El flotador se debe mover luego hacia adelante y a la

mitad de su longitud y la operación se debe repetir. Se debe poner cuidado especial en no remodelar la sección transversal del pavimento.

e) Medida

La medida se debe hacer del número de metros cuadrados, con aproximación de dos decimales, medidos, ya colocados en su posición final, satisfactoriamente contruidos y aceptados de acuerdo a estas especificaciones, disposiciones especiales y planos correspondientes.

El área se debe determinar por procedimientos analíticos. El ancho y la longitud. No se harán descuentos por el volumen del acero de refuerzo ni por material de juntas.

f) Pago

El pago se debe hacer por el número de metros cuadrados, medidos como se indica en satisfactoriamente contruidos y aceptados como lo establecen los planos, estas especificaciones y disposiciones especiales, al precio unitario de contrato, correspondiente a pavimento de concreto.

No se reconoce ningún pago adicional por la eliminación de la capa vegetal, materia orgánica, material inadecuado, caminos de acceso y obras complementarias.

4.4 Análisis de costos

Tabla 4.10: Precio unitario de hormigón simple H30 con 0 kg/m³ de fibra de acero.

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				
DATOS GENERALES				
Proyecto: Proyecto de grado Actividad: Carpeta de hormigón simple (sin fibra de acero) Cantidad: 1 Unidad: m ³ Moneda: Bolivianos				
1, MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Cemento portland	Kg	475,000	475,000
2	Grava	m ³	0,620	77,500
3	Arena	m ³	0,450	60,750
4	Fibra de acero	Kg	0,000	0,000
TOTAL MATERIALES				613,250
2, MANO DE OBRA				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Albañil	hr	8,000	36,528
2	Ayudante	hr	8,000	48,704
SUBTOTAL MANO DE OBRA				85,232
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% AL 71,18%)			66,000	56,253
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (% DE SUMA DE SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGAS SOCIALES)			14,940	21,138
TOTAL MANO DE OBRA				162,623
3, EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Mezcladora	hr	4,000	44,000
2	Vibradora	hr	4,000	21,000
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)			7,000	11,384
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				76,384
4, GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				
GASTOS GENERALES = (% DE 1 + 2 + 3)			15,000	127,838
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				127,838
5, UTILIDAD				
				COSTO TOTAL
UTILIDAD = (% DE 1 + 2 + 3 + 4)			10,000	98,010
TOTAL UTILIDAD				98,010
6, IMPUESTOS				
				COSTO TOTAL
IMPUESTOS IT = (% DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5)			3,090	33,313
TOTAL IMPUESTOS				33,313
TOTAL PRECIO UNITARIO (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)				1111,418
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (Con dos (2) decimales)				1111,42

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.11: Precio unitario de hormigón simple H30 con 10 kg/m³ de fibra de acero

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
DATOS GENERALES					
Proyecto : Proyecto de grado Actividad: Carpeta de hormigon simple (con fibras de acero) Cantidad: 1 Unidad: m ³ Moneda: Bolivianos					
1, MATERIALES					
DESCRIPCIÓN		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Cemento portland	Kg	475,000	1,000	475,000
2	Grava	m ³	0,620	125,000	77,500
3	Arena	m ³	0,450	135,000	60,750
4	Fibra de acero	Kg	10,000	25,000	250,000
TOTAL MATERIALES					863,250
2, MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Albañil	hr	8,000	4,566	36,528
2	Ayudante	hr	8,000	6,088	48,704
SUBTOTAL MANO DE OBRA					85,232
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% al 71,18%)				66,000	56,253
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (% DE SUMA DE SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGAS SOCIALES)				14,940	21,138
TOTAL MANO DE OBRA					162,623
3, EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
DESCRIPCIÓN		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Mezcladora	hr	4,000	11,000	44,000
2	Vibradora	hr	4,000	5,250	21,000
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)				7,000	11,384
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					76,384
4, GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
					COSTO TOTAL
GASTOS GENERALES = (% DE 1 + 2 + 3)				15,000	165,338
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					165,338
5, UTILIDAD					
					COSTO TOTAL
UTILIDAD = (% DE 1 + 2 + 3 + 4)				10,000	126,760
TOTAL UTILIDAD					126,760
6, IMPUESTOS					
					COSTO TOTAL
IMPUESTOS IT = (% DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5)				3,090	43,086
TOTAL IMPUESTOS					43,086
TOTAL PRECIO UNITARIO (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)					1437,440
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (Con dos (2) decimales)					1437,44

