

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El desarrollo y sofisticación de los hormigones es una preocupación constante para la ingeniería moderna dada su gran demanda en la construcción; por ello, el hombre se encuentra en constante búsqueda de mejorar sus propiedades ya que su buen desempeño a la compresión no es suficiente para ciertos usos, tal es el caso de los pavimentos rígidos donde se requiere que responda a la flexión. A esto se suma la creciente necesidad de buscar alternativas de solución a la contaminación ambiental producida por las botellas de plástico, si bien el reciclado es una buena alternativa, se debe continuar realizando estudios que permitan determinar su aprovechamiento, sobre todo, en el campo de la construcción.

Para hacer frente a esta problemática se han realizado investigaciones en los últimos años que han permitido desarrollar nuevas tecnologías y varias tendencias en la elaboración de hormigones, como el uso de fibras industriales de polipropileno y fibras de polietileno de Tereftalato obtenidas de botellas de plástico reciclado. En tal sentido, la finalidad del presente trabajo de investigación fue determinar en cuánto mejora la resistencia a la flexión y compresión con la incorporación de fibras PET en el hormigón para pavimentos rígidos, tomando como referencia cargas vehiculares de tipo liviano.

El desarrollo experimental comprenderá la fabricación de hormigones incorporando diferentes dosificaciones de PET (0%, 0.6%, 1% y 1.4% en peso de fibras dispersas) los mismos serán ensayados y analizados tanto en estado fresco como endurecido, en este último se verificará, a través del procesamiento de los datos obtenidos, si se producen cambios significativos en las propiedades de resistencia a la compresión y flexión.

1.2. Situación problemática.

La resistencia a la flexo-tracción en pavimentos es uno de los parámetros más importantes mediante el cual se llega a dimensionar el espesor de un pavimento rígido, la forma de

solicitud de las cargas en las losas de un pavimento se da mediante flexión por acción de las cargas de las ruedas, por lo que el dimensionante del diseño es la flexo tracción, en los últimos tiempos se ha tratado de optimizar el diseño de los pavimentos rígidos añadiendo fibras y de esta forma obtener resistencias más elevadas.

Las fibras de polietileno de tereftalato (PET) son fibras sintéticas, hechas a base de polímeros, este material es reciclado actualmente en el mundo porque es catalogado como un contaminante ambiental por el tiempo que le toma al mismo degradarse y el gran volumen de consumo en botellas plásticas, por esta razón se ha hecho investigaciones donde se encontró su aporte en la resistencia de pavimentos rígidos y pavimentos flexibles, el polietileno de tereftalato es uno de los materiales más económicos que existe y su modificación a fibras puede llegar a ser de gran aporte en la resistencia de los pavimentos rígidos optimizando de esta forma su diseño.

Si el porcentaje de adición de fibras de polietileno de tereftalato (PET) en la mezcla de hormigón para pavimento rígido no es el correcto, es decir se añadió gran porcentaje de fibras, entonces, el efecto será negativo en la resistencia a la flexo-tracción. Esta situación trae como consecuencia un diseño antieconómico del pavimento rígido para vehículos livianos.

Es necesario realizar un análisis del efecto de estas fibras, para de esta forma obtener resistencias óptimas a flexo-tracción con un porcentaje adecuado de fibras de polietileno de tereftalato (PET).

1.2.1. Problema.

¿Cómo afecta la adición de las fibras de polietileno de tereftalato (PET) en la resistencia a la flexo-tracción en pavimentos rígidos para vehículos livianos?

1.2.2. Relevancia y factibilidad del problema.

El presente trabajo se presenta por la acumulación excesiva de desechos plásticos por un mal manejo de estos lo cual causa problemas al medio ambiente, por otro lado se tiene

que el concreto hidráulico posee una baja resistencia a flexo-tracción lo que llega a producir fallas en el pavimento rígido.

El uso de plásticos es bastante común en la vida diaria por lo que ha generado una gran demanda de ellos, y con esto el manejo de sus residuos se ha convertido en un problema constante en todo el mundo. El reciclaje es la mejor opción para el manejo de estos residuos visto desde una perspectiva ambiental, sin embargo, los procedimientos a emplear pueden ser poco rentables para las empresas que se dedican al embalaje, por lo que optan por la producción de envases y envolturas nuevas, generando así grandes cantidades de desperdicios los cuales no son aprovechados. Por otro lado, se tiene que el concreto hidráulico es un material utilizado para la pavimentación, aunque por su deficiente resistencia a la flexo-tracción puede presentar fallas prematuras reflejadas en agrietamientos que reducen la vida útil del pavimento de manera significativa.

Es por ello que el concreto modificado mediante la adición de fibras de polietileno provenientes de desechos plásticos (PET) es una alternativa a la solución de los problemas descritos, ya que se obtendrá una opción más para el correcto manejo de los desperdicios generados por plásticos y a su vez un material que, mediante la adición del polietileno, obtendrá una mejora en las propiedades mecánicas. Dicha mejora se da por la interacción entre las partículas del polietileno de tereftalato y los hidratos del cemento, la cual contribuye a la formación de una película la cual afecta positivamente la microestructura del material y con ello aumentando su rendimiento y durabilidad.

El proyecto es factible puesto que en los laboratorios de la universidad Juan Misael Saracho se tiene todo el equipo necesario para realizar los diferentes ensayos a los materiales y posterior determinación de resistencias con diferentes porcentajes de (PET) aplicados a probetas de hormigón. El material de adición como es la fibra de (PET) se la obtendrá de un proveedor local que se dedica al reciclado en grandes masas de este material, el cual posee ya un equipo especial para la obtención de la fibra.

1.2.3. Delimitación temporal y espacial del problema.

La presente investigación será válida hasta que se encuentre un porcentaje más óptimo de fibra de PET u otra forma de fibra que pueda mejorar las características del hormigón,

para dicha investigación se toma como característica principal la resistencia a la flexo-tracción, puesto que será aplicada a pavimentos rígidos.

La investigación se realizó en los laboratorios de resistencia de los materiales de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, realizando los diferentes ensayos de caracterización de materiales y rotura de probetas.

1.3. Justificación.

Actualmente en Bolivia existe la necesidad de tener obras viales de mayor calidad, resistencia y durabilidad en el tiempo con buenas características, debido principalmente al considerable aumento del parque automotor y por ende del tráfico urbano.

Otro gran problema que presenta nuestro país y el mundo entero es el cuidado del medio ambiente, está en marcha el reciclaje de materiales para ser empleados en cualquier tipo de procedimiento que disminuya la contaminación creando nuevos productos, más económicos y con menos inversión de materia prima, minimizando de esta forma la explotación de recursos no renovables, en donde el polietileno de tereftalato (PET) es uno de los materiales de mayor contaminación debido a su aumento exponencial de su consumo en la sociedad, dado que ha sido un gran benefactor en las necesidades cotidianas, su bajo costo y su fácil acceso lo vuelve un material fácil de eliminar, encontrándose en gran cantidad en cualquier bote de basura o tirado por los suelos.

El estudio de la incorporación de polietileno de tereftalato (PET) en el hormigón para pavimento rígido ha dado muy buenos resultados en otros países, aunque el mismo puede a su vez empeorar las propiedades si no es adicionado en las cantidades adecuadas y en la forma correcta, por este motivo es necesario seguir realizando investigaciones para de esta forma encontrar un porcentaje óptimo de fibra de polietileno de tereftalato (PET) que mejore las propiedades del hormigón en resistencia a flexo-tracción para su posterior uso como pavimento rígido.

La finalidad de la investigación es analizar el efecto que causa la adición de fibras de polietileno de tereftalato (PET) en la resistencia a la flexo-tracción elaborando probetas y vigas de hormigón, se tomara tres diferentes porcentajes los mismos no superan el 5 % en

función al peso de cemento portland a ser usado en la mezcla por recomendaciones de investigaciones realizadas en otros países previamente estudiadas.

La adición de este polímero se considera una alternativa sustentable al obtener un hormigón para pavimento rígido con características adecuadas de resistencia mecánica, a su vez se da un nuevo uso al plástico reciclado ayudando de gran forma a mitigar los efectos de impacto ambiental que los mismos causan actualmente en nuestro medio.

1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivo general.

Analizar el efecto que tiene las fibras de polietileno de tereftalato (PET) en la resistencia de flexo-tracción, aplicado a los pavimentos rígidos para vehículos livianos; de tal manera, se pueda establecer relaciones óptimas bajo parámetros de calidad y costo.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Realizar la Caracterización de los agregados y el cemento portland.
- Determinar los porcentajes óptimos de fibras de polietileno de tereftalato (PET).
- Realizar el ensayo de resistencia a la flexión y compresión.
- Efectuar la validación de resultados a través de un análisis de confiabilidad estadístico.
- Realizar un análisis de resultados.

1.5. Hipótesis.

Si, la adición de fibras de polietileno de tereftalato (PET) en la mezcla de hormigón aumentara la resistencia a la flexo-tracción en las losas de pavimento rígido.

1.6. Operacionalización de las variables.

Tabla 1. Conceptualización y operacionalización de la variable independiente

Variable Independiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Cantidad de fibras de Polietileno de Tereftalato (PET)	Son diferentes cantidades de fibras añadidas a la mezcla de hormigón	La masa de Hormigón	Gramos (gr)	Preparación Previa de la Muestra de hormigón Según la Normativa ABC.
		Fibras de polietileno de tereftalato	Porcentaje (%)	Se tomará en cuenta 3 porcentajes de fibras que son 0.6, 1 y 1.4 % calculadas en función al peso total de la muestra
		Mezcla del hormigón con fibras de polietileno de tereftalato	Gramos (gr)	Se realizará muestras separadas en función a los porcentajes de fibras ya definidas, por lo menos 20 muestras por porcentaje de fibras

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 2. Conceptualización y operacionalización de la variable dependiente.

Variable Dependiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Resistencia a la Flexotracción	Se refiere a la comparación de valores obtenidos de las	Elaboración de probetas prismáticas	Numero	Se realizará probetas prismáticas de hormigón con los porcentajes ya definidos de fibras

diferentes muestras ensayadas con el parámetro poblacional que indica la Normativa en el diseño de pavimentos rígidos para vehículos livianos	Curado	Datos de expansión por día	Las muestras se sumergirán en agua durante 28 días.
	Prueba de resistencia a flexión	Kg /cm ²	Correr la prueba de flexión en la máquina de compresión hidráulica previamente calibrada
	Prueba de resistencia a compresión	Kg /cm ²	Correr la prueba de compresión en la máquina de compresión hidráulica previamente calibrada
	Resultados y curvas	Informe final	Proceso de cálculos comparativos

Fuente: Elaboración Propia.

1.6.1. Variable independiente.

La variable independiente es; cantidad de fibras de polietileno de tereftalato (PET).

1.6.2. Variable dependiente.

La variable dependiente es; la resistencia a la flexo-tracción.

1.7. Identificación del tipo de investigación.

El presente trabajo hace referencia al tipo de investigación experimental puesto que se basa en el principio de generar una acción y obtener la reacción, manipulando con criterio la variable independiente, teniendo control sobre la misma y de esta forma obtener efectos en la variable dependiente.

1.8. Unidades de estudio y decisión muestral.

1.8.1. Unidad de estudio.

Para la presente investigación se definió una unidad de estudio como son los ensayos de laboratorio, en la presente tabla se tiene la unidad de estudio, muestra y población:

Tabla 3. Unidad de estudio, muestra y población.

Unidad de estudio	Población	Muestra
Un ensayo de laboratorio para hormigones	Los ensayos de resistencia y caracterización de los materiales = 182 ensayos	Los ensayos de resistencia y caracterización de los materiales = 91

Fuente: Elaboración Propia.

1.8.2. Población.

Para la población se tiene un total de 182 ensayos de laboratorio los cuales se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 4. Población y muestra estratificada.

Fase de la Investigación	Nombre de los ensayos	Cantidad de ensayos
Pruebas de los Agregados	Granulometría de grava	6
	Granulometría de arena	6
	Peso específico de la grava	6
	Peso específico de la arena	6
	Desgaste de los ángeles	4
	Peso unitario de la grava	6
	Peso unitario de la arena	6
Pruebas al cemento Portland	Finura del cemento	6
	Peso específico	6
Pruebas de Resistencia encontrando valores óptimos para los porcentajes de 0 %, 0.6%, 1% y 1.4% de fibra de PET	Resistencia a la compresión de probetas cilíndricas	10
	Resistencia a la flexión de vigas prismáticas	120
	Total, de ensayos	182

Fuente: Elaboración Propia.

1.8.3. Muestra.

El tamaño de la muestra se lo obtuvo mediante el método de muestreo estratificado dado que este método cumple con las características para nuestro tipo de unidad elemental. El tamaño de la muestra se lo presenta a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 5. Tamaño de muestra

Estrato	Ensayo	Cantidad de ensayos
I	Granulometría de grava	3
II	Granulometría de arena	3
II	Peso específico de la grava	3
IV	Peso específico de la arena	3
V	Desgaste de los ángeles	2
VI	Peso unitario de la grava	3
VII	Peso unitario de la arena	3
VIII	Finura del cemento	3
IX	Peso específico y contenido de humedad	3
X	Resistencia a la compresión de probetas cilíndricas	5
XI	Resistencia a la flexión de vigas prismáticas	60

Fuente: Elaboración Propia.

1.8.4. Selección de las técnicas de muestreo.

Las técnicas de muestreo a usar partieron de un muestreo probabilístico, de esta forma dar un tamaño confiable de muestra en función a una población finita. Para determinar el tamaño confiable de la muestra se tiene una población definida de la cual se toma una muestra con un nivel de confianza $NC=95\%$, usando la ecuación para medias poblacionales en un muestreo estratificado.

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma^2}{N \left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma^2}{N}}$$

Ecuación para cálculo población finita (muestreo estratificado)

Donde:

n = Muestra para población finita

N= Población finita 182 ensayos

Ni= Numero de ensayos

σ^2 = Varianza asumida de 0.15 por el corto tiempo para realizar la investigación

NC=Nivel de confianza 95%

Z = Variable estandarizada que para NC de 95% es igual a 1.96

e = Margen de error deducido en función al nivel de confianza

$$n = \frac{27.30}{182 \left(\frac{0.05}{1.96}\right)^2 + \frac{27.30}{182}} = 91 \text{ ensayos de Laboratorio}$$

En las siguientes tablas se presenta la población y el tamaño de la muestra estratificada para un nivel de confianza del 95%.

Población Finita ya establecida

Tabla 6. Población y muestra estratificada

Estrato	Ensayo	Ni	s2	Ni \square 2	fi	ni
I	Granulometría de grava	6	0.150	0.900	0.033	3
II	Granulometría de arena	6	0.150	0.900	0.033	3
II	Peso específico de la grava	6	0.150	0.900	0.033	3
IV	Peso específico de la arena	6	0.150	0.900	0.033	3
V	Desgaste de los ángeles	4	0.150	0.600	0.022	2
VI	Peso unitario de la grava	6	0.150	0.900	0.033	3
VII	Peso unitario de la arena	6	0.150	0.900	0.033	3
VIII	Finura del cemento	6	0.150	0.900	0.033	3
IX	Peso específico	6	0.150	0.900	0.033	3
X	Resistencia a la compresión de probetas cilíndricas	10	0.150	1.500	0.055	5
XI	Resistencia a la flexión de vigas prismáticas	120	0.150	18.000	0.659	60
	Total	182		27.300	1.000	91

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 7. Muestra estratificada

Fase de la Investigación	Nombre de los ensayos	Cantidad de ensayos
Pruebas de los Agregados	Granulometría de grava	3
	Granulometría de arena	3
	Peso específico de la grava	3
	Peso específico de la arena	3
	Desgaste de los ángeles	2
	Peso unitario de la grava	3
	Peso unitario de la arena	3
Pruebas al cemento Portland	Finura del cemento	3
	Peso específico	3
Pruebas de Resistencia encontrando valores óptimos para los porcentajes de 0 %, 0.6%, 1% y 1.4% de fibra de PET	Resistencia a la compresión de probetas cilíndricas	5
	Resistencia a la flexión de vigas prismáticas	60
Total, de ensayos		91

Fuente: Elaboración Propia.

De donde se tiene ya calculada la muestra mediante un muestreo probabilístico obteniendo una muestra estratificada de 91 ensayos de laboratorio.

1.9. Métodos y técnicas empleadas.

1.9.1. Métodos.

Para la elaboración del presente trabajo de investigación se adoptó el método empírico, en el cual se encuentra el experimento que prima en nuestra investigación.

1.9.1. Experimental.

Es experimental porque se realizarán observaciones y mediciones de prácticas experimentales de laboratorio, para determinar los esfuerzos a flexo-tracción del hormigón, obtenidos de la fabricación de vigas, que serán sometidas a cargas puntuales, a través del equipo “prensa hidráulica” el cual nos determina la carga que logra resistir estas muestras.

1.9.2. Técnicas.

Las técnicas usadas en este trabajo refieren a una investigación de campo los cuales son:

1.9.2.1. Recolección de datos.

Previo a la realización de cualquier ensayo se procederá a recolectar toda la información necesaria para la obtención de porcentajes de fibra en función a estudios ya realizados en otros países para obtener una dosificación eficiente y óptima.

1.9.2.2. Ensayos.

Se realizará los ensayos de caracterización de los materiales para la elaboración de vigas y probetas modelo con adición de fibras de polietileno de tereftalato (PET) posteriormente realizar los ensayos de resistencia a flexión y compresión en los mismos.

1.9.2.3. Procesamiento de datos y validación.

Los resultados obtenidos de las diferentes dosificaciones serán analizados y procesados estadísticamente en el capítulo 3 del presente trabajo.

1.9.2.4. Tabulación.

Se realizará una recopilación de los valores obtenidos, se los ordenará y presentará en tablas resumen de resultados.

1.9.2.5. Análisis de resultados.

Se realizará un análisis entre los datos obtenidos de las diferentes dosificaciones de hormigón para pavimento rígido, de esta forma establecer un porcentaje óptimo de adición de fibra de polietileno de tereftalato (PET).

1.10. Procesamiento de la información.

Se realizarán los siguientes pasos:

1. Revisión crítica y definida de la información recolectada.
2. Tabulación de datos de acuerdo a la hipótesis y sus variables.
3. Representación numérica y grafica de los resultados.
4. Realizar la confiabilidad de los resultados a través de métodos estadísticos.
5. Analizar e interpretar los resultados obtenidos haciendo referencia a los objetivos y la hipótesis.

6. Determinación de conclusiones y recomendaciones y verificación de la hipótesis.

1.11. Alcance de la investigación.

El presente proyecto se constituye un importante aporte a tomarse en cuenta en actuales y potenciales proyectos de carreteras y vías de comunicación, que fundamentalmente están a cargo de las entidades públicas del Estado Plurinacional de Bolivia, sabiendo que existen infraestructuras construidas de este tipo que tienen deficiencias en cuando a su duración, mantenimiento, estructura debido al tipo de material y dosificación aplicadas que posiblemente no son las más adecuadas a las alternativas tecnológicas que se pueden experimentar, ensayar y probarlas de manera que sean tanto técnicamente y económicamente viables, factibles y sostenibles para el beneficio de la sociedad y el medio ambiente en su conjunto.

En el presente proyecto se realiza un análisis de los efectos que produce las fibras de polietileno de tereftalato (PET) en diferentes porcentajes en la mezcla de hormigón en la resistencia a la flexo-tracción y realizando su comparación con un hormigón convencional (HC), para obtener sus características físicas, mecánicas y técnicas con el fin de identificar las diferencias, ventajas y desventajas entre ellos. De esta forma brindar información sobre los hormigones reforzados con fibras para pavimentos rígidos.

Para realizar este experimento nos apoyamos en diferentes normas como son: Norma colombiana INVIAS, Norma nacional ABC y Norma ACI. Esto debido a que en nuestro país no se tiene una norma establecida para este tipo de experimentos. La norma INVIAS se usó para definir los parámetros que deben cumplir los materiales y la resistencia para la fabricación de hormigones en pavimentos rígidos. La norma ABC se usó para realizar los diferentes laboratorios, dicha norma a su vez da referencia a la norma ASTM la cual es más conocida y usada a nivel mundial. La Norma ACI se la uso para realizar la dosificación del hormigón para una determinada resistencia a compresión y con la ayuda de una ecuación obtener la resistencia a flexión a la que debemos llegar.

Para este análisis, se utilizará la misma dosificación para cada hormigón, haciendo variar el porcentaje de fibras incluidas, se realizará los ensayos a flexión y se determinará el efecto que causa la adición de fibras en la resistencia a flexo-tracción, se hará un análisis

estadístico y económico para la factibilidad de la incorporación de fibras en pavimentos rígidos.

Se llegará a establecer las diferencias entre los hormigones sometidos a estudio, se identificarán las ventajas y desventajas que proporcionan las fibras sobre el hormigón para pavimentos rígidos.

