

CAPÍTULO I

1.1. Introducción

El pavimento, es una estructura compuesta por una o varias capas de materiales, con características apropiadas comprendidas entre la capa subrasante y la superficie de rodamiento de una obra vial, y cuyas funciones principales son las de proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, resistente a la acción del tránsito, al intemperismo y otros agentes perjudiciales, que debe transmitir adecuadamente a las capas inferiores de la estructura, los esfuerzos transmitidos por el tránsito haciendo posible que los vehículos circulen con comodidad, seguridad y economía.

Los pavimentos de concreto hidráulico están sujetos a esfuerzos externos, que provocan deformaciones como el alabeo de losas que se define como la deformación que sufre una losa tomando una forma curvada hacia arriba o hacia abajo encorvando sus bordes. Esta deformación, puede levantar los bordes de la losa respecto a la base, dando lugar a un borde o esquina sin apoyo que puede fisurarse cuando se aplican cargas pesadas.

Algunas veces el alabeo es evidente a edad temprana, en otros casos, las losas pueden alabearse durante un período de tiempo mayor.

Para poder realizar un verdadero análisis del comportamiento de la losa es necesario establecer la forma de fuerzas actuantes de alabeo que generalmente son consecuencia de cambios en gradientes térmicos y aplicación de cargas.

Por lo que mediante este estudio, se pretende analizar de qué manera se manifiesta el alabeo en losas de concreto y de qué manera puede ser contrarrestado.

Con el presente trabajo se dará un aporte práctico por que se realizará trabajo de campo mediante el estudio de tramos de pavimento rígido, dividido en segmentos establecidos por el sistema AASHTO, y teórico por que se llegará a obtener una referencia bibliográfica acerca de las consideraciones que deben ser incluidas en el diseño de pavimento rígido tomando en cuenta el factor del alabeo de losas, llegando a la conclusión de esta investigación proponiendo una alternativa de solución para disminuir el efecto provocado por el alabeo en las losas de hormigón.

1.2 Justificación

Dentro del sistema de carreteras y vías urbanas de la ciudad, presentan problemas en su funcionamiento ya que se pueden evidenciar diferentes factores que afectan al pavimento rígido, como los cambios extremos de temperatura que provocan el levantamiento de las esquinas de las losas de hormigón, entre otros.

Al realizar este estudio se pretende identificar las condiciones actuales y las falencias que se presentan atribuibles al alabeo de losas de hormigón en tramos de pavimento rígido.

Una vez evaluado el tramo de pavimento rígido construido se realizara un análisis comparativo para establecer el efecto del alabeo en el dimensionamiento de las losas de concreto.

1.3. Planteamiento del problema

1.3.1. Situación problemática

Los pavimentos de concreto hidráulico están sujetos a esfuerzos externos que provocan deformaciones como el alabeo de losas que se define como la deformación que sufre una losa tomando una forma curvada hacia arriba o hacia abajo encorvando sus bordes.

Esta deformación puede levantar los bordes de la losa respecto a la base, dando lugar a un borde o esquina sin apoyo que puede agrietarse cuando se aplican cargas pesadas, algunas veces el alabeo es evidente a edad temprana, en otros casos, las losas pueden alabearse durante un período de tiempo mayor.

Para poder realizar un verdadero análisis del comportamiento de la losa es necesario estudiar de qué manera se manifiesta el fenómeno del alabeo, y como puede ser disminuido proponiendo una alternativa de losas cortas para contrarrestar este efecto.

1.3.2. Problema

¿Cómo se manifiesta el fenómeno del alabeo en losas de hormigón y de qué manera afecta el funcionamiento del pavimento rígido?

1.4. Hipótesis

Si realizamos la evaluación y perfilometría del tramo de pavimento rígido entonces se conformaran los segmentos de medición de acuerdo a recomendaciones ASTM para así poder determinar el efecto del alabeo de losas y las consecuencias atribuibles al mismo.