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.12: Precio unitario de hormigón simple H30 con 15 kg/m³ de fibra de acero

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
DATOS GENERALES					
Proyecto : Proyecto de grado Actividad: Carpeta de hormigon simple (con fibras de acero) Cantidad: 1 Unidad: m ³ Moneda: Bolivianos					
1, MATERIALES					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Cemento portland	Kg	475,000	1,000	475,000
2	Grava	m ³	0,620	125,000	77,500
3	Arena	m ³	0,450	135,000	60,750
4	Fibra de acero	Kg	15,000	25,000	375,000
TOTAL MATERIALES					988,250
2, MANO DE OBRA					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Albañil	hr	8,000	4,566	36,528
2	Ayudante	hr	8,000	6,088	48,704
SUBTOTAL MANO DE OBRA					85,232
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% al 71,18%)				66,000	56,253
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (% DE SUMA DE SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGAS SOCIALES)				14,940	21,138
TOTAL MANO DE OBRA					162,623
3, EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Mezcladora	hr	4,000	11,000	44,000
2	Vibradora	hr	4,000	5,250	21,000
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)				7,000	11,384
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					76,384
4, GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
					COSTO TOTAL
GASTOS GENERALES = (% DE 1 + 2 + 3)				15,000	184,088
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					184,088
5, UTILIDAD					
					COSTO TOTAL
UTILIDAD = (% DE 1 + 2 + 3 + 4)				10,000	141,135
TOTAL UTILIDAD					141,135
6, IMPUESTOS					
					COSTO TOTAL
IMPUESTOS IT = (% DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5)				3,090	47,972
TOTAL IMPUESTOS					47,972
TOTAL PRECIO UNITARIO (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)					1600,451
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (Con dos (2) decimales)					1600,45

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.13: Precio unitario de hormigón simple H30 con 20 kg/m³ de fibra de acero

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
DATOS GENERALES					
Proyecto : Proyecto de grado Actividad: Carpeta de hormigon simple (con fibra de acero) Cantidad: 1 Unidad: m ³ Moneda: Bolivianos					
1, MATERIALES					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Cemento portland	Kg	475,000	1,000	475,000
2	Grava	m ³	0,620	125,000	77,500
3	Arena	m ³	0,450	135,000	60,750
4	Fibra de acero	Kg	20,000	25,000	500,000
TOTAL MATERIALES					1113,250
2, MANO DE OBRA					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Albañil	hr	8,000	4,566	36,528
2	Ayudante	hr	8,000	6,088	48,704
SUBTOTAL MANO DE OBRA					85,232
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% al 71,18%)				66,000	56,253
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (% DE SUMA DE SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGAS SOCIALES)				14,940	21,138
TOTAL MANO DE OBRA					162,623
3, EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Mezcladora	hr	4,000	11,000	44,000
2	Vibradora	hr	4,000	5,250	21,000
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)				7,000	11,384
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					76,384
4, GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
					COSTO TOTAL
GASTOS GENERALES = (% DE 1 + 2 + 3)				15,000	202,838
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					202,838
5, UTILIDAD					
					COSTO TOTAL
UTILIDAD = (% DE 1 + 2 + 3 + 4)				10,000	155,510
TOTAL UTILIDAD					155,510
6, IMPUESTOS					
					COSTO TOTAL
IMPUESTOS IT = (% DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5)				3,090	52,858
TOTAL IMPUESTOS					52,858
TOTAL PRECIO UNITARIO (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)					1763,462
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (Con dos (2) decimales)					1763,46

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.14: Precio unitario de hormigón simple H30 con 25 kg/m³ de fibra de acero