CAPITULO II

ASPECTOS GENERALES DEL PAVIMENTO RÍGIDO

2.1. Fundamento teórico.

Realizar el análisis del efecto de las fibras de polietileno de tereftalato en la resistencia a la flexo-tracción en pavimentos rígidos para vehículos livianos, es un análisis comparativo entre un pavimento convencional diseñado para vehículos livianos (Con 0 % de fibra de polietileno de tereftalato), con otro pavimento que si cuenta con distintos porcentajes de fibra de polietileno de tereftalato esto como aditivo puesto que los porcentajes a añadir son pequeños. Para poder realizar esta investigación se usaran agregados como ser (Grava y arena), de la chancadora Charajas de Tarija, se usara cemento portland “El puente” y “Fancesa” puesto que son los cementos que priman en la zona; se realizaran todos los ensayos de caracterización para los agregados, una vez hecho la caracterización se procederá a dosificar para vaciar 5 probetas para hacer el ensayo a compresión y 60 vigas para hacer el ensayo a tracción, de esta forma obtener una variación satisfactoria de las propiedades, resistencia a flexo-tracción durante un periodo predeterminado de tiempo en un entorno natural. Para el desarrollo de la investigación se debe profundizar los conceptos del hormigón de pavimento rígido y sus componentes, así mismo de la fibra de polietileno de tereftalato (PET) sus componentes y características, están serán descritas a continuación.

2.2. Pavimento.

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el periodo para el cual fue diseñada la estructura del pavimento.

Un pavimento para cumplir adecuadamente sus funciones debe reunir los siguientes requisitos:

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito para el cual fue diseñado.
- Ser resistente ante los agentes del intemperismo.
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos, por cuanto ella tiene una decisiva influencia en la seguridad vial. Además, debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Debe presentar una regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal, que permitan una adecuada comodidad a los usuarios en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación
- Debe ser durable
- Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje
- El ruido de rodadura en el interior de los vehículos que afectan al usuario, así como en el exterior, que influye en el entorno, debe ser adecuadamente moderado.
- Debe ser económico
- Debe poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos, y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito

2.1.2. Clasificación del pavimento.

En nuestro medio los pavimentos se clasifican en:

- Pavimentos flexibles.
- Pavimentos semirrígidos o semiflexibles
- Pavimentos rígidos
- Pavimentos articulados

2.3. Pavimentos rígidos.

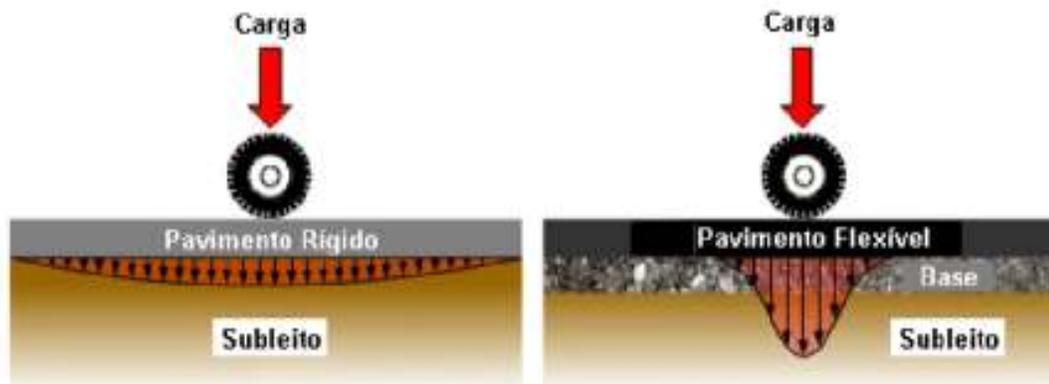
Son aquellos que fundamentalmente están constituidos por una losa de concreto hidráulico, apoyada sobre la subrasante o sobre una capa, de material seleccionado, la cual se denomina subbase del pavimento rígido. Debido a la alta rigidez del concreto hidráulico, así como de su elevado coeficiente de elasticidad, la distribución de los esfuerzos se produce en una zona muy amplia. Además, como el concreto es capaz de

resistir, en cierto grado, esfuerzos a la tensión, el comportamiento de un pavimento rígido es suficientemente satisfactorio aun cuando existan zonas débiles en la subrasante. La capacidad estructural de un pavimento rígido depende de la resistencia de las losas y, por lo tanto, el apoyo de las capas subyacentes ejerce poca influencia en el diseño del espesor del pavimento. (Montejo Fonseca, 2002)

La carpeta de rodadura conformada por concreto de cemento hidráulico. Recibe el nombre de pavimento rígido debido a las propiedades de la carpeta de concreto, que absorbe en mayor grado las cargas vehiculares.

Debido a la naturaleza rígida de la carpeta de rodadura, las cargas vehiculares se distribuyen en una forma más eficiente. Por ello, por lo general, requieren en su estructura de un menor número de capas granulares entre la carpeta de rodadura y la subrasante.(Becerra Salas, 2012)

Ilustración N° 1 Diferencias entre pavimento rígido y flexible.



Fuente: Análisis comparativo de los métodos de suelo pavimento duro (hormigón) por flexible (asfalto), revista científica multidisciplinaria.

2.3.1. Clasificación de los pavimentos de concreto.

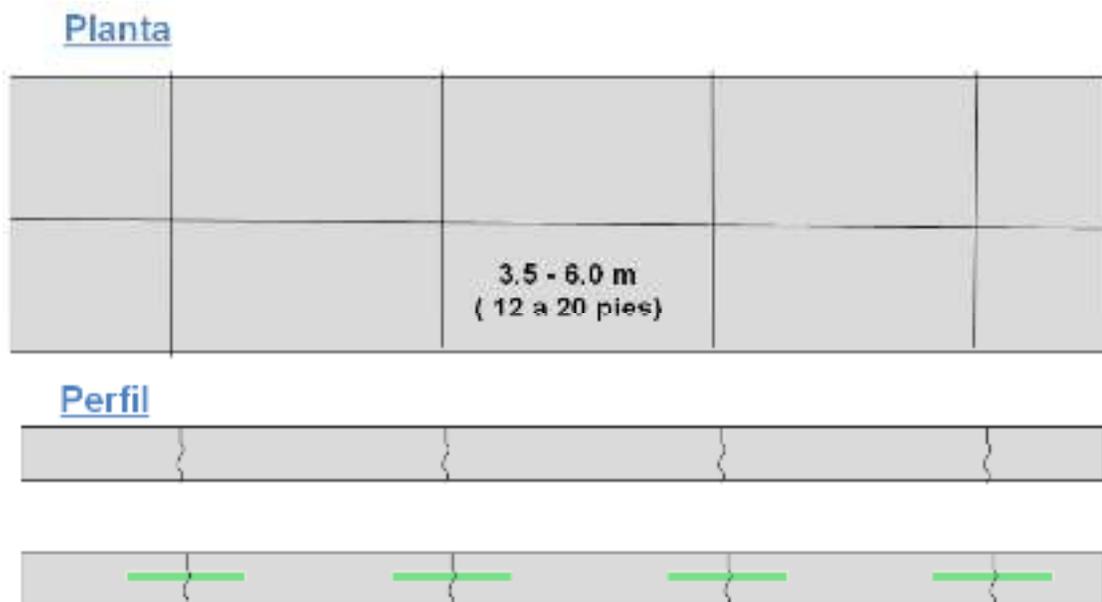
Existen cuatro tipos de pavimentos de concreto utilizados en vías, los cuales se diferencian principalmente por la forma en que se distribuyen las juntas sobre la carpeta de rodadura los cuales son:

- Pavimento de concreto simple con juntas (JPCP)
- Pavimento de concreto armado con barras transversales (JRCP)
- Pavimentos de concreto continuamente reforzados (CRCP)
- Pavimentos de concreto con losas cortas (Optipave)

2.3.1.1. Pavimento de concreto simple con juntas (JPCP).

Se le conoce como JPCP (Jointed Plain Concrete Pavement, por sus siglas en inglés). En este tipo de pavimentos se requieren realizar juntas de contracción transversal que, en teoría, están espaciadas entre 3.500 y 6.000 m. La transferencia de carga entre paños adyacentes se puede dar mediante trabazón de agregados o mediante el empleo de pasadores. Las juntas inducen el agrietamiento, propio del comportamiento del concreto, por las tensiones originadas debido a los cambios de temperatura y humedad que experimenta la carpeta de rodadura. Aunque la teoría indica que se pueden alcanzar espaciamientos de 6.0 m, por la experiencia recogida en numerosos proyectos viales, se recomienda no superar los 4.5 m de espaciamiento entre paños.

Ilustración N° 2 Esquema de pavimento de concreto simple con juntas.

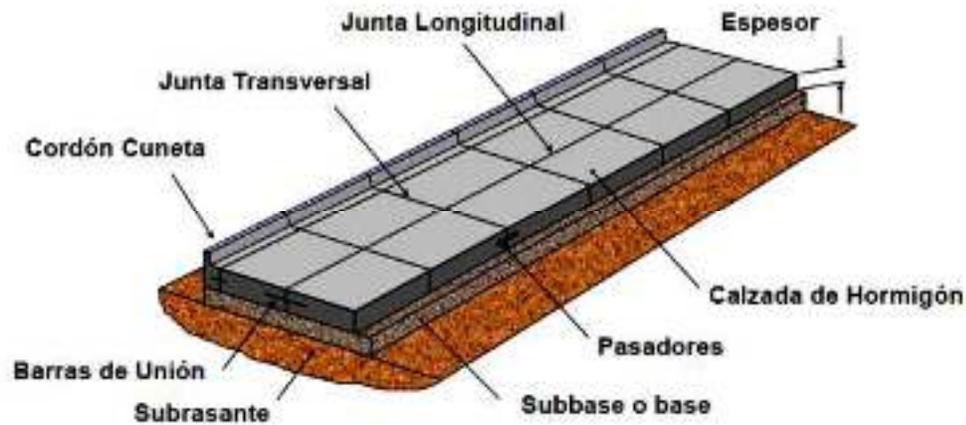


Fuente: Tópicos de Pavimentos de Concreto 2012 – LB 001.

2.3.2. Capas del pavimento rígido.

Entre las capas que posee el pavimento rígido podemos citar a la losa de concreto, la sub base y la sub rasante.

Ilustración N° 3 Capas de un pavimento rígido



Fuente: Pavimentos de Ing. Claudio Giordani y Ing. Diego Leone, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Rosario.

2.3.2.1. Losa de concreto.

Es la capa superior de la estructura de pavimento, construida con concreto hidráulico, por lo que, debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la losa, más que en la capacidad de la subrasante, dado que no usan capa de base. En general, se puede indicar que el concreto hidráulico distribuye mejor las cargas hacia la estructura de pavimento.

Constituye la parte fundamental del pavimento rígido debido a la rigidez que presenta la losa, esta clase de pavimentos no requieren, al menos desde un punto de vista teórico apoyarse sobre una explanada u capa elevada capacidad de soporte. Las losas deben estar diseñadas para resistir los esfuerzos producidos por el tránsito y los efectos de la intemperie, y proporcionar además una superficie de rodamiento segura, cómoda y de características permanentes bajo el efecto combinado del tránsito y de los efectos ambientales durante su vida útil, de manera que solo deban ser necesarias algunas actuaciones locales y esporádicas de conservación, de poca importancia y costo.

2.3.2.2. Capa subbase.

Es la capa de la estructura de pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura de pavimento, de tal manera que la capa de subrasante la pueda soportar absorbiendo las variaciones inherentes a dicho suelo que puedan afectar a la subbase.

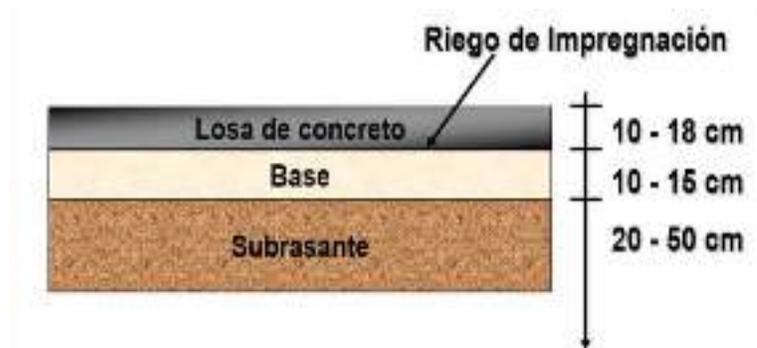
La función más importante de esta capa es impedir la acción del bombeo en las juntas, grietas y extremos del pavimento. Se entiende por bombeo la fluencia del material fino con agua fuera de la estructura del pavimento, debido a la infiltración de agua por las juntas de las losas. El agua que penetra a través de las juntas licua el suelo fino de la subrasante facilitando así su evacuación a la superficie bajo la presión ejercida por las cargas circulantes a través de las losas.

2.3.2.3. Capa subrasante.

Es la capa de terreno o suelo natural donde se encuentra el pavimento. El propósito es darle al pavimento la estabilidad requerida. El diseño del pavimento comienza con la subrasante, puesto que es el soporte de toda la estructura del pavimento.

Esta capa puede estar conformada en corte o relleno y una vez compactada debe tener las secciones transversales y pendientes especificadas en los planos finales de diseño.

Ilustración N° 4 Capas del pavimento rígido y espesores comúnmente usados.



Fuente: Pavimentos de Ing. Claudio Giordani y Ing. Diego Leone, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Rosario.

2.3.3. Cargas en el pavimento rígido.

- **Carga concentrada.** - Son cargas que se ejercen sobre una pequeña superficie (como un estante). Se requiere la carga significativa más grande. La separación entre los pilares es el espacio del pasillo, la superficie de fricción y la posición de la carga en relación a la junta.
- **Carga distribuida.** - Se asocia a mercancías apiladas en naves industriales. El diseño respectivo requiere la máxima resistencia de carga, tamaño del área, ancho del pasillo y posición de la junta horizontal.
- **Cargas lineales.** – Son cargas distribuidas en áreas estrechas (como paredes).

2.3.4. Esfuerzos en el pavimento rígido.

Los esfuerzos de toda índole que teóricamente pueden presentarse al estar expuestas a cargas, temperaturas, reacciones durante el proceso de fraguado y el comportamiento del refuerzo que lleva inmerso. (Sánchez, 2014).

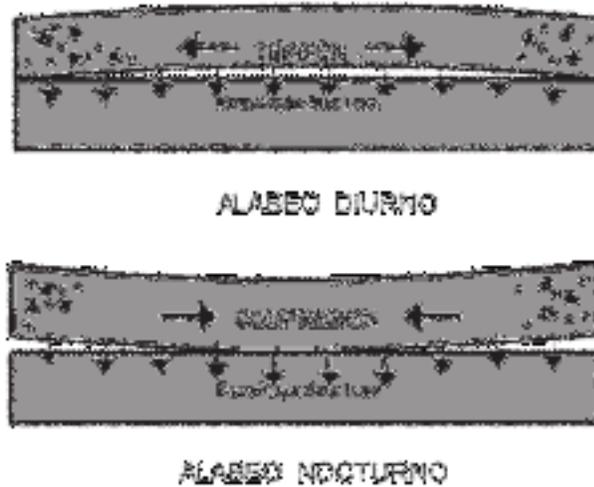
Algunos factores que causan estrés en pavimentos rígidos:

- Variación de temperatura
- Variación de humedad.
- Transporte de carga.
- Otros (bombeo, cambios en el volumen del soporte)

2.3.4.1. Cambios de temperatura.

A medida que cambia la temperatura ambiente durante el día, también cambia la temperatura de la acera. Este ciclo térmico crea un gradiente térmico en la losa. Los degradados pueden hacer que la losa se deforme. El peso propio de la losa en sí y el contacto con la superficie de apoyo restringirán su movimiento y generarán fuerza. En función de la hora del día, dichos esfuerzos consiguen aumentar o disminuir en el impacto de la carga de tráfico.

Ilustración N° 5 Alabeo de la losa de pavimento rígido



Fuente: Sánchez, F. Esfuerzos en pavimentos rígidos.

2.3.4.2. Cambios por humedad.

Este fenómeno de mojado y mojado y secado del hormigón es similar al fenómeno que ocurre cuando se produce un gradiente térmico.

La contracción o elongación causada por cambios de humedad es menor que la contracción o elongación causada por gradientes térmicos y debe tenerse en consideración al computar las variaciones dimensionales. El gradiente de humedad en el grosor puede causar alabeos (deformaciones) en la superficie del miembro de hormigón, lo que afecta el comportamiento de los bloques colocados en esa superficie.

Ilustración N° 6 Alabeo causado por cambios de humedad.



Fuente: Becker, E. Esfuerzos en pavimentos rígidos.

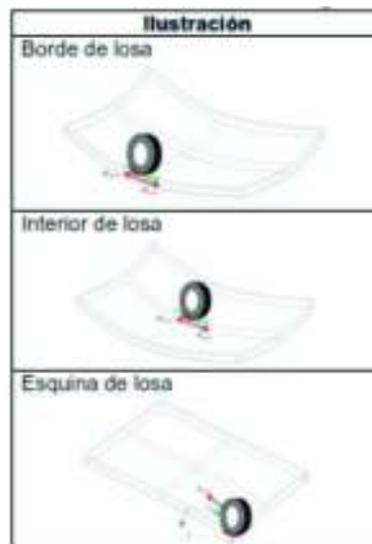
2.3.4.3. Cargas de tránsito.

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

- Fricción provocada a causa de neumáticos de vehículos.
- Esfuerzo de compresión directo y esfuerzo cortante causado por la carga de la rueda.
- La presión y tensión provocadas por la flexión de la losa bajo la cara de la rueda.
- Debido al gran impacto de la carga en la estructura, el efecto más importante causado por la carga es la flexión

A continuación, tras estudiar la tensión provocada por el impacto de la carga de la rueda sobre el pavimento de hormigón, el DR. H. M. Westergaard obtuvo el punto crítico de la posición de la carga.

Ilustración N° 7 Puntos críticos de localización de las cargas.



Fuente: Sánchez, F. Esfuerzos en Pavimentos Rígidos.

Según el manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito las variables con las que se realizaron los diferentes diseños se indican en la tabla que se presenta a continuación. En la tabla la abreviatura EALS se

refiere a la abreviatura de Equivalent Axle Load System o, el número de cargas ejercidas por ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el periodo de diseño.

Tabla 8. Variables consideradas en los análisis de diseño del pavimento

Variables y su representación				
Suelos	Tránsito	Transferencia y confinamiento	Soporte	Concreto
S1 (CBR<2)	T0 (EALS <1X10 ⁶)	D y B (Dovelas y bermas)	SN (Subrasante)	MR1=38 Mpa
S2 (2<CBR<5)	T1 (1X10 ⁶ <EALS <1.5X10 ⁶)	D y No B (Dovelas y no bermas)	BG (15 cm BG)	MR2=40 Mpa
S3 (5<CBR<10)	T2 (1.5X10 ⁶ < EALS <5X10 ⁶)	No D y B (No dovelas y bermas)	BEC (15 cm BEC)	MR3=42 Mpa
S4 (10<CBR<20)	T3 (5X10 ⁶ <EALS <9X10 ⁶)	No D y No B (No dovelas y no bermas)		MR4=45 Mpa
S5(CBR>20)	T4 (9X10 ⁶ <EALS <17X10 ⁶)			
	T5 (17X10 ⁶ <EALS <25X10 ⁶)			
	T6 (25X10 ⁶ <EALS <100X10 ⁶)			

Fuente: Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.

Donde:

Si = Clase de suelo con i variando desde 1 hasta 5

Ti = Clase de tránsito con i variando desde 0 hasta 6

SN = Suelo natural o subrasante

BG = Base granular

BEC = Base estabilizada con cemento

CBR = Relación de soporte de california

E'SAL = Ejes equivalentes definidos con el procedimiento "Equivalent Axels Load System"

2.3.5. Propiedades estructurales.

Existen 3 propiedades estructurales en el pavimento rígido de las cuales se toma con mayor relevancia al módulo de rotura puesto que el mismo nos ayuda a determinar la resistencia a flexión del pavimento rígido.

- Módulo de reacción de la subrasante (k)
- Módulo elástico del concreto
- Módulo de rotura del concreto (M_r)

2.3.5.1. Resistencia a flexión Módulo de rotura del concreto (M_r).

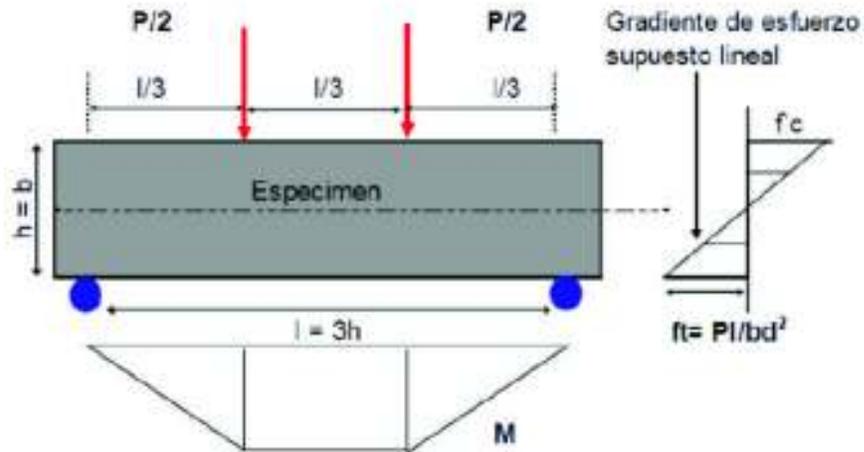
La resistencia a flexión o módulo de ruptura (M_r) es uno de los parámetros más significativos empleados para el diseño de pavimentos y losas industriales. Las diversas metodologías de diseño de pavimentos rígidos se refieren al (M_r) como parámetro principal de diseño. (Salas, 2012)

Para el diseño de carreteras rígidas, es una variable de entrada muy importante porque controlará las grietas por fatiga de la carretera causadas por cargas repetidas de camiones. También se llama resistencia a la flexión del hormigón.