1. 5. Objetivos del proyecto

1.5.1. Objetivo general

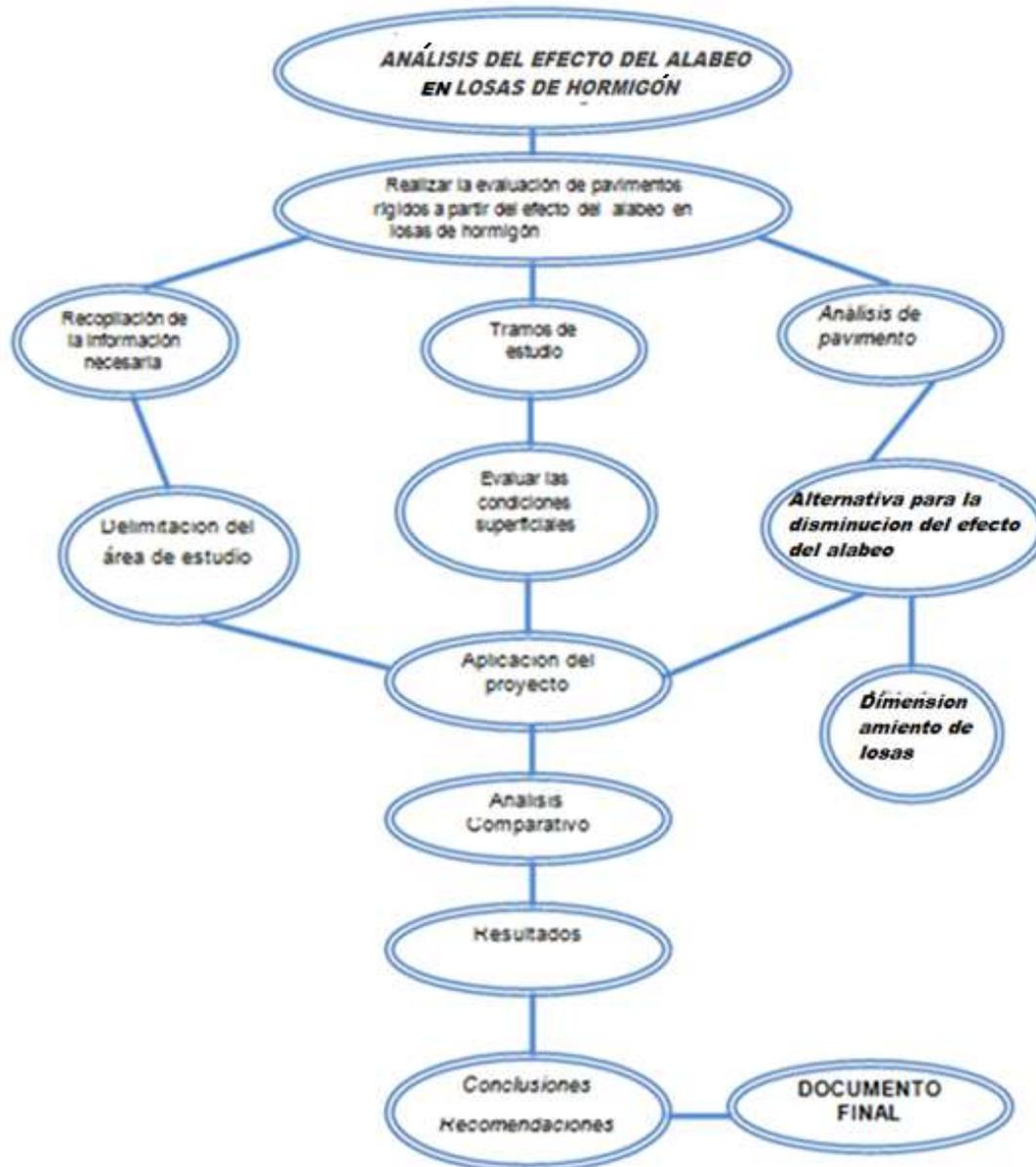
Realizar el análisis del alabeo en losas de pavimento rígido en base a su perfilometría para evaluar su efecto aplicado en el pavimento rígido de la Av. Circunvalación y la Nueva Terminal de Buses de la ciudad de Tarija.