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
DATOS GENERALES					
Proyecto : Proyecto de grado Actividad: Carpeta de hormigon simple (con fibras de acero) Cantidad: 1 Unidad: m ³ Moneda: Bolivianos					
1, MATERIALES					
DESCRIPCIÓN		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Cemento portland	Kg	475,000	1,000	475,000
2	Grava	m ³	0,620	125,000	77,500
3	Arena	m ³	0,450	135,000	60,750
4	Fibra de acero	Kg	25,000	25,000	625,000
TOTAL MATERIALES					1238,250
2, MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Albañil	hr	8,000	4,566	36,528
2	Ayudante	hr	8,000	6,088	48,704
SUBTOTAL MANO DE OBRA					85,232
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% al 71,18%)				66,000	56,253
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (% DE SUMA DE SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGAS SOCIALES)				14,940	21,138
TOTAL MANO DE OBRA					162,623
3, EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
DESCRIPCIÓN		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Mezcladora	hr	4,000	11,000	44,000
2	Vibradora	hr	4,000	5,250	21,000
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)				7,000	11,384
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					76,384
4, GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
					COSTO TOTAL
GASTOS GENERALES = (% DE 1 + 2 + 3)				15,000	221,588
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					221,588
5, UTILIDAD					
					COSTO TOTAL
UTILIDAD = (% DE 1 + 2 + 3 + 4)				10,000	169,885
TOTAL UTILIDAD					169,885
6, IMPUESTOS					
					COSTO TOTAL
IMPUESTOS IT = (% DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5)				3,090	57,744
TOTAL IMPUESTOS					57,744
TOTAL PRECIO UNITARIO (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)					1926,473
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (Con dos (2) decimales)					1926,47

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.15: Precio unitario de hormigón simple H30 con 26 kg/m³ de fibra de acero

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
DATOS GENERALES					
Proyecto : Proyecto de grado Actividad: Carpeta de hormigon simple (con fibras de acero) Cantidad: 1 Unidad: m ³ Moneda: Bolivianos					
1, MATERIALES					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Cemento portland	Kg	475,000	1,000	475,000
2	Grava	m ³	0,620	135,000	83,700
3	Arena	m ³	0,450	135,000	60,750
4	Fibra de acero	Kg	26,000	25,000	650,000
TOTAL MATERIALES					1269,450
2, MANO DE OBRA					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Albañil	hr	8,000	4,566	36,528
2	Ayudante	hr	8,000	6,088	48,704
SUBTOTAL MANO DE OBRA					85,232
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% al 71,18%)				66,000	56,253
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (% DE SUMA DE SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGAS SOCIALES)				14,940	21,138
TOTAL MANO DE OBRA					162,623
3, EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Mezcladora	hr	4,000	11,000	44,000
2	Vibradora	hr	4,000	5,250	21,000
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)				7,000	11,384
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					76,384
4, GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
					COSTO TOTAL
GASTOS GENERALES = (% DE 1 + 2 + 3)				15,000	226,268
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					226,268
5, UTILIDAD					
					COSTO TOTAL
UTILIDAD = (% DE 1 + 2 + 3 + 4)				10,000	173,473
TOTAL UTILIDAD					173,473
6, IMPUESTOS					
					COSTO TOTAL
IMPUESTOS IT = (% DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5)				3,090	58,963
TOTAL IMPUESTOS					58,963
TOTAL PRECIO UNITARIO (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)					1967,161
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (Con dos (2) decimales)					1967,16

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.16: Precio unitario de hormigón simple H30 con 30 kg/m³ de fibra de acero