Dado que el pavimento de concreto trabaja principalmente en un estado curvo, este parámetro se introduce en la ecuación AASHTO-93 y el módulo de ruptura (M_r) está estandarizado de acuerdo con ASTM C-78.

Después de 28 días, la viga debe probarse utilizando los dos tercios de la prueba de carga. De esta forma se obtiene una región que experimenta un momento flector constante igual a carga multiplicado la longitud dividida entre tres en el tercio medio, y se producirá la fractura en algún punto del tercio medio, la exclusiva situación es que exista una debilidad allí. Esta prueba se recomienda en comparación con la prueba de carga en el medio, en la que la rotura ocurre inevitablemente en el punto (punto de aplicación de la carga) en el que el momento flector es máximo.

Ilustración N° 8 Esquema de ensayo ASTM C-78



Fuente: Normas y especificaciones invias 2012

Tabla 9. Resistencias a flexión del hormigón

Descripción	Resistencia a la flexión (Kg/cm ²)
MR1	38
MR2	40
MR3	42
MR4	45

Fuente: Normas y especificaciones invias 2012

El módulo de rotura (M_r) del hormigón se relaciona con el módulo de compresión (f'_c) del hormigón mediante la siguiente ecuación:

$$M_r = K * f'_c{}^{1/2}$$

donde:

M_r = Módulo de ruptura (kg/cm²).

f'_c = Resistencia a la compresión del concreto (Kg/cm²).

$K = 2.1$ a 2.7 para resistencias en (Kg/cm²) a los 28 días.

2.4. El hormigón.

El hormigón o concreto es un material mezclado con cemento, áridos, agua y aditivos opcionales en cierta proporción, primero muestra una estructura plástica que es moldeable y luego logra una consistencia rígida con propiedades de durabilidad y resistencia, lo que lo convierte en un material apto para la construcción.

El cemento, la arena y el agua integran el mortero cuya finalidad es unir las distintas partículas de agregado grueso completando los vacíos entre ellas. La combinación de estos materiales produce una masa plástica moldeable, pero a medida que el tiempo avanza, más pierde esta propiedad y se convierte cada vez más rígido. (Carvajal, 1998)

El hormigón o concreto es un material mezclado con cemento, áridos, agua y aditivos opcionales en cierta proporción, primero muestra una estructura plástica que es moldeable y luego logra una consistencia rígida con propiedades de durabilidad y resistencia, lo que lo convierte en un material apto para la construcción.

El cemento, la arena y el agua integran el mortero cuya finalidad es unir las distintas partículas de agregado grueso completando los vacíos entre ellas. La combinación de estos materiales produce una masa plástica moldeable, pero a medida que el tiempo avanza, más pierde esta propiedad y se convierte cada vez más rígido.

La tecnología moderna del hormigón define cuatro componentes para este material: el cemento, el agua, los áridos y los aditivos que son componentes activos, mientras que el aire es un componente pasivo.

Aunque la precisión convencional trata a los aditivos como elementos opcionales, son ingredientes normales en el mundo moderno. Por lo tanto, se ha demostrado científicamente que son convenientes para mejorar las condiciones de procesabilidad, resistencia y durabilidad, de modo que a largo plazo esta es una solución más económica tomando en cuenta la el personal humano y equipos ahorrados en el empleo y compactación, conservación, reparación incluido la reducción del cemento. (Carvajal, 1998).

Ilustración N° 9 Relación de volumen típica de los materiales del hormigón



Fuente: Tópicos de tecnología del concreto, Enrique Pasquel.

Al examinar el desempeño del concreto, los ingenieros deben tener en cuenta las limitaciones de aplicar diversas variables que pueden funcionar modificando el hormigón. En este análisis, el ingeniero debe tener en cuenta que el hormigón, como cualquier otro material, cambiará con el tiempo y se tiene que considerar los problemas de durabilidad, aun cuando su resistencia este de acuerdo a las solicitaciones requeridas. (Carvajal, 1998)

Los materiales usados para la realización del hormigón son: el cemento portland, agregado grueso, agregado fino y agua, los cuales según normativa ASTM deben cumplir ciertas características.

2.4.1. Cemento.

Es un aglomerante hidrófilo, resultante de la calcinación y molienda de calizas, areniscas y arcillas que, mezclado con pequeñas cantidades de yeso, y en presencia de agua endurece con el tiempo.

Existen dos tipos de cementos entre los cuales tenemos:

- Cementos Pórtland
- Cementos Adicionados

2.4.1.1. Composición del cemento pórtland.

Como ya se ha mencionado, existen cuatro componentes que son los predominantes en el cemento:

- Silicato tricálcico, es el responsable de la resistencia inicial y tiene relación con el calor de hidratación.
- Silicato dicálcico, es el responsable de la resistencia a largo plazo, teniendo menor relación con el calor de hidratación.
- Aluminato tricálcico, con los silicatos condiciona el fraguado violento actuando como catalizador de la mezcla, y es la razón por la que se requiere la presencia de yeso (3-5%) para el control del fraguado violento. Es el responsable además del comportamiento del cemento a hacia los sulfatos, por lo que hay que limitar su contenido.
- Ferroaluminato tetracálcico, tiene implicancia con la velocidad de hidratación y con el calor de hidratación en menor grado.

2.4.1.2. Hidratación del cemento.

El agua al entrar en contacto con el cemento, desata una serie de reacciones químicas que logran la transformación de una masa plástica a un cuerpo endurecido. Este proceso recibe el nombre de hidratación.

Para valores muy bajos de relación a/c, la hidratación del cemento se detiene por falta de agua para hidratar la totalidad del cemento disponible. Si entregamos agua extra por medio de un curado adecuado, sólo se hidratar  el cemento que disponga de espacio para desarrollar los productos, por lo que existen relaciones que por más agua adicional que apliquemos no se producirá la hidratación del cemento.

En general se puede aceptar que la hidratación se realiza para una relación a/c mínima de 0.420.

2.4.1.3. Tipos de cemento y sus aplicaciones.

Existen como ya se ha mencionado Cementos Pórtland y Adicionados.

Los tipos de Cemento Pórtland se rigen bajo la norma ASTM C 150 y son:

- Tipo I, que es de uso general, donde no hay requerimientos especiales.
- Tipo II, de moderada resistencia a los sulfatos y moderado calor de hidratación. Al no generar calor abundante pueden ser empleados para vaciados masivos.
- Tipo III, desarrollan rápidamente resistencias, por lo que generan un gran calor de hidratación, por ello son utilizados en climas fríos.
- Tipo IV, de bajo calor de hidratación, inclusive menor que el tipo II, son preferentemente empleados para vaciados masivos.
- Tipo V, Alta resistencia a los sulfatos. Para ambientes agresivos.

Estos cementos pueden ser modificados mediante la adición de sustancias como puzolanas, escoria de alto horno, o filler calizo, recibiendo el nombre de Cementos Adicionados (Carvajal, 1998).

Los cementos adicionados se rigen bajo ASTM C 595, algunos de ellos son:

- Tipo IP, al que se le adicionado entre 15 y 40% del peso total en puzolana.
- Tipo IPM, al que se le ha adicionado hasta 15% de puzolana en peso.
- Tipo IS, al que se le ha adicionado entre 25 y 70% de escoria de alto horno.
- Tipo ISM, al que se le ha adicionado hasta 25% de escoria de alto horno.

En Bolivia se tiene cementos tipo “IP” los cuales son:

- Cemento Ip-30 Líder.
- Cemento Ip-30 Líder Superior.
- Cemento Ip-40 Superior.

2.4.1.3.1. Cemento Ip-30 líder.

Ilustración N° 10 Bolsa de cemento fancesa Ip-30 líder



Fuente: www.fancesa.com/producto

Este cemento se clasifica por su composición y resistencia como cemento portland con puzolana tipo IP-30, con categoría resistente mínima de 30 MPa a 28 días en mortero normalizado.

Cumple la norma americana ASTM C595, se clasifica como tipo IP – portland pozzolana cement.

Cumple la norma europea EN 197-1, corresponde al cemento CEM II/B-P.

Entre sus características se tiene:

- Elevadas resistencias mecánicas.
- Bajo calor de hidratación.
- Alta impermeabilidad en hormigones y morteros.
- Alta resistencia a ataques químicos y sulfatos.
- Mínima fisuración y retracción térmica.
- Excelente trabajabilidad y acabado de obra.
- Mayor durabilidad.
- Mínima reacción expansiva álcali/agregado.
- Ecológico y amigable con el medio ambiente.

Campo de aplicación recomendado:

- Hormigones estructurales en general de viviendas y edificios.
- Hormigones en masa.
- Pavimentos rígidos.
- Suelo-Cemento.
- Obras Hidráulicas.
- Hormigones y morteros para ambientes agresivos y cuando se requiera alta impermeabilidad.
- Muros, revoques y pisos.

2.4.1.3.2. Cemento Ip-40 superior.

Ilustración N° 11 Bolsa de cemento fancesa Ip-40 Superior



Fuente: www.fancesa.com/producto

Se clasifica por su composición y resistencia como cemento portland con puzolana tipo IP-40, con categoría resistente mínima de 40 MPa a 28 días en mortero normalizado.

Cumple la norma americana ASTM C595, se clasifica como tipo IP – portland pozzolana cement.

Cumple la norma europea EN 197-1, corresponde al cemento CEM II/A-P.

Entre sus características se tiene:

- Altas resistencias iniciales
- Menor tiempo de fraguado

- Hormigones impermeables
- Resistente a ataques químicos
- Buena trabajabilidad
- Hormigones durables
- Moderada reacción expansiva álcali/agregado.

Campo de aplicación recomendado:

- Hormigones estructurales de alta resistencia inicial
- Hormigones para desencofrados rápidos
- Elementos pre y post tensados
- Prefabricados de hormigón
- Hormigones proyectados (Shotcrete).

2.4.2. Agregados.

Se definen como los elementos inertes del concreto que son aglomerados por la pasta de cemento para formar la estructura resistente. Ocupan alrededor de las $\frac{3}{4}$ partes del volumen total y tienen una importancia primordial en el producto final.

La denominación de inertes es relativa, porque si bien no intervienen directamente en las reacciones químicas entre el cemento y el agua, para producir el aglomerante o pasta de cemento, sus características afectan notablemente el producto resultante, siendo en algunos casos tan importantes como el cemento para el logro de ciertas propiedades particulares de resistencia, conductibilidad, durabilidad, etc.

Están constituidos usualmente por partículas minerales de arenisca, granito, basalto, cuarzo o combinaciones de ellos, y sus características físicas y químicas tienen influencia en prácticamente todas las propiedades del concreto.

La distribución volumétrica de las partículas tiene gran trascendencia en el concreto para obtener una estructura densa y eficiente, así como una trabajabilidad adecuada. Está científicamente demostrado que debe haber un ensamble casi total entre las partículas, de manera que las más pequeñas ocupen los espacios entre las mayores y el conjunto este unido por la pasta de cemento. (Carvajal, 1998)

2.4.2.1. Agregado grueso.

Se define como agregado grueso al material retenido en el tamiz 4.75mm. (N^o4). Dicho agregado deberá proceder fundamentalmente de la trituración de roca o de grava o por una combinación de ambas; sus fragmentos deberán ser limpios, resistentes y durables, sin exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables.

Estará exento de polvo, tierra, terrones de arcilla u otras sustancias objetables que puedan afectar adversamente la calidad de la mezcla. No se permite la utilización de agregado grueso proveniente de escorias de alto horno.

La gradación del material deberá cumplir lo establecido en la norma invias en su ART.500 del capítulo 5, o en la norma ASTM C-33 las cuales se presenta tabla 10. Es recomendable tener en consideración los siguiente:

- La granulometría seleccionada deberá ser de preferencia continua.
- La granulometría seleccionada deberá permitir obtener una máxima densidad del concreto, con una adecuada trabajabilidad y consistencia en función de las condiciones de colocación de las mezclas.
- La granulometría seleccionada no deberá tener más del 5% del agregado retenido en la malla de 1 ½" y no más de 6% del agregado que pasa la malla de 1/4".

Tabla 10 Granulometrías de agregado grueso para pavimentos hormigón.

Tipo de gradación		Tamiz (mm / U.S. Standard)								
		63	50	37.5	25	19	12.5	9.5	4.75	2.36
		2 1/2"	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No.8
		% PASA								
AG 1	Fracción 1: 2 1/2" a 1"	100	90-100	37-70	0-15	-	0-5	-	-	-
	Fracción 2: 1 1/2" a No. 4	-	-	100	95-100	-	25-60	-	-	-
AG 2	Fracción 1: 2" a 3/4"	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5	-	-
	Fracción 2: 1" a No. 4	-	-	-	100	90-100	-	20-55	0-10	0-5
AG 3	Fracción 1: 1 1/2" a No. 4	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5

Fuente: Norma y especificaciones 2012 INVIA S capítulo 5.

El tamaño máximo nominal del agregado grueso no deberá ser mayor de:

- Un quinto de la menor dimensión entre caras de encofrados; o
- Un tercio del peralte de las losas; o
- Tres cuartos del espacio libre mínimo entre barras o alambres individuales de refuerzo; paquetes de barras; torones; o ductos de prees fuerzo.

El agregado grueso empleado en concreto para pavimento, o en estructuras sometidas a procesos de erosión, abrasión o cavitación, no deberá tener una pérdida mayor del 50% en el ensayo de abrasión realizado de acuerdo a las Normas ITINTEC 400.019 ó 400.020, o a la Norma ASTM C 131.

El lavado de las partículas de agregado grueso se deberá hacer con agua preferentemente potable. De no ser así, el agua empleada deberá estar libre de sales, materia orgánica, o sólido en suspensión.

2.4.2.2. Agregado fino.

Se define como agregado fino a aquel, proveniente de la desintegración natural o artificial de las rocas, que pasa el Tamiz ITINTEC 9.5 mm (3/8”).

El agregado fino puede consistir de arena natural o manufacturada, o una combinación de ambas. Sus partículas limpias, de perfil preferentemente angular, duras, compactas y resistentes.

El agregado fino deberá estar libre de cantidades perjudiciales de polvo, terrones, partículas escamosas o blandas, esquistos, pizarras, álcalis, materia orgánica, sales, u otras sustancias dañinas.

La gradación del material deberá cumplir lo establecido en la norma invias en su ART.500 del capítulo 5, o en la norma ASTM C-33 las cuales se presenta tabla 11. Es recomendable tener en consideración los siguiente.

- La granulometría seleccionada deberá ser preferentemente continua, con valores retenidos en las mallas N°4, N°8, N°16, N°30, N°50 y N°100 de la serie de Tyler.

- El agregado no deberá retener más del 45% en dos tamices consecutivos cualesquiera.
- El agregado fino deberá estar libre de materia orgánica.

Tabla 11 Granulometría de agregado fino para pavimentos de hormigón.

Tipo de gradación	Tamiz (mm / U.S. Standard)						
	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150
	3/8"	N° 4	N° 8	N° 16	N° 30	N° 50	N° 100
% PASA							
Única	100	95-100	80-100	50-85	25-60	05-30	2-10

Fuente: Norma y especificaciones 2012 INVIAS capítulo 5.

El módulo de fineza del agregado fino se mantendrá dentro del límite de más o menos 0.200 del valor asumido para la selección de las proporciones del concreto, siendo recomendable que el valor asumido este entre 2.300 y 3.100.

Si se excede el límite indicado de más o menos 0.200, el agregado podrá ser rechazado por la inspección o, alternativamente, ésta podrá autoriza ajustes en las proporciones de la mezcla para compensar las variaciones en la granulometría. Estos ajustes no deberán significar reducciones en el contenido de cemento.

2.4.3. Agua.

El agua empleada en la preparación y curado del concreto deberá cumplir los requisitos establecidos en el numeral 630.2.3 del artículo 630 y ser de preferencia potable. (Vias, 2012).

Está prohibido el empleo de aguas ácidas; calcáreas; minerales; carbonatadas; aguas provenientes de minas o relaves; aguas que contengan residuos minerales o industriales; aguas con un contenido de sulfatos mayor del 1%; aguas que contengan algas, materia orgánica, humus, o descargas de desagües; aguas que contengan azúcares o sus derivados.

Igualmente está prohibido el empleo de aquellas aguas que contengan porcentajes significativos de sales de sodio o de potasio disueltas, en todos aquellos casos en que la reacción álcali-agregado es posible.

Podrá utilizarse aguas naturales no potables, previa autorización de la inspección, únicamente si:

- Están limpias y libres de cantidades perjudiciales de aceites, ácidos, álcalis, sales, materia orgánica, u otras sustancias que puedan ser dañinas al concreto, acero de refuerzo, o elementos embebidos.

Al seleccionar el agua deberá recordarse que aquellas con alta concentración de sales deberán ser evitadas. Ello debido a que puedan afectar el tiempo de fraguado, la resistencia del concreto y su estabilidad del volumen, sino que, adicionalmente, pueden originar eflorescencias o corrosión del acero de refuerzo.

- La calidad del agua, determinada mediante análisis de laboratorio, cumple con los valores que a continuación se indican; debiendo ser aprobados por la inspección las excepciones a los mismos.

Tabla 12 Límites permisibles máximo del agua.

Descripción	Límite permisible
Sólidos en suspensión	5000 o.p.m. máximo
Materia orgánica	3 p.p.m. máximo
Alcalinidad (NaHCO ₃)	1000 p.p.m. máximo
Sulfato (Ion SO ₄)	600 p.p.m. máximo
Cloruros (Ion Cl)	1000 p.p.m. máximo
Ph	5 a 8

Fuente: NTP .339.088

2.5. Fibras.

Las fibras son elementos delgados y alargados naturales o artificiales que se introducen en la mezcla del concreto como un refuerzo, para evitar los agrietamientos que tienden a producirse por contracción de fragua y por cambios de temperatura, así como para mejorar algunas de sus propiedades como son: su impermeabilidad, su resistencia a los impactos y a la abrasión, su resistencia a la flexión, su resistencia al corte y su durabilidad.

Teniendo en cuenta que los pavimentos de concreto reforzado pueden ser:

- Pavimentos con refuerzo continuo, en los que la armadura cumple una función estructural.

- Pavimentos con acero de refuerzo, en los que la armadura no cumple una función estructural.

Es posible considerar a los pavimentos con fibras como pavimentos reforzados en los que las fibras son colocados para reemplazar al acero, pero que pueden servir también para mejorar algunas propiedades estructurales del conjunto.

A nivel mundial, las primeras sugerencias en el sentido de que las propiedades del concreto podrían mejorarse con la adición de fibras 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 como elementos inhibidores del agrietamiento.

Las construcciones de losas apoyadas sobre el suelo que representa una de las principales aplicaciones del concreto reforzado con fibras, las mismas que se pueden adoptar en conjunto con el concreto, ya que de esta manera se forma este nuevo material con características adicionales. Esta nueva responsabilidad estructural que no es considerada en el diseño convencional de este tipo de elementos.

En estas estructuras, las fibras pueden sustituir el refuerzo convencional sea por retracción como por capacidad a flexión con significativas ventajas en términos de tenacidad y esfuerzo bajo cargas estáticas y dinámicas.

Desafortunadamente, a pesar del uso cada vez más creciente de los hormigones con fibras no existe, a nivel normativo, una instrucción que permita establecer un marco de referencia para la adición apropiada de fibras en los hormigones para poder evitar contratiempos durante la preparación, manejo y colado. (Vales Pacheco, 2020).

2.6. Polietileno de tereftalato (PET).

Es un tipo de materia prima plástica proveniente del petróleo. Se compone de petróleo crudo, aire y gas. Según ALIPLAST (Asociación Latinoamericana de la Industria Plástica), un kilogramo de plástico PET está conformado por 13% de aire, 23% de gas natural en forma líquida y 64% de petpetróleo. (Rendón, 2008)

El plástico PET es un material plástico que se utiliza para fabricar contenedores de agua mineral y envases de bebidas carbonatadas. Estas botellas son usar y tirar desechables, por

lo que su paradero final es un tacho y en consecuencia también en un vertedero. (Rendón, 2008)

Existen diferentes grados de PET, los cuales se diferencian por su peso molecular y cristalinidad en general, estos se caracterizan por su elevada pureza, ligereza, alta resistencia y tenacidad. De acuerdo con su dirección presenta propiedades de transparencia y resistencia química.

En la actualidad existe un sistema de identificación de envases en función al tipo de plástico al cual pertenecen, este sistema se presenta en la tabla que se encuentra a continuación.