1. 5.2. Objetivos específicos

- Recopilación de la información necesaria del lugar del proyecto.
- Identificar los tramos de estudio para el efecto de la alabeo de losas.
- Analizar los principios teóricos del alabeo de losas de concreto.
- Describir las características de pavimento en estudio.
- Evaluar las condiciones superficiales respecto al alabeo de losas en el tramo de estudio.
- Realizar en gabinete un análisis del efecto de alabeo de losas en el dimensionamiento del pavimento rígido.
- Establecer los resultados para el tramo de estudio respecto al efecto del alabeo de losas y su incidencia en el diseño.
- A partir de los resultados obtenidos plantear acciones que garanticen que el efecto del alabeo sea mínimo.
- En función a los resultados comparados formular las conclusiones y recomendaciones.

1. 6. Diseño metodológico

1.6.1 Marco metodológico



1.6.2. Componentes

En el presente trabajo se medirán las deformaciones presentes en el tramo de estudio de pavimento rígido, que son atribuibles al alabeo de losas, para cada uno de los segmentos establecidos para su estudio.

El objeto a medir es la deformación o levantamiento de las puntas de las losas de concreto definido como alabeo de losas para poder determinar este factor y analizar de qué manera influye en el dimensionamiento de las losas de pavimento rígido.

1.6.2.1. Unidad de estudio u observación.

En este trabajo, la unidad de estudio se centrara en el análisis del efecto del alabeo de losas de concreto, de qué manera son diseñadas, sus dimensiones y cuáles son las características que presentan.

6.2.2. Variables

6.2.2.1. Identificación de variables

-Variables independientes: Efecto del Alabeo de losas de hormigón

-Variables dependientes: Perfilometría

1.6.2.2.2 Conceptualización

Efecto del Alabeo de losas de hormigón.- Es la distorsión que sufre una losa tomando una forma curvada hacia arriba o hacia abajo encorvando sus bordes debido al efecto de la temperatura.

Perfilometría.- Es la técnica que se utiliza para medir el perfil de una superficie y poder determinar la rugosidad de los pavimentos rígidos.

Dimensionamiento de losas de hormigón.- Dimensiones de las losas de concreto para el pavimento rígido determinadas mediante normativas AASHTO.

1.6.2.2.3. Operacionalidad

1.6.2.2.3.1. Variables independientes.-

VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADOR	VALOR
Efecto del Alabeo de losas de hormigón		<ul style="list-style-type: none">-Modelo de losas de hormigón.-Expansión y retracción del concreto por efecto de la temperatura.-Obtención de los perfiles reales del terreno.	<ul style="list-style-type: none">-Coeficientes (valor adimensional).-Segmentos establecidos (m). -Longitud (m).

1.6.2.2.3.2. Variables dependientes

VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADOR	VALOR
Perfilometría	-Superficie del pavimento.	-Características de la estructura del pavimento rígido en estudio a partir de los datos de su construcción.	-Criterios básicos de diseño, longitud y espesores (m).
	-Segmentos de medición cada 200m.	-Diagramar los segmentos de medición de acuerdo a recomendaciones de AASHTO.	-Perfiles (m).
	-Perfil del alabeo.	-Perfiles con alabeo y perfiles sin alabeo.	-M-mm - dm/ hm.

1.6.2.3. Población.

Al ser un trabajo de investigación en el cual se busca determinar el efecto del alabeo de losas en el pavimento rígido, se tomara como población a los pavimentos rígidos; el principal factor que afectara en dicha investigación será el gradiente térmico ya que según la variación de la temperatura producirá el alabeo de losas.

1.6.2.4. Muestra.

La muestra de este trabajo se basa en el alabeo de losas de los pavimentos rígidos que serán estudiados y analizadas realizando mediciones en segmentos establecidos por las normas AASHTO y ASTM.

1. 6.2.5. Muestreo.

El muestreo está representado por el alabeo del pavimento rígido en el tramo de ingreso a la nueva terminal de buses de la ciudad de Tarija, como primer tramo de estudio, y el tramo de la Circunvalación, ambos tramos serán divididos en 30 segmentos para su medición, cada uno de ellos de 20m cada 100m de pavimento rígido siguiendo las normas establecidas por AASHTO y ASTM.