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
DATOS GENERALES					
Proyecto : Proyecto de grado Actividad: Carpeta de hormigon simple (con fibras de acero) Cantidad: 1 Unidad: m ³ Moneda: Bolivianos					
1, MATERIALES					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Cemento portland	Kg	475,000	1,000	475,000
2	Grava	m ³	0,620	135,000	83,700
3	Arena	m ³	0,450	135,000	60,750
4	Fibra de acero	Kg	30,000	25,000	750,000
TOTAL MATERIALES					1369,450
2, MANO DE OBRA					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Albañil	hr	8,000	4,566	36,528
2	Ayudante	hr	8,000	6,088	48,704
SUBTOTAL MANO DE OBRA					85,232
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% al 71,18%)				66,000	56,253
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (% DE SUMA DE SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGAS SOCIALES)				14,940	21,138
TOTAL MANO DE OBRA					162,623
3, EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Mezcladora	hr	4,000	11,000	44,000
2	Vibradora	hr	4,000	5,250	21,000
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)				7,000	11,384
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					76,384
4, GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
					COSTO TOTAL
GASTOS GENERALES = (% DE 1 + 2 + 3)				15,000	241,268
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					241,268
5, UTILIDAD					
					COSTO TOTAL
UTILIDAD = (% DE 1 + 2 + 3 + 4)				10,000	184,973
TOTAL UTILIDAD					184,973
6, IMPUESTOS					
					COSTO TOTAL
IMPUESTOS IT = (% DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5)				3,090	62,872
TOTAL IMPUESTOS					62,872
TOTAL PRECIO UNITARIO (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)					2097,570
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (Con dos (2) decimales)					2097,57

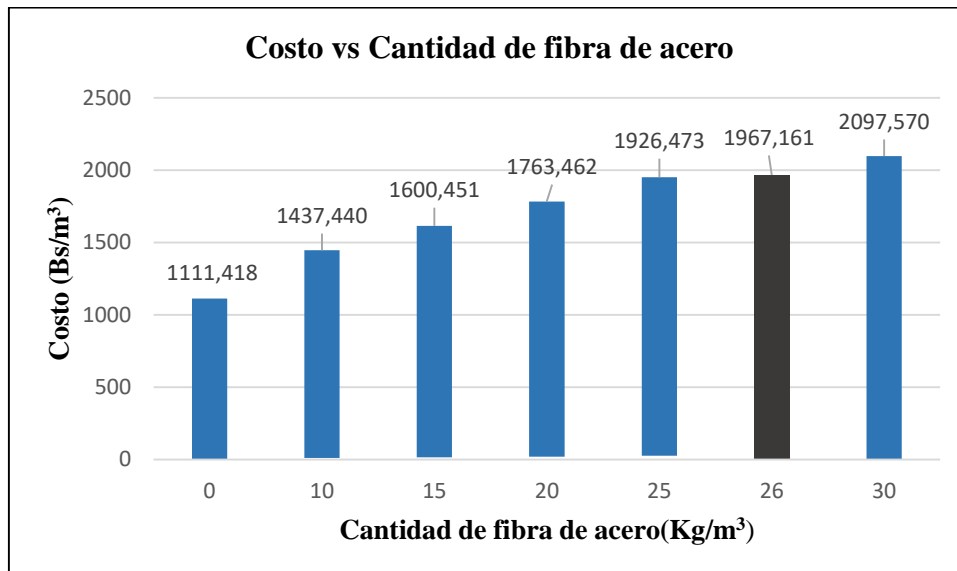
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.17: Resumen del Análisis de precios unitarios del hormigón simple H 30

Descripción	Cantidad (m ³)	Dosificación (kg/m ³)	Costo (Bs)
Hormigón simple H 30	1	0	1111,418
Hormigón simple H 30 con adición de fibra de acero	1	10	1437,440
Hormigón simple H 30 con adición de fibra de acero	1	15	1600,451
Hormigón simple H 30 con adición de fibra de acero	1	20	1763,462
Hormigón simple H 30 con adición de fibra de acero	1	25	1926,473
Hormigón simple H 30 con adición de fibra de acero	1	26	1967,161
Hormigón simple H 30 con adición de fibra de acero	1	30	2097,570

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.2: Comparación del precio de 1 m³ de hormigón con adición de fibra de acero



Fuente: Elaboración propia

Interpretación:

Como se puede observar en la Figura 4.2, el costo de elaboración de un metro cúbico de hormigón con la adición de fibra de acero se incrementa a medida que se va aumentando la dosificación de este material, dando un costo mayor al de la elaboración de un hormigón convencional.