Tabla 13. Sistema de identificación de envases PET.

Símbolo	Tipo de plástico	Propiedades	Usos comunes
	PET Polietileno Tereftalato (Polyethylene Tephthalate)	Contacto alimentario, resistencia física, propiedades térmicas, propiedades barreras, ligereza y resistencia química.	Bebidas, refrescos y agua, envases para alimentos (aderezos, mermeladas, jaleas, cremas, farmacéuticos, etc.)
	HDPE Polietileno de alta densidad (High Density Polyethylene)	Poco flexible, resistente a químicos, opaco, fácil de pigmentar, fabricar y manejar. Se suaviza a los 75°C.	Algunas bolsas para supermercado, bolsas para congelar, envases para leche, helados, jugos, shampoo, químicos y detergentes, cubetas, tapas, etc.
	PVC Policloruro de vinilo (Plasticised Polyvinyl Chloride PCV-P)	Es duro, resistente, puede ser claro, puede ser utilizado con solventes, se suaviza a los 80°C. Flexible, claro, elástico, puede ser utilizado con solventes.	Envases para plomería, tuberías, "blistes packs", envases en general, mangueras, suelas para zapatos, cables, correas para reloj.
	LDPE Polietileno de baja densidad (Low density Polyethylene)	Suave, flexible, traslucido, se suaviza a los 70°C, se raya fácilmente.	Película para empaque, bolsas para basura, envases para laboratorio.

	PP Polipropileno (Polypropylene)	Difícil pero aún flexible, se suaviza a los 140°C, Traslucido, soporta solventes, versátil.	Bolsas para frituras, popotes, equipo para jardinería, cajas para alimentos, cintas para empacar, envases para uso veterinario y farmacéutico.
	PS Poliestireno (Polystyrene)	Claro, rígido, opaco, se rompe con facilidad, se suaviza a los 95°C. Afectado por grasas y solventes.	Cajas para discos compactos, cubiertos de plástico, imitaciones de cristal, juguetes, envases cosméticos.
	PS-E Poliestireno Expandido (Expanded Polystyrene)	Esponjoso, ligero, absorbe energía, mantiene temperaturas.	Tazas para bebida calientes, charolas de comida para llevar, envases de hielo seco, empaques para proteger mercancía frágil.
	OTHER otros (SAN, ABS, PC, Nylon)	Incluye de muchas otras resinas y materiales. Sus propiedades dependen de la combinación de los plásticos	Auto partes, hielereas, Electrónicos, piezas para empaques.

Fuente: (Méndez, 2012)

El PET es un elemento fuerte, duro y de tamaño constante que apenas absorbe agua. Tiene una alta resistencia a ácidos débiles, soluciones acuosas, productos de limpieza, álcalis y gasolina. Adicionalmente, tiene buenas propiedades eléctricas, incorporando una constante dieléctrica solididad, alta resistencia dieléctrica, y un bajo factor de disolución, entre otras. Su composición varía de cristalino a amorfo. En ocasiones en secciones delgadas puede presentarse transparente e incoloro, pero generalmente es blanquecino y opaco en partes gruesas.

Así también, este plástico también es muy sensible a oxidantes alcalinos y álcalis de altas temperatura. Dentro las características y propiedades de este material tenemos:

- Alta traslucides, y acepta algunos colorantes.
- Posee características beneficiosas en deformación a largo plazo (fluencia).

- Zonas duras (posiblemente pulidas).
- Elevada seguridad dimensional.
- Gran rigidez y resistencia.
- Alta resistencia química y térmica.
- Bajas propiedades eléctricas.
- Reutilizable y reciclable, sin embargo, tiende a reducir su viscosidad.

Para generar plástico PET reciclado los procedimientos mecánicos son fundamentales, así como para la variedad de plásticos. Los plásticos componen un porcentaje significativo de los desechos y entre ellos, el PET es el más popular. Por tanto, en la mayoría de los casos, se trata de reciclar botellas de PET obtenidas a granel, en fardos o rumas.

Ilustración N° 12 Puntos de reciclaje de envases PET de fábricas de cementos.



Fuente: Elaboración Propia.

2.6.1. Proceso de elaboración de fibra de polietileno de tereftalato (PET).

Las fibras usadas son de la empresa “Peregrino Soluciones Ambientales”, dicha empresa produce las fibras para la construcción de escobas reciclables, esto en el departamento de Tarija.

Dicha empresa sigue un procedimiento para la fabricación de las fibras las cuales son:

- Almacenamiento; las botellas de PET que se utilizan para el reciclaje provienen de los programas de acopio y recolección en las calles, por lo que trabajan en conjunto para mantener las calles limpias, reduciendo así la cantidad de desperdicios que llegan al basurero. Idealmente, los consumidores deberían realizar la disgregación de la basura, previo al recojo de los residuos y una vez separados debidamente llevarlos a los centros de recolección, a falta de una cultura de reciclaje, el papel de los acopiadores es esencial.

Ilustración N° 13 Almacenamiento de botellas PET.



Fuente: Elaboración propia.

- Limpieza; la empresa una vez obtenida las botellas de PET, procede a lavarlas con detergente para así sacar cualquier impureza que pueda tener la misma, esto en bañadores grandes y con cepillos. Posterior al lavado pasan las botellas a secar siendo estas apiladas una encima de otra sin aplastarlas para al final pasar al proceso de fileteado.

Ilustración N° 14 Proceso de lavado y secado de las botellas PET.



Fuente: Elaboración propia.

- Fileteado y obtención de hilo de PET; este proceso de fileteado se lo realiza en una maquina especial la misma que fue fabricada de forma empírica por la empresa, es semiautomática puesto que dicha maquina tiene que ser operada por una persona y el proceso de fileteado para obtener el hilo de PET, se lo realiza botella por botella.

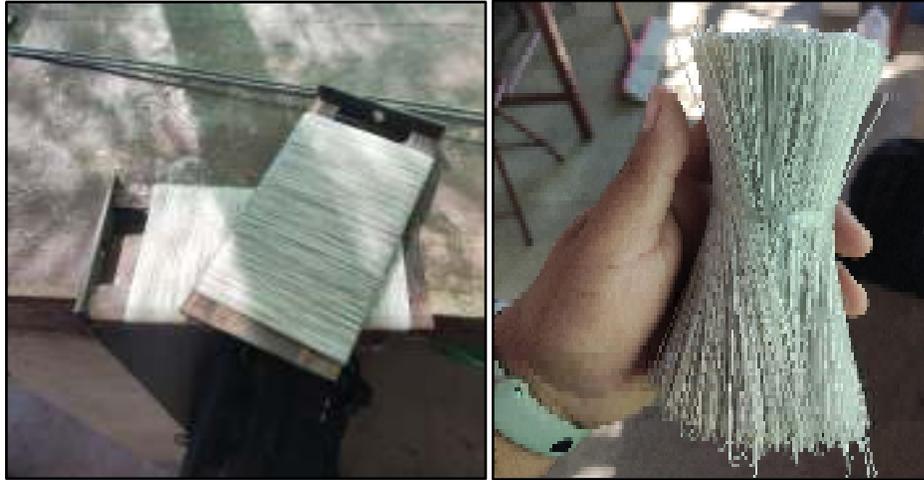
Ilustración N° 15 Proceso de fileteado y obtención de hilo de PET.



Fuente: Elaboración propia.

- Fibras de PET; luego de obtener el hilo de PET en una madeja circular, este hilo va a moldes que le dan el tamaño respectivo de 14 cm de largo. Una vez el hilo se encuentra en la madeja este va al horno para su templado y cortado de esta forma se obtiene la fibra de PET que posee en sus extremos ganchos de sujeción.

Ilustración N° 16 Proceso de templado y obtención de fibras de PET.



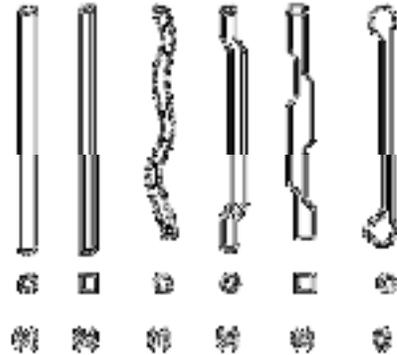
Fuente: Elaboración Propia.

Por último, las fibras de plástico PET son componentes de larga o reducida extensión y estrecha fracción que se añaden a la mezcla de hormigón que proporcionan algunos atributos específicos. La eficacia del refuerzo de fibras de matriz requiere que las fibras tengan siguientes características:

- La resistencia a la tracción es más elevada que la del concreto común.
- La adherencia al sustrato es igual o mayor que la resistencia a la tracción del sustrato.
- Las fibras de refuerzo pueden adoptar muchas formas diferentes: rectos, ondulados, con puntas, dientes y muchas formas más.

Ilustración N° 17 Forma de fibras

a) sección circular, b) sección rectangular, c) ondulada, d) extremos conformados, e) extractos fundidos y f) extremos ensanchados.



Fuente: (Méndez, 2012)

El tereftalato de polietileno (PET) es uno de los plásticos de mayor importancia en la industria manufacturera. A causa de su excelente beneficio, modesto precio y reciclabilidad, es uno de los materiales más atractivos para ser utilizados en formas de fibras.

Los materiales formados con fibra plástica (PET) como elementos de refuerzo son muy convenientes debido a su simplicidad de elaboración, precio y excelentes propiedades mecánicas.

CAPITULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA

3.1. Ubicación geográfica.

3.1.1. Ubicación en el contexto nacional.

El departamento de Tarija, se encuentra ubicado al sur de Bolivia, limita al Norte con el departamento de Chuquisaca, al sur con la Republica de Argentina, al Este con la República del Paraguay y al Oeste con los departamentos de Chuquisaca y Potosí.

Ilustración N° 18 Mapa político del Estado Plurinacional de Bolivia



Fuente: <https://bo.reyqui.com/2012/10/mapa-politico-de-bolivia.html>.

3.1.2. Ubicación en el contexto departamental.

La provincia de Cercado, se sitúa al noreste del departamento de Tarija, entre los paralelos de 20°56'; 21°36' de latitud Sur y los 64°05'; 65°13' de longitud Oeste, tiene una extensión de 4861 km².

Ilustración N° 19 Mapa político del departamento de Tarija



Fuente: <https://bo.reyqui.com/search/label/Tarija%20Bolivia>.

3.1.3. Ubicación en el contexto regional.

El proyecto de investigación se encuentra ubicado en la ciudad de Tarija en el campus universitario de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho en el laboratorio de Resistencia de Materiales.

Ilustración N° 20 Mapa de la provincia Cercado



Fuente: <http://www.educa.com.bo/sites/default/files/tarija-provincia-Cercado-0116.jpg>.

3.1.4. Ubicación del banco de materiales.

Los materiales se extrajeron del banco de materiales de Charajas. La misma se encuentra ubicada en la carretera a Chaguaya a 41km. del centro de la ciudad de Tarija. De donde se extrajo grava y arena chancada o triturada para la realización de la presente investigación.

Ilustración N° 21 Carretera hacia banco de materiales Charajas.



Fuente: <https://www.GoogleEarth.jpg>.

Ilustración N° 22 Planta de acopio de materiales Charajas.



Fuente: <https://www.GoogleEarth.jpg>.

3.2. Materiales usados.

3.2.1. Muestreo de agregados.

Para la extracción de los agregados se lo realizo mediante método convencional con la ayuda de una pala realizando de la extracción de la parte superior, medio e inferior del banco de material, esto con la finalidad que la muestra sea lo más homogénea posible.

La muestra se la puso en bolsas de azúcar, posteriormente se las cargo a un vehículo tipo jeep para trasladar las mismas hasta el laboratorio de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Ilustración N° 23 Extracción de agregado fino



Fuente: Elaboración Propia.

Ilustración N° 24 Extracción de agregado grueso.

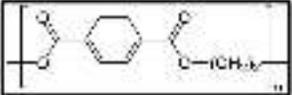


Fuente: Elaboración Propia.

3.2.2. Fibras de polietileno de tereftalato (PET).

Las fibras de usadas en la investigación fueron adquiridas de la empresa “Peregrino Soluciones Integrales”. Las mismas tienen un costo de 35 bs el kilo y poseen las siguientes características.

Ilustración N° 25 Ficha técnica de fibras de polietileno de tereftalato (PET)

	Peregrino Soluciones Ambientales	
	(Asociación Ambiental, Venta de botellas de plástico de PET)	
	(Dirección: Av. La Tercera 71, Ciudad Nueva, Teléfono: 71677799, correo electrónico: solucionesambientales2015@gmail.com)	
Fibras de Polietileno de Tereftalato (PET)		
<p>Las fibras de Polietileno de Tereftalato (PET) viene del reciclado de botellas de PET, las cuales antes de ser convertidas a Fibras pasan por un proceso de selección y limpieza muy estricto, de esta forma obtener fibras de buena calidad. Las fibras de Pet poseen propiedades térmicas, de buena, ligereza, alta resistencia química y física las cuales se presentan a continuación.</p>		
Propiedades		
Densidad amorfa	1.370 g/cm ³	
Densidad cristalina	1.425 g/cm ³	
Módulo de Young (E)	2600-3100 MPa	
Presión	55-75 MPa	
Límite elástico	50-150 %	
Prueba de impacto	3.600 KJ/m ²	
Prueba de fractura y ruptura	14.890 N/m ²	
Temperatura de transición vítrea	75.0 °C	
Punto de fusión	260.0 °C	
Vicat H	170.0 °C	
Conductividad térmica	0.240 W/(m·K)	
Coefficiente de dilatación lineal	7*10 ⁻⁵ /K	
Calor específico Cp	1.000 KJ/(Kg*K)	
Absorción de agua (ASTM)	0.160	
Índice de refracción	1.575	
Reciclaje		
17 botellas enteras de PET es el equivalente a 1 kilo		
27 - 30 botellas post preparación es el equivalente a 1 kilo de fibra de PET		
Capacidad de procesamiento de la empresa es de 500 botellas/DIA.		
Costo del kilo de Fibra de Polietileno de Tereftalato es de 35 bs		
Dimensiones		
Largo	l	14 cm
espesor	c	1 mm
Largo de ganchito	L _R	1 mm
Fórmula Molecular		
		
(C ₁₀ H ₈ O ₄) _n		

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Lavado de material.

Una vez obtenido el material se procedió a la limpieza del mismo esto con ayuda de una carpa y un bañador sacando todo el material en suspensión que pueda tener el mismo y todas las partículas de polvo o arcilla. Pasado esto el material fue extendido en la carpa para su secado y posterior colocado en bolsas para ser llevadas a laboratorio y realizar los ensayos correspondientes.

Ilustración N° 26 Proceso de lavado del material



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 27 Proceso de secado del material



Fuente: Elaboración propia.

3.3. Ensayos de Laboratorio.

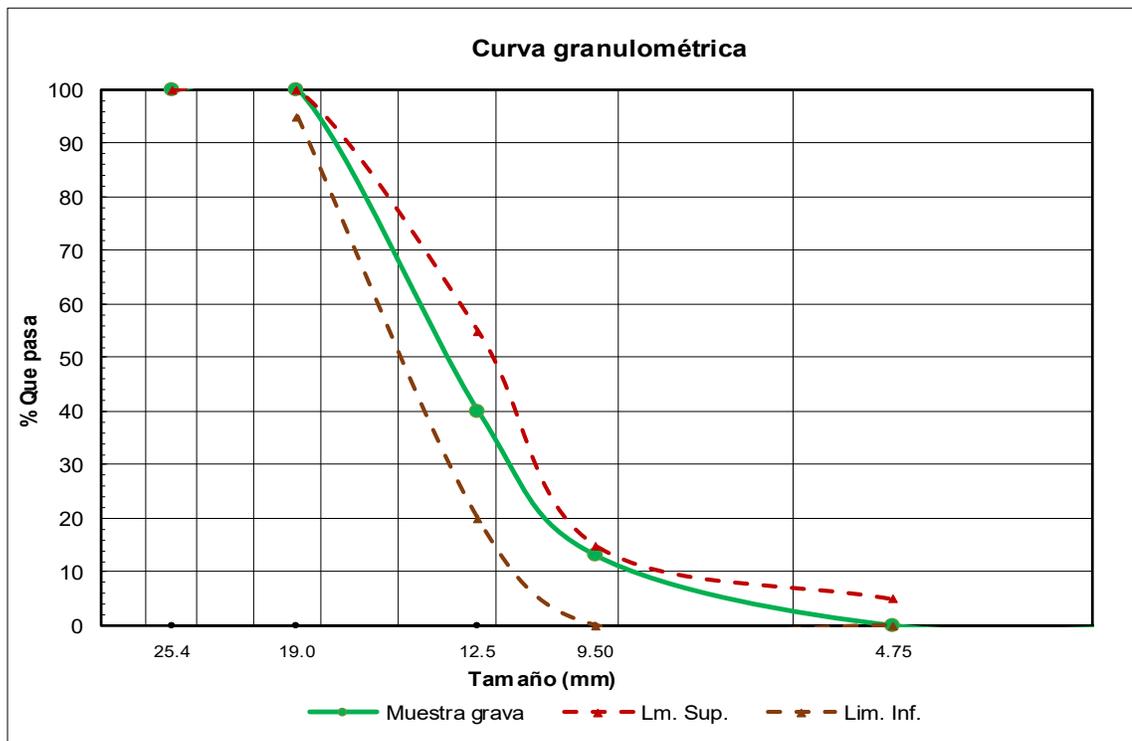
3.3.1. Ensayo de granulometría.

Tabla 14. Análisis granulométrico de la grava

Análisis granulométrico										
Tamices		Grava 3/4"							Especificaciones	
		MT=5000 gr								
(pulg)	(mm)	Peso ret. (gr)	Peso ret. (gr)	Peso ret.(gr)	Prom. ret. (gr)	Ret. acum. (gr)	% Ret.	% Que pasa	Lim. inf.	Lim. sup.
1"	25.400	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000		100
3/4"	19.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000	95	100
1/2"	12.500	2998.800	2980.800	3002.500	2994.030	2994.030	59.880	40.120	20	55
3/8"	9.500	1339.200	1382.800	1323.600	1348.530	4342.570	86.850	13.150	0	15
Nº4	4.750	657.800	632.200	670.800	653.600	4996.170	99.920	0.080	0	5
Nº8	2.360	4.100	3.800	2.500	3.470	4999.630	99.990	0.010	-	-
Base		0.000	0.000	0.000	0.000	4999.630	99.990	0.010	-	-
Perdida		0.100	0.400	0.600	-	-	-	-	-	-
Módulo de finura					-	-	3.470	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 1 Curva granulométrica del agregado grueso (grava)



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 28 Cuarteo y pesado de la grava



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 29 Proceso de tamizado de la grava



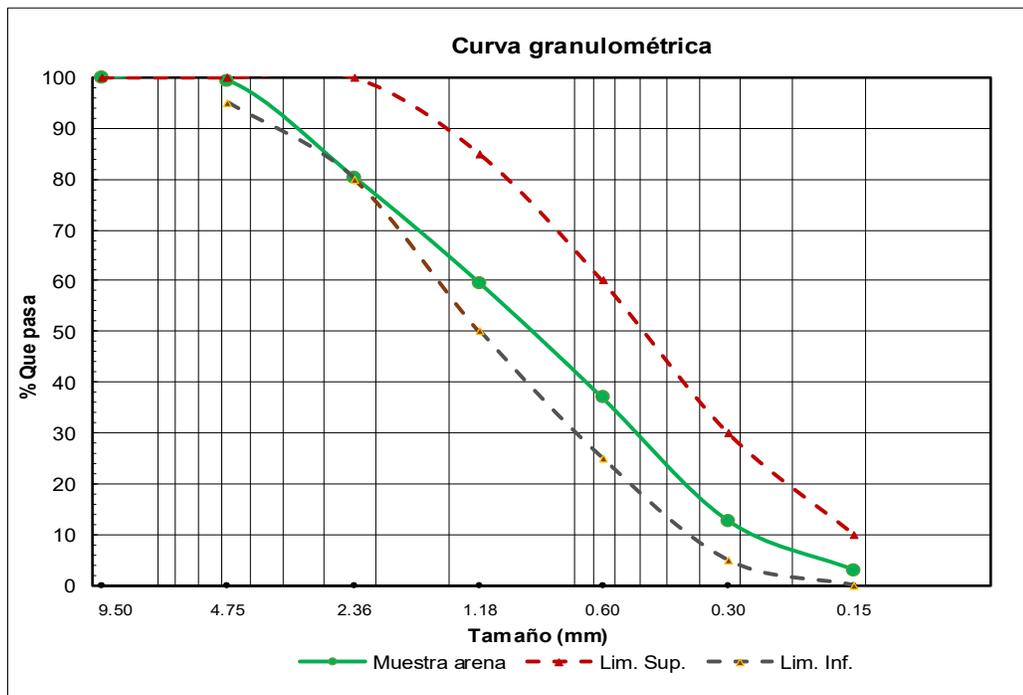
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Análisis granulométrico de la arena

Análisis granulométrico										
Tamices		Arena N° 4							Especificaciones	
		MT=1000 gr								
(pulg)	(mm)	Peso ret. (gr)	Peso ret. (gr)	Peso ret.(gr)	Prom. ret. (gr)	Ret. acum. (gr)	% Ret.	% que pasa	Lim. inf.	Lim. sup.
3/8"	9.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000	-	100
N°4	4.750	7.500	5.000	5.500	6.000	6.000	0.600	99.400	95	100
N°8	2.360	195.100	190.400	185.400	190.300	196.300	19.630	80.370	80	100
N°16	1.180	206.100	210.700	209.200	208.670	404.970	40.500	59.500	50	85
N°30	0.600	220.000	230.000	225.000	225.000	629.970	63.000	37.000	25	60
N°50	0.300	250.200	245.000	232.400	242.530	872.500	87.250	12.750	5	30
N°100	0.150	97.600	98.400	95.800	97.270	969.770	96.980	3.020	0	10
Base		22.600	20.000	45.800	29.470	999.230	99.920	0.080	-	-
Perdida		0.900	0.500	0.900		999.230	99.920	-	-	-
Módulo de finura					-	-	3.000	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 2 Curva granulométrica del agregado fino (arena)



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 30 Pesado de material fino



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 31 Proceso de tamizado de material fino



Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Ensayo desgaste máquina de los ángeles.