1.7. Métodos y técnicas empleadas

Los métodos, técnicas y medios que se usaran para la realización del presente trabajo son los siguientes:

1.7.1. Métodos

El trabajo de investigación requiere del uso de un método y/o procedimiento que lo conduzca al conocimiento. Para llevar a cabo el trabajo se debe seguir una acción y un procedimiento metódico. Dentro de los tipos de métodos aplicados al trabajo intelectual tenemos al Método Deductivo y Método Inductivo. En nuestro caso emplearemos el método inductivo ya que se acomoda al estudio que se pretende realizar.

El método inductivo va de lo particular a lo general, lo empleamos cuando queremos llegar a un principio general a partir de realizar el análisis de algún fenómeno o de un

tema en particular, ya que en nuestro trabajo se pretende realizar la evaluación de pavimentos rígidos a partir del efecto del alabeo de losas y establecer la influencia del alabeo en su dimensionamiento.

1.7.2. Técnicas

Las técnicas son el CÓMO de la investigación, cómo se va a realizar. Existen varias técnicas para la investigación, en nuestro caso utilizaremos la medición, ya que el estudio estará basado en mediciones realizadas en segmentos establecidos por normativas AASHTO y ASTM.

Ya ubicados los segmentos de estudio dentro del tramo de pavimento rígido, estos serán clasificados y ordenados, para de esta manera elaborar un esquema donde se represente cada segmento para su evaluación y análisis. Para finalizar la investigación se propondrá una alternativa para disminuir el efecto del alabeo en las losas de concreto.

1.8. Procedimiento para el análisis y la interpretación de la información

1.8.1. Tratamiento estadístico

Esta investigación tiene un carácter no probabilístico, ya que se estudiara un fenómeno que permanece constante en el pavimento rígido, para esto se realizaran mediciones en cada segmento del tramo de pavimento rígido, los cuales nos proporcionaran una serie de datos que tendrán que ser analizados posteriormente, por lo tanto realizaremos un análisis descriptivo ya que tendremos un conjunto de datos que serán analizados.

Se hará uso de la Estadística Descriptiva que es un proceso mediante el cual se recopila, organiza, presenta, analiza e interpreta datos de manera tal que describa fácil y rápidamente las características esenciales de dichos datos mediante el empleo de métodos gráficos, tabulares o numéricos.

Contaremos con un conjunto de datos N (datos que representan a la población, que en este caso será el pavimento rígido, y otro conjunto de datos n (datos que representan la muestra, que en este caso es el alabeo de los pavimentos rígidos), que serán

clasificados de acuerdo a las características que cada medición solicite para así poder realizar un mejor análisis de todos los datos obtenidos.

Los parámetros estarán determinados para describir las características de la población y los estadígrafos serán usados para describir las características de las muestras.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

2.1. Definición del pavimento rígido

El pavimento, es una estructura formada por una o más capas de material pétreo tratado, cuya función es la de proporcionar al usuario un tránsito cómodo, seguro y rápido, al costo más bajo posible.

Se define como pavimento de hormigón el construido por un conjunto de losas de hormigón en masa, separadas por juntas transversales, o por una losa continua de hormigón armado, en ambos casos eventualmente dotados de juntas longitudinales, el hormigón se pone en obra con una consistencia tal, que requiere el empleo de vibradores internos para su compactación y maquinaria específica para su extensión y acabado superficial.

Se ejecutan teniendo como material fundamental el [hormigón](#), bien sea en la base o en toda su estructura. Estos pavimentos se clasifican de acuerdo al tipo de hormigón que se emplee.

2.2. Principales características de los pavimentos rígidos

El pavimento rígido es aquel en los que la losa de concreto de cemento Portland (C.C.P.) es el principal componente estructural, que alivia las tensiones en las capas subyacentes por medio de su elevada resistencia a la flexión, cuando se generan tensiones y deformaciones de tracción debajo de la losa producen su fisuración por fatiga, después de un cierto número de repeticiones de carga.