Si se llegaría a utilizar este material en una adición de 26 Kg/m^3 , para la dosificación óptima definida en esta investigación el costo de elaboración por metro cúbico se incrementaría un 75% más con respecto a un hormigón convencional.

Pero frente a las múltiples ventajas que ofrece la incorporación de fibra de acero a la mezcla de hormigón habrá que hacer un análisis en función a las necesidades y exigencias de cada proyecto y evaluar qué dosificación es la más conveniente a utilizar.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Luego de realizar un análisis detallado del uso de fibras de acero Dramix 3D en el hormigón aplicado a pavimento rígido, se puede concluir de manera satisfactoria que su incorporación tiene un impacto positivo en la resistencia del pavimento. Por lo tanto, se logró cumplir con el objetivo principal de la investigación que fue analizar la influencia de estas fibras en el pavimento rígido, demostrando que su uso es una opción viable para mejorar la calidad y la vida útil del pavimento.
- La dosificación óptima de fibras de acero recomendada en esta investigación es de 26 Kg/m³. Esta dosificación logra un incremento porcentual máximo en la resistencia a compresión del hormigón, ya que valores superiores a esa dosificación ya no logran un mayor incremento en la resistencia.
- Se observó un incremento del 23 % en la resistencia a la flexión del hormigón al añadir la dosificación óptima de fibras de acero, 26 kg/m³ (52 kg/cm²) en comparación con el hormigón sin fibras. Este resultado cumple ampliamente con los requisitos establecidos por las diferentes normativas y manuales de construcción de pavimentos citados en el capítulo 2.
- Además, se encontró que la resistencia máxima a compresión del hormigón también aumenta al incrementar la dosificación de fibras de acero Dramix 3D en la mezcla, con una dosificación óptima de 26 kg/m³, se tiene aproximadamente un incremento promedio del 27 % (388 kg/cm²) en la resistencia máxima a compresión, en comparación con el hormigón convencional.
- Se demostró que el uso de fibras de acero Dramix 3D en el hormigón, permite lograr mayores resistencia a edades tempranas siendo esto una ventaja muy favorable durante la ejecución de una obra.
- La resistencia residual permite al hormigón seguir resistiendo cargas en el tiempo pese a recibir grandes deformaciones.

- Durante la realización de la presente disertación se evidenció que la utilización de fibras de acero Dramix 3D en mezclas de hormigón resulta conveniente debido a que no requiere mano de obra especializada y su aplicación puede reducir significativamente el tiempo de construcción.
- Finalmente la prueba de hipótesis realizada demostró que la fibra de acero tiene un efecto significativo en la variación de la resistencia a compresión y flexión en el hormigón.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda controlar que la fibra no quede expuesta directamente a la superficie ya que con el paso del tiempo esta puede iniciar el proceso de oxidación.
- Para garantizar y obtener mejores resultados en la resistencia a flexión. Se tiene que tener mucho cuidado en el momento de apisonar y manipular las vigas. Si no se apisona bien la mezcla en el molde con los 50 golpes con la varilla quedan muchos vacíos al desmoldar las vigas, para evitar eso se recomienda apisonar de forma uniforme cada capa u optar por usar otro método de compactación como el vibrado que está en función al asentamiento que presenta la mezcla, además hay que sacar las burbujas de aire con el combo de goma, así evitamos los vacíos y huecos al desmoldar las vigas.
- El estudio e investigación del uso de las fibras de acero con fines ingenieriles es muy amplio por lo cual se recomienda fomentar en los estudiantes posibles temas como por ejemplo la aplicación de fibras de acero en vigas estructurales.
- En el proceso de vaciado prever que el tiempo entre mezclado y vertido no supere los 15 minutos, pasado este tiempo se afecta la resistencia del concreto, viéndose reflejado en los resultados obtenidos.
- Se recomienda emplear las gomas de neopreno al momento de realizar la rotura de probetas cilíndricas puesto que se observó en laboratorio que la resistencia aumenta considerablemente en comparación al uso de gomas comunes en los retenedores.