Tabla 16. Grados de ensayo (definidos por sus rangos de tamaño, en mm)

Gradación		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear (gr)			
PASA	RETENIDO				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
Peso total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Numero de esferas		12	11	8	6
N°de revoluciones		500	500	500	500
Tiempo de rotación		15	15	15	15

Fuente: Manual Carreteras V48 (Norma ABC).

Tabla 17. Resultados del ensayo (ASTM C 131)

Gradación	Retenido tamiz	Peso retenido (gr)	Carga abrasiva
B	1/2"	2500.500	11 esferas a 32.500 Rpm 500 revoluciones
	3/8"	2501.100	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18. Resultados finales del ensayo (ASTM C 131)

Gradación	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	Desgaste (%)	Especificación
B	5001.600	3764.700	24.730	Máximo 35 %

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 32 Ensayo de desgaste mediante la máquina de los ángeles



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 33 Lavado del material para obtener resultados finales.



Fuente: Elaboración propia.

3.3.3. Ensayo peso específico en el agregado grueso.

Tabla 19. Peso de muestras para determinación de peso específico

Ensayos	1	2	3
Peso muestra seca "A" (gr)	4949.600	4940.900	4952.000
Peso muestra sat. con sup. seca "B" (gr)	5000.200	5000.500	5000.000
Peso muestra sat. dentro del agua "C" (gr)	3109.000	3106.000	3110.000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Resultados de ensayo de peso específico

Ensayos	1	2	3	Promedio
Peso específico SH (gr/cm ³)	2.620	2.610	2.620	2.620
Peso específico S.S.S (gr/cm ³)	2.640	2.640	2.650	2.640
Peso específico aparente (gr/cm ³)	2.690	2.690	2.690	2.690
Absorción (%)	1.020	1.210	0.970	1.070

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 34 Preparación del agregado grueso para ensayo de peso específico



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 35 Proceso de obtención del peso específico



Fuente: Elaboración propia.

3.3.4. Ensayo peso específico en el agregado fino.

Tabla 21. Peso de muestras para determinación de peso específico

Ensayos	1	2	3
Peso muestra seca al horno (gr)	492.800	495.100	498.600
Peso matraz + agua (gr)	736.400	736.400	736.400
Peso muestra + matraz + agua (gr)	1025.200	1028.900	1020.500
Peso muestra sat. seca (gr)	500.000	500.000	500.000
Peso matraz (gr)	236.400	236.400	236.400

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Resultados de peso específico para el agregado fino

Ensayos	1	2	3	Promedio
Peso específico SH (gr/cm ³)	2.330	2.390	2.310	2.340
Peso específico S.S.S (gr/cm ³)	2.370	2.410	2.320	2.360
Peso específico aparente (gr/cm ³)	2.420	2.440	2.320	2.390
Absorción. %	1.460	0.990	0.280	0.910

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 36 Preparación del agregado fino para ensayo de peso específico



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 37 Colocado de muestras en el horno para su posterior pesaje



Fuente: Elaboración propia.

3.3.5. Ensayo peso unitario agregado grueso.

Peso unitario suelto:

Tabla 23. Proceso de cálculo de peso unitario suelto

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm³)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso unitario suelto (gr/cm³)
1	5845.000	9897.820	19265.000	13420.000	1.360
2	5845.000	9897.820	19260.000	13415.000	1.360
3	5845.000	9897.820	19268.000	13423.000	1.360
Promedio					1.360

Fuente: Elaboración propia.

Peso unitario suelto:

Tabla 24. Proceso de cálculo de peso unitario compactado

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm³)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso unitario compactado (gr/cm³)
1	1.500	9897.820	19265.000	13420.000	1.500
2	1.500	9897.820	19260.000	13415.000	1.500
3	1.500	9897.820	19268.000	13423.000	1.500
Promedio					1.500

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 38 Proceso de pesaje del molde para el ensayo de peso unitario.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 39 Proceso de apisonado para obtención de peso unitario compactado



Fuente: Elaboración propia.

3.3.6. Ensayo peso unitario agregado fino.

Peso unitario suelto:

Tabla 25. Proceso de cálculo para peso unitario suelto agregado fino

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm ³)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso unitario suelto (gr/cm ³)
1	2605.000	3030.450	7225.000	4620.000	1.520
2	2605.000	3030.450	7231.000	4626.000	1.530
3	2605.000	3030.450	7235.000	4630.000	1.530
Promedio					1.530

Fuente: Elaboración propia.

Peso unitario compactado:

Tabla 26. Cálculo y resultados de peso unitario compactado del agregado fino

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm ³)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso unitario compactado (gr/cm ³)
1	2605.000	3030.450	7720.000	5115.000	1.690
2	2605.000	3030.450	7725.000	5120.000	1.690
3	2605.000	3030.450	7735.000	5130.000	1.690
Promedio					1.690

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 40 Proceso de obtención del peso unitario suelto



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 41 Apisonado y pesaje de muestra para peso unitario compactado



Fuente: Elaboración propia.

3.3.7. Ensayo contenido de humedad agregado grueso y fino.

Contenido de humedad agregado grueso:

Tabla 27. Proceso de cálculo del contenido de humedad del agregado grueso.

Descripción	Unid.	1	2	3
Peso de la muestra húmeda	gr	500.200	500.000	500.100
Peso de la muestra seca	gr	498.300	498.300	498.800
Peso del agua contenida	gr	1.900	1.700	1.300
Porcentaje de humedad	gr	0.380	0.340	0.260
Promedio		0.330		

Fuente: Elaboración propia.

Contenido de humedad agregado fino:

Tabla 28. Proceso de cálculo del contenido de humedad del agregado fino.

Descripción	Unid.	1	2	3
Peso de la muestra húmeda	gr	300.200	300.100	300.200
Peso de la muestra seca	gr	298.800	298.500	298.400
Peso del agua contenida	gr	1.400	1.600	1.800
Porcentaje de humedad	gr	0.470	0.540	0.600
Promedio		0.540		

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 42 Muestra de agregado grueso para ensayo de contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 43 Muestras de agregado fino para ensayo de contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 44 Muestras luego de un día de secado en el horno



Fuente: Elaboración propia.

3.3.8. Ensayo finura del cemento.

Tabla 29. Proceso de cálculo para obtención de la finura del cemento

Muestra N°	Peso muestra (gr)	Peso ret. tamiz N° 50 (gr)	Peso ret. tamiz N° 200 (gr)	Peso pasa tamiz N° 200 (gr)	Peso no pasa tamiz N° 200 (gr)	Finura del cemento (%)
1	50.000	0.100	9.800	40.200	9.900	19.800
2	50.000	0.000	9.000	39.500	9.000	18.000
3	50.000	0.000	9.500	40.500	9.500	19.000
Promedio						18.930

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 45 Proceso de tamizado y pesaje del cemento.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 46 Peso retenido y que pasa el tamiz N°200



Fuente: Elaboración propia.

3.3.9. Ensayo peso específico del cemento.

Tabla 30. Proceso de cálculo y resultados de ensayo de peso específico del cemento.

Muestra N°	Peso muestra (gr)	Volumen inicial (ml)	Volumen final (ml)	Volumen desplazado (ml)	Peso específico (gr/cm³)
1	64.000	300.000	320.300	20.300	3.150
2	64.000	300.000	320.200	20.200	3.170
3	64.000	300.000	320.200	20.200	3.170
				Promedio	3.160

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 47 Medición de la temperatura de la gasolina.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 48 Pesado y proceso de obtención del peso específico del cemento.



Fuente: Elaboración propia.

3.4. Dosificación de mezcla de hormigón.

3.4.1. Dosificación de hormigones para pavimentos rígidos con cemento ip-30.

Proporciones de mezcla:

Cemento	Arena	Grava
1.000	1.540	1.890

Tabla 31. Proporciones en peso de materiales para moldes cilíndricos y prismáticos.

Molde cilíndrico			Molde viga		
Diámetro	Alto	Radio	Alto	Ancho	Largo
15.000	30.000	7.500	15.000	15.000	50.000
Volumen (cm³)		5301.440	Volumen (cm³)		11250.000
Probetas		1	Vigas		1
Desperdicio 1.200					
Cemento	3.020	Kg	Cemento	6.410	Kg
Agua	1.270	Kg	Agua	2.690	Kg
Grava	5.740	Kg	Grava	12.190	Kg
Arena	4.660	Kg	Arena	9.900	Kg

Fuente: Elaboración propia.

3.3.11. Dosificación de hormigones para pavimento rígido con cemento ip-40.

Proporciones de mezcla:

Cemento	Arena	Grava
1.000	1.510	1.890

Tabla 32. *Proporciones en peso de materiales para moldes prismáticos y cilíndricos.*

Molde cilíndrico			Molde viga		
Diámetro	Alto	Radio	Alto	Ancho	Largo
15.000	30.000	7.500	15.000	15.000	50.000
Volumen (cm³)		5301.440	Volumen (cm³)		11250.000
Probetas		1	Vigas		1
Desperdicio 1.200					
Cemento	3.020	Kg	Cemento	6.410	Kg
Agua	1.270	Kg	Agua	2.690	Kg
Grava	5.740	Kg	Grava	12.190	Kg
Arena	4.570	Kg	Arena	9.710	Kg

Fuente: Elaboración propia.

3.5. Ensayos para determinar la resistencia a flexo-tracción.

3.5.1. Ensayos del asentamiento del cono de abrams.

Asentamiento en muestras prismáticas con hormigón convencional:

Tabla 33. Resultados del ensayo del cono de Abrams

Nº Prob.	COD.	Edad (Días)	Fecha de vaciado	Mezcla Nro.	Temperatura ambiente °C.	Asentamiento (cm)
1	V1-SF-JOI	28	8/7/2021	1	18	7.000
2	V2-SF-JOI	28	8/7/2021	1	18	7.000
3	V3-SF-JOI	28	8/7/2021	2	18	3.900
4	V4-SF-JOI	28	8/7/2021	2	18	3.900
5	V5-SF-JOI	28	8/7/2021	3	25	6.000
6	V6-SF-JOI	28	8/7/2021	3	25	6.000
7	V7-SF-JOI	28	8/7/2021	4	25	4.400
8	V8-SF-JOI	28	8/7/2021	4	25	4.400
9	V9-SF-JOI	28	8/7/2021	5	25	7.000
10	V10-SF-JOI	28	8/7/2021	5	25	7.000
11	V11-SF-JOI	28	12/7/2021	6	20	6.500
12	V12-SF-JOI	28	12/7/2021	6	20	6.500
13	V13-SF-JOI	28	12/7/2021	7	20	5.600
14	V14-SF-JOI	28	12/7/2021	7	20	5.600
15	V15-SF-JOI	28	12/7/2021	8	20	7.100
16	V16-SF-JOI	28	12/7/2021	8	27	7.100
17	V17-SF-JOI	28	12/7/2021	9	27	4.000
18	V18-SF-JOI	28	12/7/2021	9	27	4.000
19	V19-SF-JOI	28	12/7/2021	10	27	6.000
20	V20-SF-JOI	28	12/7/2021	10	27	6.000
21	V21-SF-JOI	28	13/7/2021	11	23	6.300
22	V22-SF-JOI	28	13/7/2021	11	23	6.300
23	V23-SF-JOI	28	13/7/2021	12	23	6.500
24	V24-SF-JOI	28	13/7/2021	12	23	6.50
25	V25-SF-JOI	28	13/7/2021	13	28	6.000
26	V26-SF-JOI	28	13/7/2021	13	28	6.000
27	V27-SF-JOI	28	13/7/2021	14	28	4.500
28	V28-SF-JOI	28	13/7/2021	14	28	4.500
29	V29-SF-JOI	28	13/7/2021	15	28	7.300
30	V30-SF-JOI	28	13/7/2021	15	28	7.300

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 49 Realización del ensayo del cono de Abrams



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 50 Medición del asentamiento



Fuente: Elaboración propia.

Asentamiento en muestras prismáticas con hormigón reforzado con fibras de polietileno de tereftalato (PET) al 0.6%:

Tabla 34. Resultados de asentamiento para hormigón con 0.6% de fibra.

N° Prob.	COD.	Edad (Días)	Fecha de vaciado	Mezcla Nro.	Temperatura ambiente °C.	Asentamiento (cm)
1	V1-CF-JOI	28	8/7/2021	1	18	2.000
2	V2-CF-JOI	28	8/7/2021	1	18	2.000
3	V3-CF-JOI	28	8/7/2021	2	18	1.800
4	V4-CF-JOI	28	8/7/2021	2	18	1.800
5	V5-CF-JOI	28	8/7/2021	3	25	3.000
6	V6-CF-JOI	28	8/7/2021	3	25	3.000
7	V7-CF-JOI	28	8/7/2021	4	25	2.000
8	V8-CF-JOI	28	8/7/2021	4	25	2.000
9	V9-CF-JOI	28	8/7/2021	5	25	1.500
10	V10-CF-JOI	28	8/7/2021	5	25	1.500
11	V11-CF-JOI	28	12/7/2021	6	20	1.800
12	V12-CF-JOI	28	12/7/2021	6	20	1.800
13	V13-CF-JOI	28	12/7/2021	7	20	2.200
14	V14-CF-JOI	28	12/7/2021	7	20	2.200
15	V15-CF-JOI	28	12/7/2021	8	20	1.700
16	V16-CF-JOI	28	12/7/2021	8	27	1.700
17	V17-CF-JOI	28	12/7/2021	9	27	2.000
18	V18-CF-JOI	28	12/7/2021	9	27	2.000
19	V19-CF-JOI	28	12/7/2021	10	27	2.100
20	V20-CF-JOI	28	12/7/2021	10	27	2.100

Fuente: Elaboración propia.

Asentamiento en muestras prismáticas con hormigón reforzado con fibras de polietileno de tereftalato (PET) al 1%:

Tabla 35. Resultados del asentamiento para hormigón 1% de fibra

N° Prob.	COD.	Edad (Días)	Fecha de vaciado	Mezcla Nro.	Temperatura ambiente °C.	Asentamiento (cm)
1	V1-CF-1-JOI	28	15/7/2021	1	20	0.500
2	V2-CF-1-JOI	28	15/7/2021	1	20	0.500
3	V3-CF-1-JOI	28	15/7/2021	2	20	0.000
4	V4-CF-1-JOI	28	15/7/2021	2	20	0.000
5	V5-CF-1-JOI	28	15/7/2021	3	20	0.200
6	V6-CF-1-JOI	28	15/7/2021	3	20	0.200
7	V7-CF-1-JOI	28	15/7/2021	4	20	0.300
8	V8-CF-1-JOI	28	15/7/2021	4	20	0.300
9	V9-CF-1-JOI	28	15/7/2021	5	20	0.500
10	V10-CF-1-JOI	28	15/7/2021	5	20	0.500
11	V11-CF-1-JOI	28	15/7/2021	6	20	0.000
12	V12-CF-1-JOI	28	15/7/2021	6	20	0.000
13	V13-CF-1-JOI	28	15/7/2021	7	20	0.000
14	V14-CF-1-JOI	28	15/7/2021	7	20	0.000
15	V15-CF-1-JOI	28	15/7/2021	8	20	0.200
16	V16-CF-1-JOI	28	15/7/2021	8	25	0.200
17	V17-CF-1-JOI	28	15/7/2021	9	25	0.000
18	V18-CF-1-JOI	28	15/7/2021	9	25	0.000
19	V19-CF-1-JOI	28	15/7/2021	10	25	0.000
20	V20-CF-1-JOI	28	15/7/2021	10	25	0.000

Fuente: Elaboración propia.

Asentamiento en muestras prismáticas con hormigón reforzado con fibras de polietileno de tereftalato (PET) al 1.4%:

Tabla 36. Resultados del asentamiento para hormigón 1.4% de fibra

Nº Prob.	COD.	Edad (Días)	Fecha de vaciado	Mezcla Nro.	Temperatura ambiente °C.	Asentamiento (cm)
1	V1-CF-1.4-JOI	28	14/7/2021	1	20	0.000
2	V2-CF-1.4-JOI	28	14/7/2021	1	20	0.000
3	V3-CF-1.4-JOI	28	14/7/2021	2	20	0.000
4	V4-CF-1.4-JOI	28	14/7/2021	2	20	0.000
5	V5-CF-1.4-JOI	28	14/7/2021	3	20	0.000
6	V6-CF-1.4-JOI	28	14/7/2021	3	20	0.000
7	V7-CF-1.4-JOI	28	14/7/2021	4	25	0.000
8	V8-CF-1.4-JOI	28	14/7/2021	4	25	0.000
9	V9-CF-1.4-JOI	28	14/7/2021	5	25	0.000
10	V10-CF-1.4-JOI	28	14/7/2021	5	25	0.000
11	V11-CF-1.4-JOI	28	19/7/2021	6	19	0.000
12	V12-CF-1.4-JOI	28	19/7/2021	6	19	0.000
13	V13-CF-1.4-JOI	28	19/7/2021	7	19	0.000
14	V14-CF-1.4-JOI	28	19/7/2021	7	19	0.000
15	V15-CF-1.4-JOI	28	19/7/2021	8	19	0.000
16	V16-CF-1.4-JOI	28	19/7/2021	8	27	0.000
17	V17-CF-1.4-JOI	28	19/7/2021	9	27	0.000
18	V18-CF-1.4-JOI	28	19/7/2021	9	27	0.000
19	V19-CF-1.4-JOI	28	19/7/2021	10	27	0.000
20	V20-CF-1.4-JOI	28	19/7/2021	10	27	0.000

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 51 Medición del asentamiento a hormigón fibroso



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 52 Apisonado para ensayo de cono de abrams



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 53 Medición de asentamiento en hormigón fibroso al 1.4%



Fuente: Elaboración propia.

Asentamiento en muestras prismáticas y cilíndricas con hormigón de alta resistencia (Cemento IP-40):

Tabla 37 Asentamiento de hormigón de alta resistencia para cilindros.

Nro. Prob.	COD.	Edad (Días)	Fecha de vaciado	Mezcla Nro.	Temperatura ambiente °C.	Asentamiento (cm)
1	C1-I-40-SF-JOI	28	22/7/2021	1	25	4.500
2	C2-I-40-SF-JOI	28	22/7/2021	1	25	4.500
3	C3-I-40-SF-JOI	28	22/7/2021	1	25	4.500

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 38. Asentamiento de hormigón de alta resistencia para vigas.

Nro. Prob.	COD.	Edad (Días)	Fecha de vaciado	Mezcla Nro.	Temperatura ambiente °C.	Asentamiento (cm)
1	V1-I-40-SF-JOI	28	22/7/2021	1	25	4.000
2	V2-I-40-SF-JOI	28	22/7/2021	1	25	4.000
3	V3-I-40-SF-JOI	28	22/7/2021	2	25	4.000

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2. Ensayos de resistencia a flexión de probetas prismáticas.

Para este ensayo se tomó diferentes muestras como son las con hormigón convencional, con fibra de polietileno de tereftalato (PET) y con hormigón de alta resistencia. Los resultados se presentan en las tablas siguientes.

Vigas prismáticas con hormigón convencional.

Tabla 39. Resultados de resistencia a flexión en vigas con hormigón convencional.