La capa inmediatamente inferior a las losas de C.C.P. denominada sub-base, por esta razón, puede ser constituida por materiales cuya capacidad de soporte sea inferior a la requerida por los materiales de la capa base de los pavimentos flexibles.

La estructura del pavimento debería ser capaz de proveer:

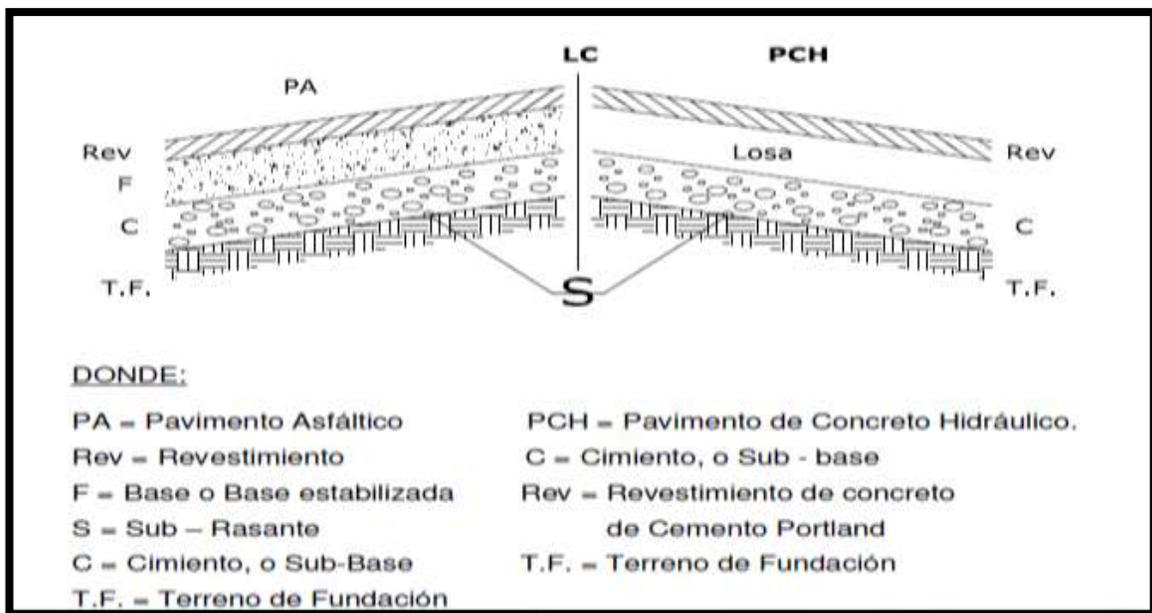
Una calidad de manejo aceptable, una adecuada resistencia al ahuellamiento, deslizamiento y agrietamiento, apropiados niveles de reflejo de luz, y un nivel bajo

de ruido. El objetivo final de la estructura es transmitir las cargas de la llanta de tal manera que no se sobrepase la capacidad portante de la subrasante.

La capa de rodadura de concreto de cemento Portland (PCC) puede ser:

Normal o convencional, reforzado (acero), subbase (estabilizada con cemento o asfalto), no estabilizada, subrasante compactada y natural.

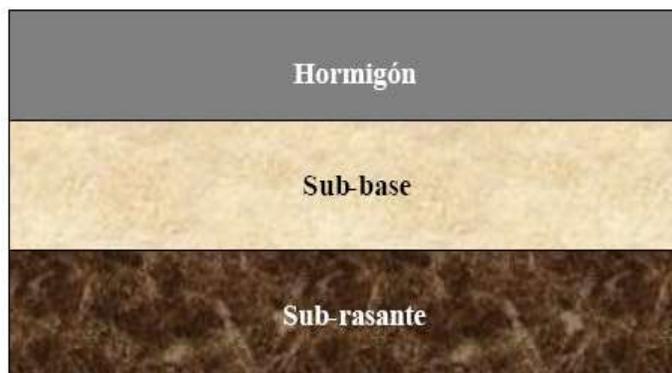
Figura 2.1 - Componentes estructurales de los pavimentos asfálticos y de Concreto hidráulico.