N° prob.	COD.	Edad (Días)	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Longitud cm	Altura cm	Base cm	Carga de rotura (KN)	Carga Kgf.	Tensión de rotura (Kg/cm ²)	Resistencia Mpa.
1	V1-SF-JOI	28	8/7/2021	5/8/2021	50.300	15	15	27.500	2804.220	37.390	3.670
2	V2-SF-JOI	28	8/7/2021	5/8/2021	50.000	15	15	27.200	2773.620	36.980	3.630
3	V3-SF-JOI	28	8/7/2021	5/8/2021	51.000	15	15	30.100	3069.340	40.920	4.010
4	V4-SF-JOI	28	8/7/2021	5/8/2021	50.500	15	15	30.500	3110.130	41.470	4.070
5	V5-SF-JOI	28	8/7/2021	5/8/2021	50.000	15	15	28.700	2926.580	39.020	3.830
6	V6-SF-JOI	28	8/7/2021	5/8/2021	50.600	15	15	29.000	2957.170	39.430	3.870
7	V7-SF-JOI	28	8/7/2021	5/8/2021	50.800	15	15	30.300	3089.740	41.200	4.040
8	V8-SF-JOI	28	8/7/2021	5/8/2021	51.200	15	15	31.000	3161.120	42.150	4.130
9	V9-SF-JOI	28	8/7/2021	5/8/2021	50.800	15	15	28.000	2855.200	38.070	3.730
10	V10-SF-JOI	28	8/7/2021	5/8/2021	51.100	15	15	27.100	2763.430	36.850	3.610
11	V11-SF-JOI	28	12/7/2021	9/8/2021	51.000	15	15	27.900	2845.000	37.930	3.720
12	V12-SF-JOI	28	12/7/2021	9/8/2021	50.700	15	15	28.000	2855.200	38.070	3.730
13	V13-SF-JOI	28	12/7/2021	9/8/2021	50.600	15	15	30.000	3059.140	40.790	4.000
14	V14-SF-JOI	28	12/7/2021	9/8/2021	50.800	15	15	31.000	3161.120	42.150	4.130
15	V15-SF-JOI	28	12/7/2021	9/8/2021	51.000	15	15	26.500	2702.240	36.030	3.530
16	V16-SF-JOI	28	12/7/2021	9/8/2021	51.100	15	15	28.300	2885.790	38.480	3.770
17	V17-SF-JOI	28	12/7/2021	9/8/2021	51.000	15	15	30.000	3059.140	40.790	4.000

18	V18-SF-JOI	28	12/7/2021	9/8/2021	50.200	15	15	29.800	3038.750	40.520	3.970
19	V19-SF-JOI	28	12/7/2021	9/8/2021	50.000	15	15	26.800	2732.840	36.440	3.570
20	V20-SF-JOI	28	12/7/2021	9/8/2021	50.000	15	15	27.000	2753.230	36.710	3.600
21	V21-SF-JOI	28	13/7/2021	10/8/2021	50.000	15	15	27.600	2814.410	37.530	3.680
22	V22-SF-JOI	28	13/7/2021	10/8/2021	50.000	15	15	28.500	2906.190	38.750	3.800
23	V23-SF-JOI	28	13/7/2021	10/8/2021	50.000	15	15	28.200	2875.600	38.340	3.760
24	V24-SF-JOI	28	13/7/2021	10/8/2021	51.000	15	15	29.300	2987.760	39.840	3.910
25	V25-SF-JOI	28	13/7/2021	10/8/2021	50.800	15	15	28.400	2895.990	38.610	3.790
26	V26-SF-JOI	28	13/7/2021	10/8/2021	51.000	15	15	27.200	2773.620	36.980	3.630
27	V27-SF-JOI	28	13/7/2021	10/8/2021	50.900	15	15	30.300	3089.740	41.200	4.040
28	V28-SF-JOI	28	13/7/2021	10/8/2021	51.000	15	15	29.800	3038.750	40.520	3.970
29	V29-SF-JOI	28	13/7/2021	10/8/2021	50.600	15	15	26.700	2722.640	36.300	3.560
30	V30-SF-JOI	28	13/7/2021	10/8/2021	50.000	15	15	27.100	2763.430	36.850	3.610

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 54. Vigas prismáticas con hormigón convencional



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 55 Rotura de viga prismática con hormigón convencional



Fuente: Elaboración propia.

Vigas prismáticas con hormigón reforzado con fibras de polietileno de tereftalato (PET) al 0.6 %:

Tabla 40. Resultados de ensayo a flexión en vigas con hormigón fibroso al 0.6%

Nº prob.	COD.	Edad (Días)	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Longitud cm	Altura cm	Base cm	Carga de rotura (KN)	Carga Kgf.	Tensión de rotura (Kg/cm ²)	Resistencia Mpa.
1	V1-CF-JOI	28	8/7/2021	5/8/2021	50.000	15	15	31.000	3161.120	42.150	4.130
2	V2-CF-JOI	28	8/7/2021	5/8/2021	50.200	15	15	31.800	3242.690	43.240	4.240
3	V3-CF-JOI	28	8/7/2021	5/8/2021	50.800	15	15	31.500	3212.100	42.830	4.200
4	V4-CF-JOI	28	8/7/2021	5/8/2021	50.600	15	15	29.700	3028.550	40.380	3.960
5	V5-CF-JOI	28	8/7/2021	5/8/2021	50.700	15	15	29.800	3038.750	40.520	3.970
6	V6-CF-JOI	28	8/7/2021	5/8/2021	51.000	15	15	29.500	3008.160	40.110	3.930
7	V7-CF-JOI	28	8/7/2021	5/8/2021	50.500	15	15	30.900	3150.920	42.010	4.120
8	V8-CF-JOI	28	8/7/2021	5/8/2021	50.000	15	15	31.750	3237.600	43.170	4.230
9	V9-CF-JOI	28	8/7/2021	5/8/2021	50.000	15	15	29.000	2957.170	39.430	3.870
10	V10-CF-JOI	28	8/7/2021	5/8/2021	50.100	15	15	31.200	3181.510	42.420	4.160
11	V11-CF-JOI	28	12/7/2021	9/8/2021	51.100	15	15	32.100	3273.290	43.640	4.280
12	V12-CF-JOI	28	12/7/2021	9/8/2021	50.600	15	15	29.800	3038.750	40.520	3.970
13	V13-CF-JOI	28	12/7/2021	9/8/2021	50.200	15	15	31.300	3191.710	42.560	4.170
14	V14-CF-JOI	28	12/7/2021	9/8/2021	50.800	15	15	30.000	3059.1400	40.790	4.000
15	V15-CF-JOI	28	12/7/2021	9/8/2021	50.000	15	15	32.000	3263.090	43.510	4.270
16	V16-CF-JOI	28	12/7/2021	9/8/2021	50.900	15	15	32.400	3303.880	44.050	4.320
17	V17-CF-JOI	28	12/7/2021	9/8/2021	50.600	15	15	29.500	3008.160	40.110	3.930
18	V18-CF-JOI	28	12/7/2021	9/8/2021	50.500	15	15	30.000	3059.140	40.790	4.000
19	V19-CF-JOI	28	12/7/2021	9/8/2021	50.600	15	15	30.400	3099.930	41.330	4.050
20	V20-CF-JOI	28	12/7/2021	9/8/2021	50.000	15	15	31.200	3181.510	42.420	4.160

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 56 Pesado y rotura de vigas con fibras al 0.6%



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 57 Comportamiento de la fibra en la resistencia a flexión



Fuente: Elaboración propia.

Vigas prismáticas con hormigón reforzado con fibras de polietileno de tereftalato (PET) al 1 %:

Tabla 41 Resistencia a flexión en vigas con hormigón fibroso al 1%.

N° prob.	COD.	Edad (Días)	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Longitud cm	Altura cm	Base cm	Carga de rotura (KN)	Carga Kgf.	Tensión de rotura (Kg/cm ²)	Resistencia Mpa.
1	V1-CF-1-JOI	28	15/7/2021	12/8/2021	50.200	15	15	29.200	2977.57	39.700	3.890
2	V2-CF-1-JOI	28	15/7/2021	12/8/2021	50.000	15	15	29.700	3028.55	40.380	3.960
3	V3-CF-1-JOI	28	15/7/2021	12/8/2021	50.400	15	15	28.200	2875.60	38.340	3.760
4	V4-CF-1-JOI	28	15/7/2021	12/8/2021	50.100	15	15	28.400	2895.99	38.610	3.790
5	V5-CF-1-JOI	28	15/7/2021	12/8/2021	50.600	15	15	30.200	3079.54	41.060	4.030
6	V6-CF-1-JOI	28	15/7/2021	12/8/2021	50.300	15	15	31.500	3212.10	42.830	4.200
7	V7-CF-1-JOI	28	15/7/2021	12/8/2021	50.800	15	15	29.300	2987.76	39.840	3.910
8	V8-CF-1-JOI	28	15/7/2021	12/8/2021	50.500	15	15	30.800	3140.72	41.880	4.110
9	V9-CF-1-JOI	28	15/7/2021	12/8/2021	50.400	15	15	29.900	3048.95	40.650	3.990
10	V10-CF-1-JOI	28	15/7/2021	12/8/2021	50.600	15	15	29.700	3028.55	40.380	3.960
11	V11-CF-1-JOI	28	15/7/2021	12/8/2021	50.800	15	15	30.500	3110.13	41.470	4.070
12	V12-CF-1-JOI	28	15/7/2021	12/8/2021	50.400	15	15	31.200	3181.51	42.420	4.160
13	V13-CF-1-JOI	28	15/7/2021	12/8/2021	50.400	15	15	30.700	3130.52	41.740	4.090
14	V14-CF-1-JOI	28	15/7/2021	12/8/2021	50.600	15	15	29.600	3018.36	40.240	3.950
15	V15-CF-1-JOI	28	15/7/2021	12/8/2021	50.200	15	15	30.100	3069.34	40.920	4.010
16	V16-CF-1-JOI	28	15/7/2021	12/8/2021	50.600	15	15	30.400	3099.93	41.330	4.050
17	V17-CF-1-JOI	28	15/7/2021	12/8/2021	50.400	15	15	31.800	3242.69	43.240	4.240
18	V18-CF-1-JOI	28	15/7/2021	12/8/2021	50.800	15	15	30.600	3120.33	41.600	4.080
19	V19-CF-1-JOI	28	15/7/2021	12/8/2021	50.700	15	15	30.000	3059.14	40.790	4.000
20	V20-CF-1-JOI	28	15/7/2021	12/8/2021	50.500	15	15	30.100	3069.34	40.920	4.010

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 58 Pesado y posicionamiento de la viga a ser ensayada



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 59 Rotura de viga con fibra al 1 %



Fuente: Elaboración propia.

Vigas prismáticas con hormigón reforzado con fibras de polietileno de tereftalato (PET) al 1.4 %:

Tabla 42 Resistencia a flexión en vigas con hormigón fibroso al 1.4%.

N° prob.	COD.	Edad (Días)	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Longitud cm	Altura cm	Base cm	Carga de rotura (KN)	Carga Kgf.	Tensión de rotura (Kg/cm ²)	Resistencia Mpa.
1	V1-CF-1.4-JOI	28	14/7/2021	11/8/2021	50.300	15	15	30.600	3120.330	41.600	4.080
2	V2-CF-1.4-JOI	28	14/7/2021	11/8/2021	50.700	15	15	31.000	3161.120	42.150	4.130
3	V3-CF-1.4-JOI	28	14/7/2021	11/8/2021	50.000	15	15	29.300	2987.760	39.840	3.910
4	V4-CF-1.4-JOI	28	14/7/2021	11/8/2021	50.500	15	15	29.700	3028.550	40.380	3.960
5	V5-CF-1.4-JOI	28	14/7/2021	11/8/2021	50.300	15	15	31.100	3171.310	42.280	4.150
6	V6-CF-1.4-JOI	28	14/7/2021	11/8/2021	50.800	15	15	30.600	3120.330	41.600	4.080
7	V7-CF-1.4-JOI	28	14/7/2021	11/8/2021	51.000	15	15	30.100	3069.340	40.920	4.010
8	V8-CF-1.4-JOI	28	14/7/2021	11/8/2021	50.500	15	15	29.100	2967.370	39.560	3.880
9	V9-CF-1.4-JOI	28	14/7/2021	11/8/2021	50.000	15	15	29.400	2997.960	39.970	3.920
10	V10-CF-1.4-JOI	28	14/7/2021	11/8/2021	50.000	15	15	30.200	3079.540	41.060	4.030
11	V11-CF-1.4-JOI	28	19/7/2021	17/8/2021	50.000	15	15	28.900	2946.980	39.290	3.850
12	V12-CF-1.4-JOI	28	19/7/2021	17/8/2021	50.400	15	15	29.600	3018.360	40.240	3.950
13	V13-CF-1.4-JOI	28	19/7/2021	17/8/2021	50.800	15	15	29.000	2957.170	39.430	3.870
14	V14-CF-1.4-JOI	28	19/7/2021	17/8/2021	50.600	15	15	30.200	3079.540	41.060	4.030
15	V15-CF-1.4-JOI	28	19/7/2021	17/8/2021	50.200	15	15	29.500	3008.160	40.110	3.930
16	V16-CF-1.4-JOI	28	19/7/2021	17/8/2021	50.000	15	15	30.000	3059.140	40.790	4.000
17	V17-CF-1.4-JOI	28	19/7/2021	17/8/2021	50.400	15	15	30.800	3140.720	41.880	4.110
18	V18-CF-1.4-JOI	28	19/7/2021	17/8/2021	51.000	15	15	30.700	3130.520	41.740	4.090
19	V19-CF-1.4-JOI	28	19/7/2021	17/8/2021	50.600	15	15	29.000	2957.170	39.430	3.870
20	V20-CF-1.4-JOI	28	19/7/2021	17/8/2021	50.300	15	15	29.700	3028.550	40.380	3.960

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 60 Pesado y acomodado de viga para ensayo a flexión.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 61 Rotura de viga prismática con fibra al 1.4%



Fuente: Elaboración propia.

Vigas prismáticas con hormigón de alta resistencia (cemento IP-40):

Tabla 43. Resistencia a flexión de vigas con hormigón de alta resistencia.

N° prob.	COD.	Edad (Días)	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Longitud cm	Altura cm	Base cm	Carga de rotura (KN)	Carga Kgf.	Tensión de rotura (Kg/cm ²)	Resistencia Mpa.
1	V1-I-40-SF-JOI	28	22/7/2021	19/8/2021	50.000	15	15	35.700	3640.380	48.540	4.760
2	V2-I-40-SF-JOI	28	22/7/2021	19/8/2021	50.200	15	15	34.600	3528.210	47.040	4.610
3	V3-I-40-SF-JOI	28	22/7/2021	19/8/2021	50.500	15	15	34.000	3467.030	46.230	4.530

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 62 Rotura de vigas con hormigón de alta resistencia.



Fuente: Elaboración propia.

3.5.2. Ensayos de resistencia a compresión de probetas cilíndricas.

Muestras cilíndricas con hormigón convencional.

Tabla 44. Resistencia a compresión a cilindros con hormigón convencional

N° prob.	COD.	Edad (Días)	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Área cm ²	Lectura (KN)	Carga Kgf	Resistencia (Kg/cm ²)
1	C1-I-40-SF-JOI	28	10/6/2021	7/7/2021	176.625	476.400	48592.800	275.120
2	C2-I-40-SF-JOI	28	10/6/2021	7/7/2021	176.625	470.300	47970.600	271.600
3	C3-I-40-SF-JOI	28	10/6/2021	7/7/2021	176.625	480.500	49011.000	277.490
4	C2-I-40-SF-JOI	28	10/6/2021	7/7/2021	176.625	471.700	48113.400	272.400
5	C3-I-40-SF-JOI	28	10/6/2021	7/7/2021	176.625	465.300	47460.600	268.710

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 63 Rotura de cilindros con hormigón convencional



Fuente: Elaboración propia.

Muestras cilíndricas con hormigón de alta resistencia (cemento IP-40).

Tabla 45. Resistencia a compresión a cilindros con hormigón de alta resistencia.

N° prob.	COD.	Edad (Días)	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Área cm ²	Lectura (KN)	Carga Kgf	Resistencia (Kg/cm ²)
1	C1-I-40-SF-JOI	28	22/7/2021	19/8/2021	176.625	573.800	58527.600	331.370
2	C2-I-40-SF-JOI	28	22/7/2021	19/8/2021	176.625	570.200	58160.400	329.290
3	C3-I-40-SF-JOI	28	22/7/2021	19/8/2021	176.625	575.400	58690.800	332.290

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración N° 64 Rotura de muestras cilíndricas con hormigón de alta resistencia



Fuente: Elaboración propia

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Análisis de los resultados de asentamiento.

Este ensayo fue ideado por el investigador norteamericano Abrams, una mezcla bien diseñada debe ser capaz de ser mezclada, transportada, colocada y compactada con el equipamiento disponible. La aptitud de la mezcla para que tenga una correcta terminación también es un factor a tener en cuenta, debiendo minimizarse la exudación y la segregación.

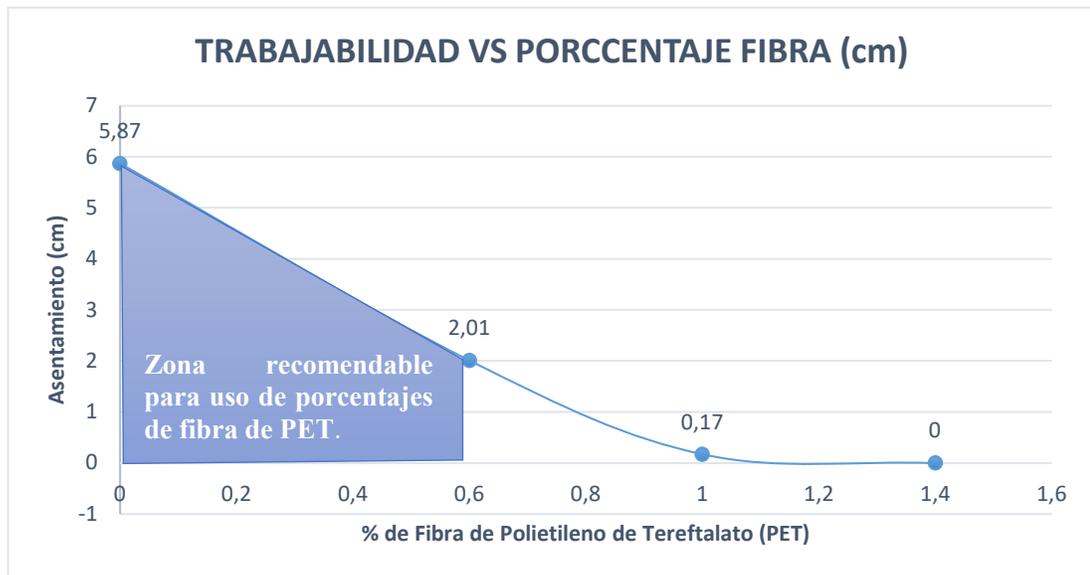
En la gráfica siguiente se presenta el comportamiento del asentamiento en hormigones convencionales y con fibra.

Tabla 46. Resultado de asentamientos promedio

Tipo de hormigón	Asentamiento promedio (cm)
Hormigón convencional	5.870
Hormigón con 0.6 % de fibra	2.010
Hormigón con 1% de fibra	0.170
Hormigón con 1.4% de fibra	0.000

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N.º3 Comportamiento de asentamiento en función a la cantidad de fibra.



Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 46 muestra un resumen del asentamiento medido durante el proceso de preparación de la mezcla con la adición de diferentes porcentajes de fibra de PET. La dosificación fue realizada para 5 cm de asentamiento, si bien en el hormigón convencional el valor supera el propuesto, este se encuentra dentro del rango que nos indica la norma ACI 211.1 que tiene como valores extremos de 7.5 a 2.5 cm para pavimentos por tanto se cumple lo requerido por la norma.

Como se observa en la gráfica N°3 el asentamiento disminuye considerablemente mientras mayor cantidad de fibra se añade, este descenso tan brusco en el asentamiento se debe a la forma de la fibra, la cual posee unos ganchos de sujeción que no dejan que la mezcla pueda asentarse, la misma llega a dificultar la trabajabilidad del hormigón.

Con este análisis se llega a definir un área debajo de la curva que nos da los porcentajes límites aceptables para que la trabajabilidad no se vea afectada en el hormigón, dándonos como porcentaje máximo 0.6% de fibra en función de la cantidad de cemento para que el hormigón sea trabajable.

Para porcentajes mayores a 0.6% se tiene un asentamiento bruscamente disminuido llegando a obtenerse que a partir de 1% de fibra añadida el asentamiento es prácticamente nulo y presenta desventajas en la trabajabilidad, otro factor que llega a influir a la trabajabilidad es la formación de ovillos de fibra llegando estos a no dispersarse de forma uniforme en el hormigón, esto debido a la forma y el tamaño de la fibra.

4.2. Análisis estadístico de la resistencia a la flexo-tracción.

La resistencia a la flexión se expresa como el módulo de ruptura (M_r), que incluye muestras de ensayo con secciones transversales prismáticas apoyadas sobre dos soportes separados 0.46 m., separados por una carga en dos tercios del tramo libre (0.15 m de ambos extremos) hasta que ocurra la falla. El quiebre de la muestra ocurre dentro del tercio central del tramo de prueba, y la resistencia a la flexo-tracción se calcula como el módulo de ruptura en función a la ecuación dada por la norma (astm-c78).

A continuación, se presenta los resultados del análisis estadístico de las resistencias obtenidas de los diferentes grupos de muestras.

Tabla 47. Diseño estándar con hormigón convencional.

Vigas prismáticas con 0% de fibra de PET.			
Cantidad de muestras	n=	30	Nro.
Sumatoria de resistencias	Σ =	1166.280	
Módulo de rotura promedio	X prom=	38.880	kg/cm²
Desviación estándar		1.900	kg/cm ²
Coefficiente de variación	CV=	4.880	%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 48. Diseño estándar con hormigón reforzado con 0.6 % de fibra.

Vigas prismáticas con 0.6% de fibra de PET.			
Cantidad de muestras	n=	20	Nro.
Sumatoria de resistencias	Σ =	835.960	
Módulo de rotura promedio	Xprom=	41.800	kg/cm²
Desviación estándar	σ =	1.390	kg/cm ²
Coefficiente corrección de σ		1.080	según tabla para 20 datos
Desviación estándar corregida	σ_c =	1.500	kg/cm ²
Coefficiente de variación	CV=	3.600	%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 49. Diseño estándar con hormigón reforzado con 1 % de fibra.

Vigas prismáticas con 1% de fibra de PET.			
Cantidad de muestras	n=	20	Nro.
Sumatoria de resistencias	Σ =	818.360	
Módulo de rotura promedio	Xprom=	40.920	kg/cm²
Desviación estándar	σ =	1.540	kg/cm ²
Coefficiente corrección de σ		1.080	según tabla para 20 datos
Desviación estándar corregida σ_c =	σ_c =	1.660	kg/cm ²
Coefficiente de variación	CV=	4.060	%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 50. Diseño estándar con hormigón reforzado con 1.4 % de fibra.

Vigas con testigo con 1.4% de fibra de PET.			
Cantidad de muestras	n=	20	Nro.
Sumatoria de resistencias	Σ =	813.73	
Módulo de rotura promedio	Xprom=	40.69	kg/cm²
Desviación estándar	σ =	1.49	kg/cm ²
Coeficiente corrección de σ		1.08	según tabla para 20 datos
Desviación estándar corregida	σ_c =	1.61	kg/cm ²
Coeficiente de variación	CV=	3.96	%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 51. Diseño estándar con hormigón de alta resistencia (IP-40).

N°	Descripción	Xi
1	X1	48.540
2	X2	47.040
3	X3	46.230
Sumatoria	Σ =	141.810
Promedio	Xprom=	47.270

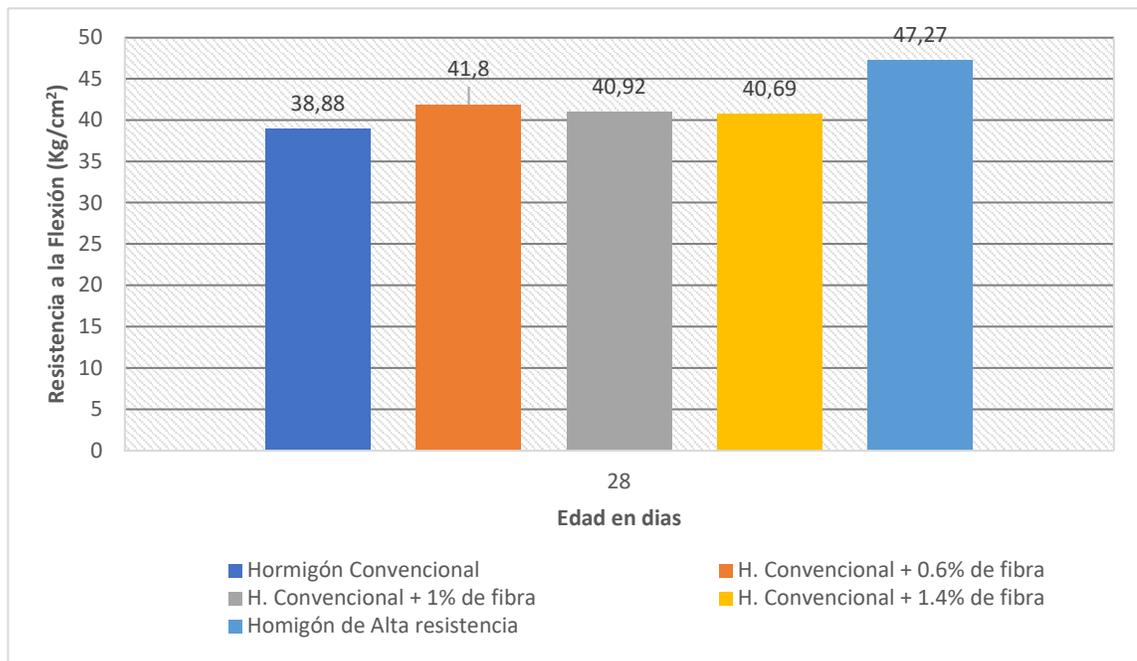
Fuente: Elaboración propia.

Las tablas completas con todos los datos y el análisis correspondiente se encuentran en anexos.

4.3. Análisis general de resultados.

Una vez obtenidos los datos sobre el módulo de rotura, se presenta a continuación la gráfica N°4, donde se observa la evolución del módulo de rotura a los 28 días de todos los grupos de control.

Gráfico N.º4. Efecto de la fibra de (PET) en la resistencia a flexo-tracción.



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica Nª4, se puede observar el efecto que tiene la fibra en la resistencia a la flexo-tracción. Se observa que a mayor cantidad de fibra la resistencia disminuye por tanto la dosificación óptima para la incorporación de fibras de polietileno de tereftalato (PET) pertenece al diseño Nro. 2, con 0.6 % de fibra añadida el hormigón aumento la resistencia a flexión; a los 28 días es de 41.80 kg/cm² que fue nuestro objetivo a la hora de dosificar a comparación del diseño estándar sin fibra que a los 28 días nos dio 38.88 kg/cm².

Así también se observa que el módulo de rotura para todos los porcentajes de incorporación de fibras de polietileno de tereftalato (PET) es mayor en comparación al concreto estándar.

No pasa lo mismo con el hormigón de alta resistencia que ya se tenía conocimiento nos daría resultados superiores al que nos planteamos en un principio, puesto que la resistencia

es muy elevada, no tenía mucho sentido añadir fibras a este tipo de hormigone porque sin ningún aditivo el mismo cumple con muy altas expectativas las resistencias dadas por la norma por tanto lo que más nos interesaba era demostrar que la fibra de polietileno aumenta la resistencia a flexo-tracción. Con lo nos llevó a hacer un análisis de costos para ver si es factible añadir este aditivo, de esta forma mejorar la resistencia a flexión para hormigones convencionales o con cemento (IP-30).

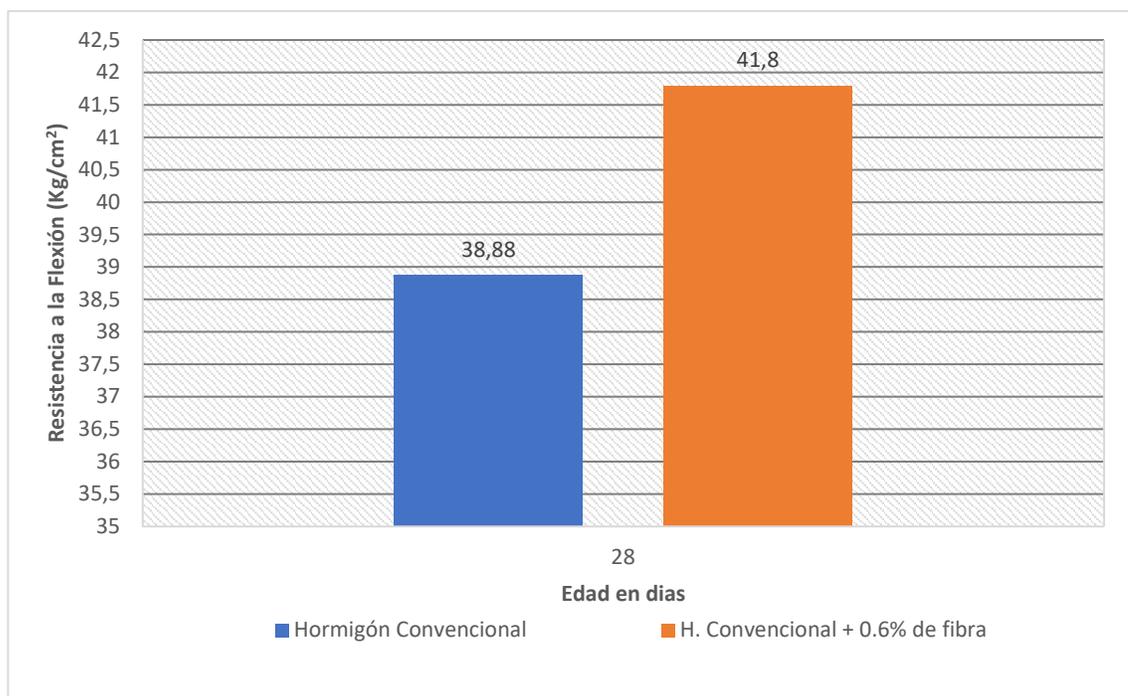
4.4 Análisis individual de resultados.

Según el grafico 5 se puede observar:

El (M_r) promedio del hormigón con incorporación de 0.6% de fibras de polietileno de tereftalato (PET), después de 28 días es de 41.80 kg/cm². y corresponde al 107.51% respecto a la resistencia que obtuvo el hormigón convencional de 38.88 kg/cm².

Por lo tanto, se obtuvo un aumento en la resistencia a la flexo-tracción de 7.51%.

Gráfico N.º5 Hormigón convencional vs hormigón con 0.6% de fibra de (PET).

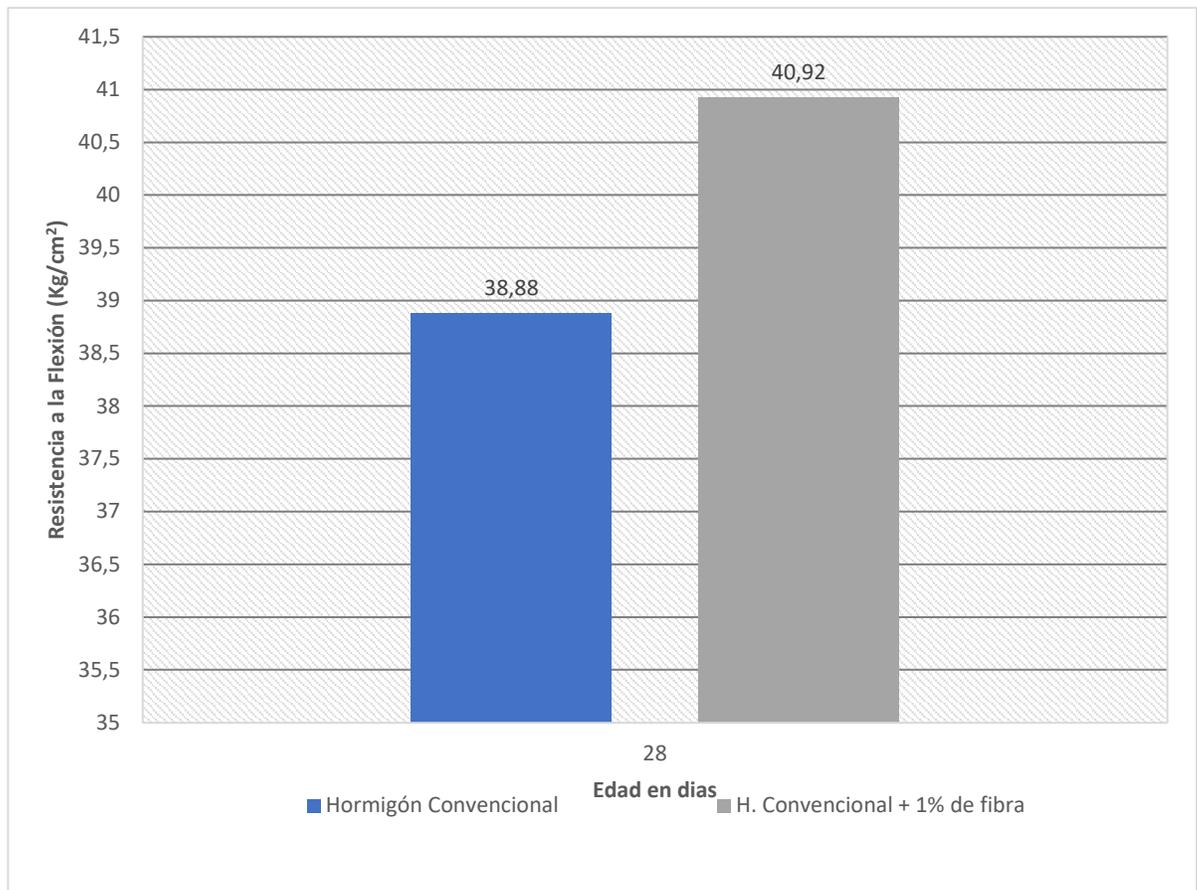


Fuente: Elaboración propia.

Según el gráfico N°6 se puede observar:

El (M_r) promedio del hormigón con incorporación de 1 % de fibras de polietileno de tereftalato (PET), después de 28 días es de 40.92 kg/cm². y corresponde al 105.25% respecto a la resistencia que obtuvo el hormigón convencional de 38.88 kg/cm². Por lo tanto, se obtuvo un aumento en la resistencia a la flexo-tracción de 5.25%.

Gráfico N.º6 Hormigón convencional vs hormigón con 1 % de fibra de (PET).

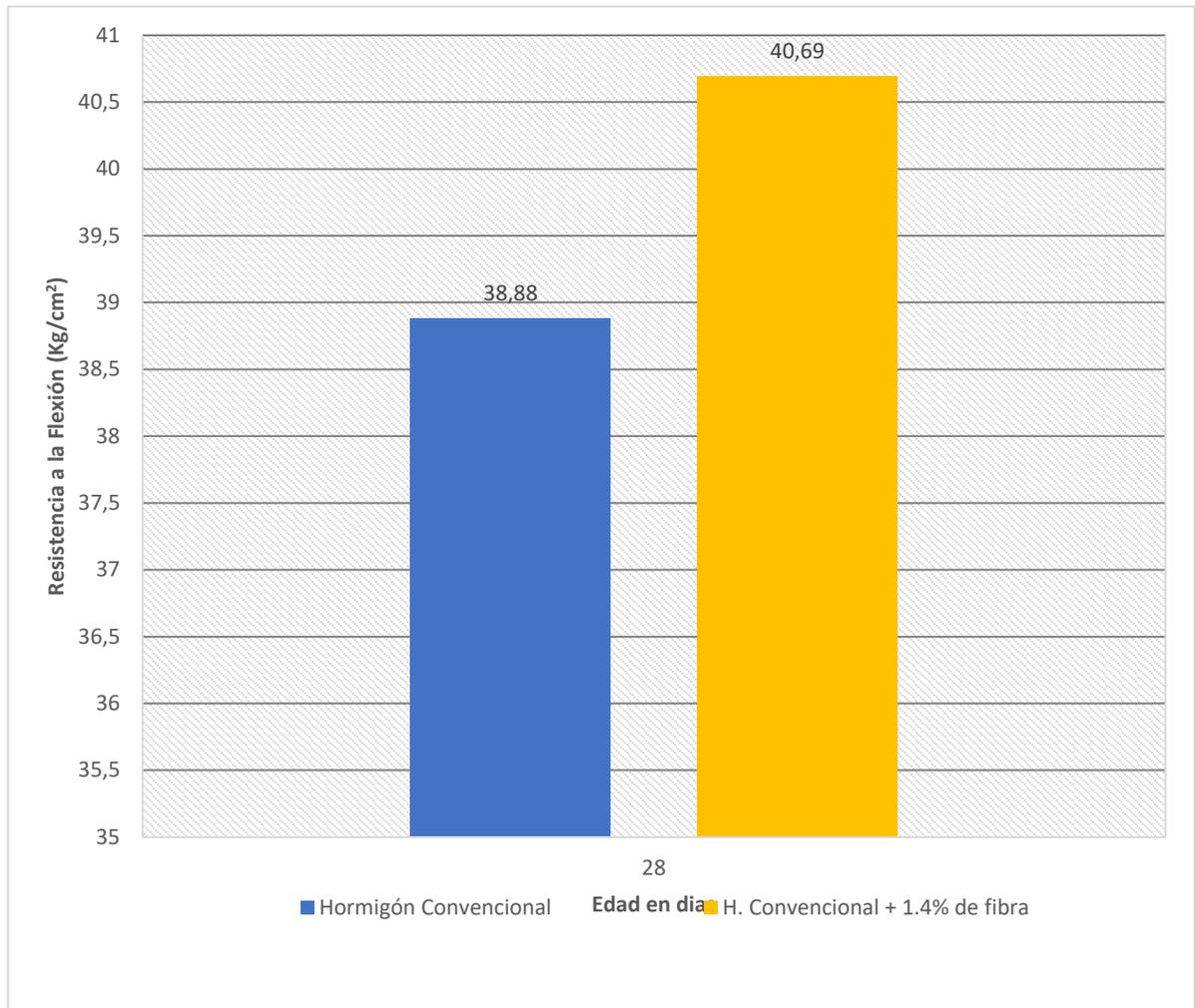


Fuente: Elaboración propia.

Según el gráfico N°7 se puede observar:

El (M_r) promedio del hormigón con incorporación de 1.4% de fibras de polietileno de tereftalato (PET), después de 28 días es de 40.69 kg/cm². y corresponde al 104.66% respecto a la resistencia que obtuvo el hormigón convencional de 38.88 kg/cm². Por lo tanto, se obtuvo un aumento en la resistencia a la flexo-tracción de 4.66%.

Gráfico N.º 7 Hormigón convencional vs hormigón con 1.4 % de fibra de (PET).



Fuente: Elaboración propia.

4.5. Porcentaje óptimo de fibras de polietileno de tereftalato (PET).

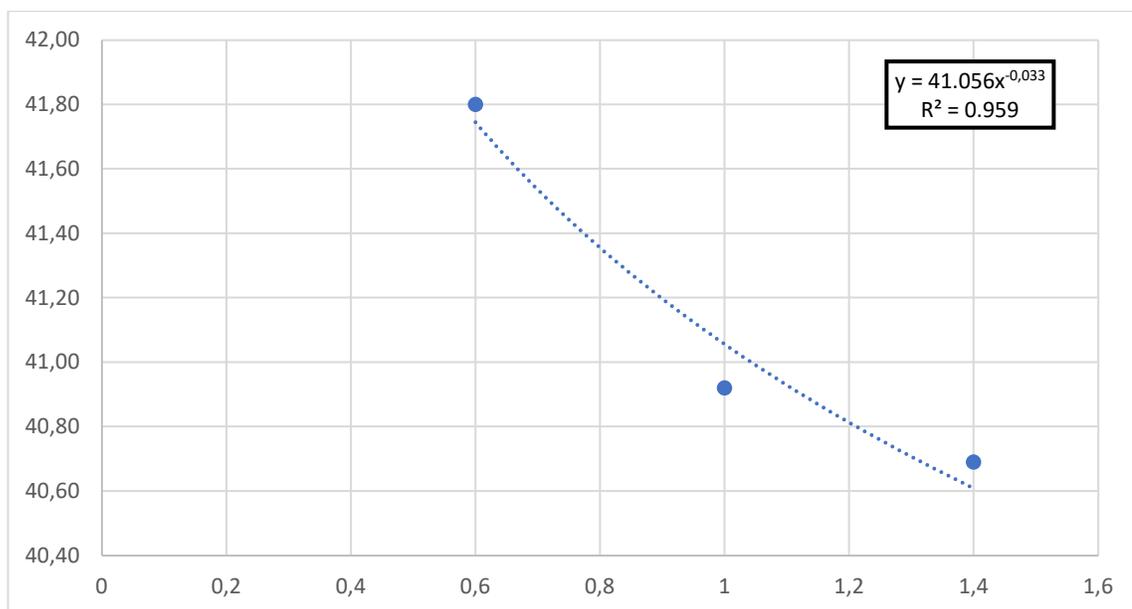
Para obtener el porcentaje óptimo de fibra se denota que la dosificación se realizó para obtener una resistencia de 41.8 Kg/cm², lo cual se llegó con ayuda de la fibra en un 0.6 % de adición al hormigón. Bajo este resultado se propuso llegar a la resistencia indicada por norma que son 42 kg/cm² para lo cual se realizó el análisis del comportamiento de % de fibra para una determinada resistencia obteniendo una gráfica y una ecuación que nos indica el porcentaje exacto de fibra que se debe añadir para obtener la resistencia de 42 kg/cm².

Tabla 52. Resistencias promedio de vigas reforzadas con fibra.

N°	Tipo	Xi promedio
1	0.6% Fibra	41.800
2	1% Fibra	40.920
3	1.4% Fibra	40.690

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N.º 8 Curva de resistencias con diferentes porcentajes de fibra de PET.



Fuente: Elaboración propia.

Con ayuda de la ecuación de la curva se obtiene el porcentaje óptimo de fibra. Por consiguiente, se presenta la dosificación óptima y la cantidad en peso de las fibras de polietileno de tereftalato para poder llegar a dicha resistencia.

Ecuación:

$$MR = 41.056x^{-0.033}$$

Tabla 53. Porcentaje óptimo de fibra

% de (PET)	Resistencia a flexión del concreto
0.500	42.000

Fuente: Elaboración propia.

Dosificación óptima:

Tabla 54. Proporciones de materiales óptimos.

Cemento	Arena	Grava
1	1.540	1.890

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 55. Cantidad de materiales para 1 m³ de hormigón.

Material	Peso seco kg/m³	Peso húmedo kg/m³
Cemento	475.000	475.000
Agua	190.000	199.360
Grava	900.000	902.970
Arena	729.220	733.150
TOTAL	2294.220	2310.480

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 56. Cantidad de fibra de polietileno de tereftalato (PET) para 1m³.

Aditivo	Peso Seco kg/m³
Fibras de polietileno de tereftalato (PET)	2.380

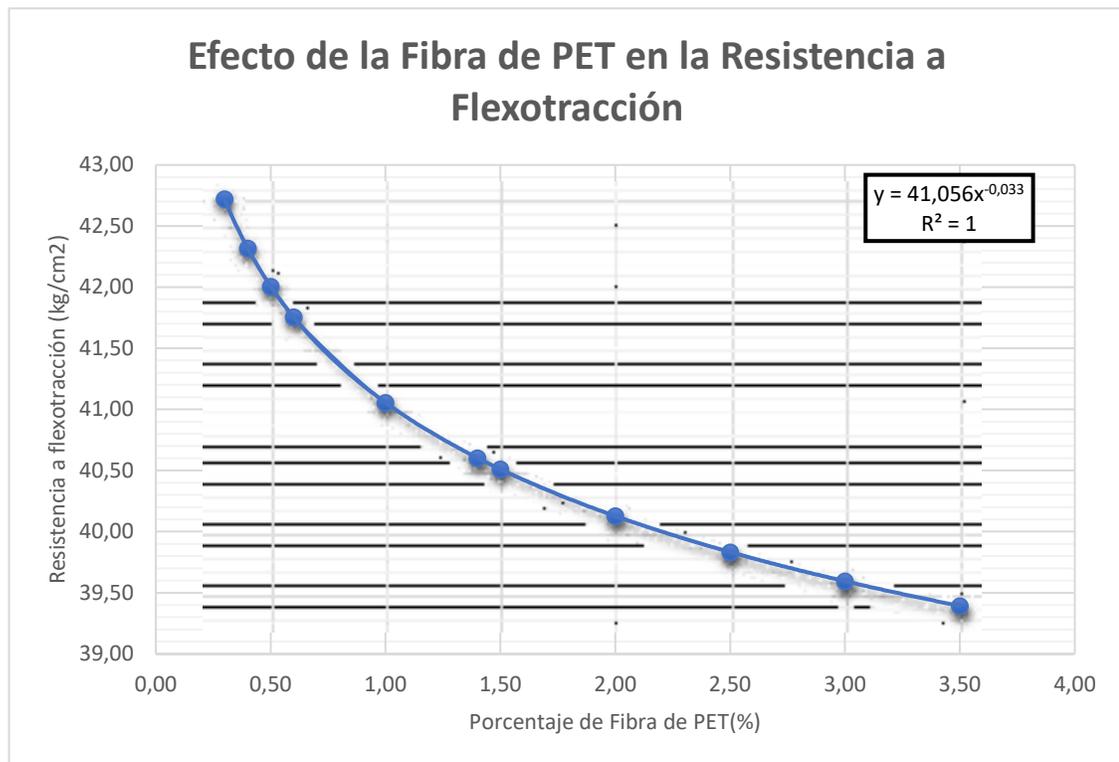
Fuente: Elaboración propia.

Donde se obtiene que para 1 m³ de hormigón el peso de fibra es de 2.38 kg, obteniendo de esta forma una dosificación óptima para una resistencia a flexo-tracción de 42 kg/cm².

4.6. Análisis del efecto de la fibra de PET en la resistencia a flexo tracción.

A partir de la ecuación obtenida para encontrar el porcentaje óptimo de fibra se obtiene el siguiente grafico que nos indica el comportamiento de la fibra en diferentes porcentajes en función de la resistencia a flexo tracción.

Gráfico N.º 9 Curva de efecto de la fibra de PET en la resistencia a flexo tracción.



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico Nro. 9 se presenta el efecto que produce la fibra de PET en la resistencia a flexo tracción, mostrándonos que a mayor cantidad de fibra la resistencia a flexo tracción baja, por el contrario a menor cantidad de fibra la resistencia tiende a elevarse, este comportamiento tan inusual se debe a la forma de la fibra, puesto que la misma posee ganchos de sujeción y en cantidades elevadas tiende a ser perjudicial en el hormigón tanto en la resistencia como en la trabajabilidad del mismo.

A partir de esta curva se encontró relaciones bajo parámetros de calidad para las resistencias que nos presenta la normativa INVIAS.

Tabla 57. Porcentajes de Fibra para diferentes resistencias según INVIAS.

% de (PET)	Resistencia a Flexión del Concreto
0.000	38.000
2.200	40.000
0.500	42.000

Fuente: Elaboración propia.

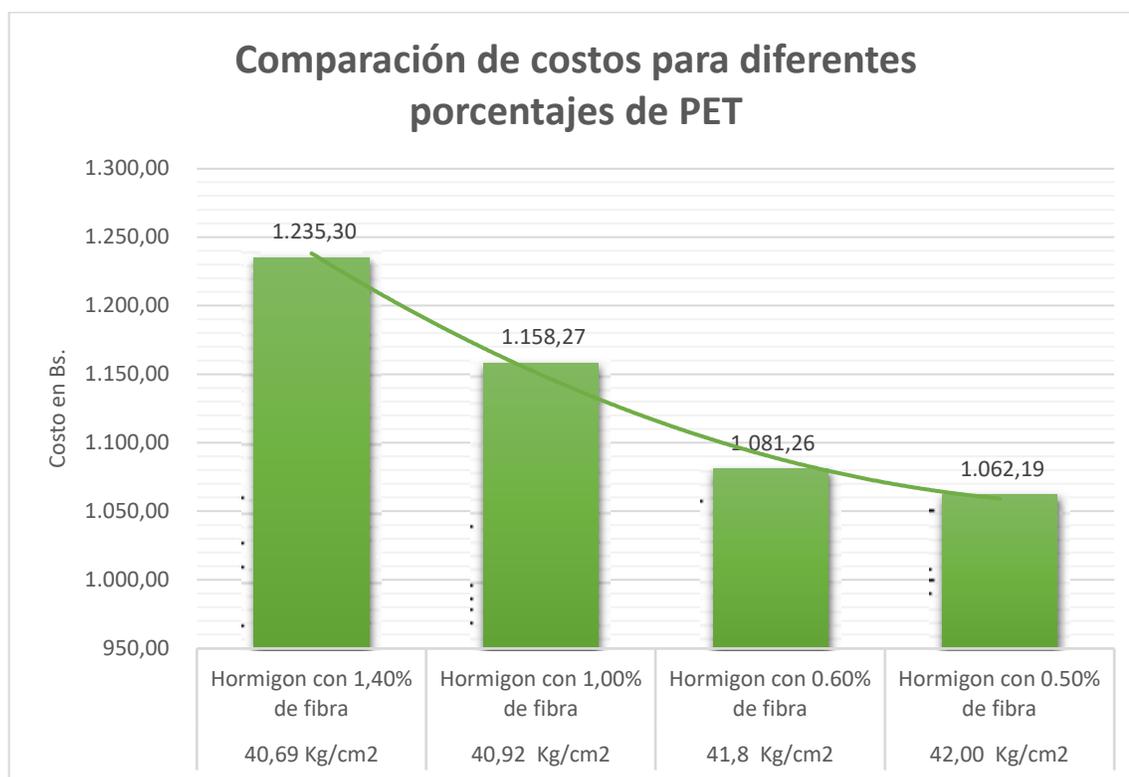
En la tabla 57 se presenta los porcentajes de fibra necesarios para obtener las resistencias que nos indica la norma INVIAS. De los mismos se puede denotar que el porcentaje óptimo bajo parámetros de calidad y costo es de 0.5%, estos porcentajes son válidos para la dosificación presentada en el presente proyecto.

4.7. Análisis de costos.

Para este análisis se tomó como referencia costos de materiales de la revista PL presupuestos y construcción N.º 73 agosto-noviembre del 2021, el precio del cemento fue por investigación en la zona, también las fibras de polietileno de tereftalato como se menciona en el capítulo II se adquirieron de una empresa recicladora la cual nos emitió un recibo el mismo se lo adjunta en anexos.

Se hizo un análisis de precios unitarios para el hormigón convencional con fibra al 0.60%, 1.00%, 1.40% y al 0.50% que fue el porcentaje óptimo bajo parámetros de calidad, donde se realizó un análisis comparativo obteniendo que este porcentaje es de igual forma el óptimo bajo parámetros de costo en comparación de los porcentajes adoptados para la investigación, en el presente grafico se denota esta afirmación.

Gráfico N° 9. Comparación de costos en mezclas con fibra de PET.

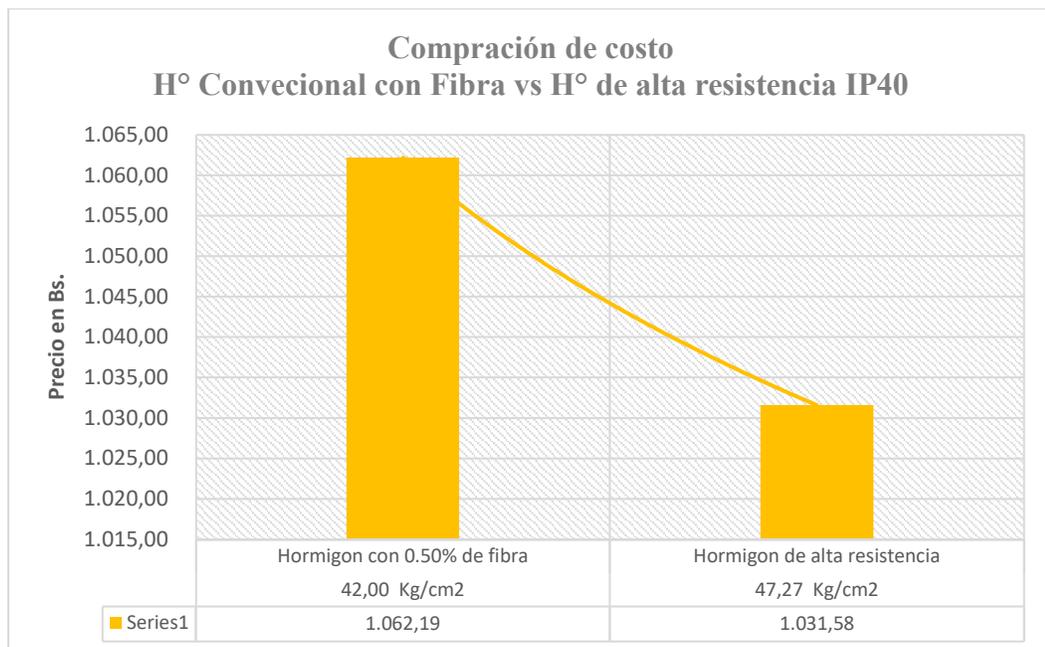


Fuente: Elaboración propia.

Donde se observa que a menor cantidad de fibra el costo disminuye por tanto se obtiene que para 0.5% de fibra de PET añadida a la mezcla esta es técnica y económicamente óptima para hormigones con cemento IP-30.

Para hormigones con cementos de alta resistencia o de tipo IP-40 en comparación del hormigón convencional con refuerzo óptimo de fibra el resultado tiende a cambiar, aunque en un porcentaje muy pequeño, mismo que se presenta en el siguiente gráfico.

Gráfico N° 10. Costo hormigón con fibra vs hormigón de alta resistencia.



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico N.º 9 se presenta la comparación de costo entre un hormigón y el otro denotándose que el hormigón de alta resistencia es un 2.80% o 30.61bs. más económico que el hormigón con fibra de PET para 1 m³. Dado que se trata de una investigación, se debe hacer énfasis en el costo de la fibra ya que el mismo es un poco elevado comprando en pocas cantidades, este valor puede bajar considerablemente si se compra en grandes cantidades como lo necesitaría realmente un pavimento a la hora de hacer una aplicación con la fibra, se debe tomar en cuenta también el impacto ambiental positivo que se tendría a la hora de reciclar y reusar el plástico puesto que esta fue una de las inquietudes más grandes a la hora de escoger el material a añadir.

El análisis de precios unitarios detallado se lo presenta en anexos.

Presupuesto general:

Tabla 58. Presupuesto general.

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Numeral)	Precio Unitario (Literal)	Precio Total (Numeral)
1	Hormigón convencional reforzada con fibra de (PET) para losa pavimento rígido.	m ³	1	1062.19	Mil sesenta y dos 19/100	1062.19
PRECIO TOTAL (Numeral)						1062.19
PRECIO TOTAL (Literal)						Mil sesenta y dos 19/100 bolivianos

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2 Prueba de hipótesis: hormigón convencional con hormigón reforzado con 1 % de fibras de PET.

Prueba de Hipótesis

- Muestra Patron (1)** : Vigas prismáticas con hormigón convencional - 28 días
- Muestra Comparada(2)** : Vigas prismáticas con hormigón reforzado con fibras de polietileno de tereftalato (1% PET) - 28 días
- 1. Parámetros de interés** : Datos obtenidos del análisis estadístico de la distribución de frecuencias para datos agrupados

Cantidad de fibra de polietileno de tereftalato (PET) reciclado incorporado

	0%	1,00%
Número de muestras (N)	30	20
Media (\bar{X})	38,88	40,92
Desviación estándar σ	1,9	1,66

- 2. Hipótesis** : \bar{X}_1 : Mr Medio del grupo 1
 \bar{X}_2 : Mr Medio del grupo 2
- 2.1 Hipótesis nula** : Ho: $\bar{X}_1 \geq \bar{X}_2$ Se rechaza si : ($Z_o < -Z$)
La incorporación de fibras de polietileno de tereftalato (PET) reciclado en un 1% en relación al peso del cemento, **NO INCREMENTA** la resistencia a la flexo-tracción del hormigón Mr=40 kg/cm2 (a los 28 días de edad).
- 2.1 Hipótesis nula** : Ha: $\bar{X}_1 < \bar{X}_2$ Ha unilateral con cola a la izquierda
La incorporación de fibras de polietileno de tereftalato (PET) reciclado en un 1% en relación al peso del cemento, **INCREMENTA** la resistencia a la flexo-tracción del hormigón Mr=40 kg/cm2 (a los 28 días de edad).
- 3. Nivel de significancia** : $\alpha = 0.05$ $Z = 1.645$
- 4. Estadística de prueba** : La estadística de prueba que se usa en la prueba de Hipótesis de dos poblaciones con medias y varianzas conocidas se denota por:

Donde:

$$Z_o = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N_1} + \frac{\sigma_2^2}{N_2}}}$$

- Zo: Estadística de prueba
- \bar{X}_1, \bar{X}_2 : Resistencia promedio en los grupos.
- σ_1^2, σ_2^2 : Desviación estándar de los grupos
- N1, N2: Cantidad de muestras de los grupos

Prueba Z : Zo -4,02

Por lo tanto se tiene que para un nivel de significancia de 0,05 y nivel de confiabilidad del 95%, corresponde un valor de Z= 1,645.
Rechazar Ho si: Zo < -1,645

- 5. Conclusión** : **Se Rechaza; Ho** Se acepta Ha; \bar{X}_1, \bar{X}_2 :

Puesto a la expresión: { Zo < -Z } ó { -4,02 < -1,645 } es **VERDADERA** entonces **SE RECHAZA Ho**; con un nivel de significancia de 0,05 y confiabilidad del 95%; concluyéndose así que: La incorporación de fibras de polietileno de tereftalato (PET) reciclado en un 1% relativo al peso del cemento, **INCREMENTA** la resistencia a la flexo-tracción del hormigón Mr: 40 kg/cm2 (a los 28 días de edad)

Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.

Se cumplió con el objetivo general de analizar el efecto que produce la adición de fibras de polietileno de tereftalato (PET) en la resistencia a flexo-tracción, se encontró que las fibras de (PET) reciclado influyen de manera positiva en la resistencia a la flexo-tracción.

- La adición de fibras de polietileno de tereftalato (PET), influye en las propiedades de hormigón en estado fresco ya que reduce bruscamente la trabajabilidad del mismo esto debido a la forma y tamaño de la fibra, sin embargo, esta es tolerable hasta un porcentaje máximo de 0.60% por lo cual se establece como tope máximo de adición de fibras.
- Se obtuvo los porcentajes teóricos necesarios de fibra para obtener las resistencias a flexo-tracción que nos indica la norma INVIAS, encontrando el valor óptimo bajo parámetros de calidad y costo.

% de (PET)	Resistencia a Flexión del Concreto
0.000	38.000
2.200	40.000
0.500	42.000

- El porcentaje óptimo de adición de fibras de polietileno de tereftalato (PET) es de 0.50% (2.38 kg. de fibra por metro cubico de hormigón) el cual genera resistencias a la flexo-tracción de 42kg/cm², estas superan la resistencia mínima requerida según norma para hormigones en pavimentos rígidos que es de 38 kg/cm², cabe mencionar que este porcentaje es limitante ya que a mayores cantidades de adición de fibra se evidencia una reducción en la resistencia a flexo-tracción.
- Las probetas prismáticas con adiciones de fibra de polietileno de tereftalato (PET) presentaron menor resistencia para 1.00% y 1.40% de adición. Las resistencias a flexo-tracción son más bajas que la óptima pero no menores comparado a las obtenidas con el hormigón convencional, por lo que se concluye que si se adiciona

fibra dentro de estos rangos siempre existirá una mejora en la resistencia a flexo-tracción en comparación de una mezcla convencional.

- En el ensayo de resistencia a la flexión en vigas prismáticas con adición de fibras se evidencio una mejor adherencia entre las fibras y el hormigón, ya que se pudo observar que no hubo una fractura marcada de la muestra, como se da en las muestras sin fibra, mismas que se fracturan por completo. Se revelo que a mayor cantidad de fibra reduce el tamaño de la fisura dentro de la viga prismática, por lo tanto, el uso de fibras en este tipo de mezclas tiene gran impacto en la prevención de micro fisuración a tempranas edades dando un mayor tiempo de vida útil a un pavimento rígido.
- En el análisis de costos se comprobó que el hormigón con 0.5% de adición de fibra de PET es técnica y económicamente el valor óptimo, en comparación de las otras mezclas con el mismo tipo de cemento (IP-30). Asimismo, se realizo la comparación con hormigones de alta resistencia o con cemento (IP-40), obteniendo que el hormigón con adición de fibra de polietileno de tereftalato (PET) es un 2.80 % más caro que el hormigón con cemento de alta resistencia. Esto se debe al elevado costo de la fibra en pequeñas cantidades, este valor puede llegar a reducirse e incluso a ser más económico si es adquirido en grandes cantidades como lo requeriría la construcción de un tramo vial.
- En la prueba de Hipótesis se utilizó el estadístico de prueba Campana de Gauss para un nivel de significancia de 0.05 y 95% de confiabilidad, logrando demostrar que efectivamente la adición de fibras de Polietileno de Tereftalato en el hormigón incrementa la resistencia a Flexo-tracción.

5.2. Recomendaciones.

- No se recomienda el uso de esta fibra en porcentajes mayores a 0.6%, puesto que la trabajabilidad se ve muy reducida en hormigones, volviéndola ineficiente a la hora de puesta en obra por la formación de ovillos o nidos de fibra.

- Para futuras investigaciones con este tipo de material no se recomienda el uso de este modelo de fibra, puesto que los ganchos de sujeción en el momento de hormigonar tienden a entrelazarse y evitan que las mismas se dispersen homogéneamente formando los ovillos de fibra.
- Para futuras investigaciones con este tipo de material se recomienda el uso de fibra corta o pequeña puesto que con tamaños grandes o más de 5cm de largo la trabajabilidad se ve afectada de forma muy brusca, se presenta en el anexo 8 especificaciones técnicas de fibras recomendables para este tipo de proyectos.
- Para el uso correcto en obra de la fibra usada en el presente proyecto, el autor presenta en el anexo 9 las especificaciones técnicas de las fibras de polietileno de tereftalato (PET), las mismas deben ser tomadas en cuenta para llegar a los resultados presentados.
- Uno de los inconvenientes para la caracterización de los agregados son la condición de disposición de estos por lo que se recomienda ubicar los agregados y el cemento en un lugar adecuado, para que el material mantenga las condiciones en las cuales se realizaron las caracterizaciones iniciales.
- Se recomienda que el equipo para hormigonar sea de capacidad de al menos 4 probetas prismáticas, esto porque se tiene una variación en los resultados, dado que en la presente investigación la mezcladora era de capacidad de 2 probetas prismáticas generando una variable extraña que puede ocasionar error a la hora de realizar una investigación.
- Uno de los problemas más comunes en estos tiempos es la acumulación de residuos sólidos sobre todo de plásticos por lo que se recomienda realizar investigaciones en base a la reutilización de estos en proceso para obtener productos de beneficiosos para la comunidad de la construcción.