Fuente: Instituto Boliviano del Cemento y Hormigón

2.3. Elementos que integran el Pavimento Rígido

Figura 2.2.- Elementos que integran el pavimento rígido



Fuente: Vías de Comunicación. Ing.Crespo Villalaz. Limusa 2004.

2.3.1. Subrasante

Es la capa de terreno de una carretera que soporta la estructura de pavimento y que se extiende hasta una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto. Esta capa puede estar formada en corte o relleno y una vez compactada debe tener las secciones transversales y pendientes especificadas en los planos finales de diseño.

El espesor de pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la subrasante, por lo que ésta debe cumplir con los requisitos de resistencia, incompresibilidad e inmunidad a la expansión y contracción por efectos de la humedad, por consiguiente, el diseño de un pavimento es esencialmente el ajuste de la carga de diseño por rueda a la capacidad de la subrasante.

2.3.1.1. Características y Control

El material deberá cumplir con las normas y características de calidad, a continuación presentamos tablas en las cuales clasificamos de acuerdo al C.B.R., el tipo de terracerías y subrasantes:

Tabla 2.1

Categorías de suelos para Terracerías y capa Subrasante

Característica	Suelos Tolerables	Suelos Adecuados	Suelos Seleccionados
Tamaño máximo	25 % > 15 cm.	< 10 cm.	< 8 cm.
Contenido de finos , %	....	≤ 35	≤ 25
Limite Liquido , %	≤ 40	≤ 40	≤ 30
Indice de Plasticidad , %	....	....	≤ 10

Peso vol. Máximo, Kg./m ³	≥ 1450	≥ 1750	....
C.B.R. %	> 3	> 5	> 10
Expansión , %	....	< 2	0

Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto IMCYC

Para el control tecnológico se ejecutan los siguientes ensayos:

- Un ensayo de compactación para la determinación de la densidad máxima según el método AASHTO T-180-D para cada 1000m³ del mismo material, con un espaciamiento máximo de 100 mt. lineales; con las muestras recogidas en puntos que obedezcan siempre el orden: borde derecho, eje, borde izquierdo y viceversa.
- Determinación de la densidad en sitio cada 100 mt. lineales en los puntos donde fueran obtenidas las muestras para los ensayos de compactación.
- Determinación del contenido de humedad cada 100m.lineales inmediatamente antes de la compactación.

Ensayos de granulometría AASHTO 27, de límite líquido AASHTO T-89 y límite plástico AASHTO T-90; espaciamiento máximo de 250 mt.lineales

2.3.2. 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 subbase debe controlar los cambios de volumen y elasticidad que serían dañinos para el pavimento.

Se utiliza además como capa de drenaje y contralor de ascensión capilar de agua, protegiendo así a la estructura de pavimento, por lo que generalmente se usan materiales granulares. Al haber capilaridad en época de heladas, se produce un hinchamiento del agua, causado por el

congelamiento, lo que produce fallas en el pavimento, si éste no dispone de una subrasante o subbase adecuada.

2.3.2.1. Características y Control

Las características esenciales que deben tener este tipo de material son las siguientes:

- Suelos tipo grava arenosa, arenas arcillosas.
- Inorgánicos.
- Libres de materia vegetal, escombros y basuras.
- Libres de material congelado.
- Sin presencia de terrones ni trozos degradables.

Las principales funciones de la subbase de un pavimento rígido son las siguientes:

- Prevención del bombeo de suelos finos.
- Protección contra el congelamiento de la subrasante, para reducir la posible expansión diferencial.
- Para proporcionar una capa drenante.
- Prevención contra cambios volumétricos de la subrasante.
- Incremento de la capacidad portante de los suelos de apoyo, respecto a lo que es aun en las terracerías y capa subrasante.
- Sirve como superficie de tránsito durante la construcción

Los materiales están compuestos por gravas, gravas arenosas, mezclas de arena y limo.

El material empleado deberá cumplir con lo siguiente:

Tabla 2.2

Requisitos Granulométricos de Materiales para Subbases

Mezcla suelo – agregados AASTHO M147

	Porcentaje que pasa en peso
--	------------------------------------

Tamaño de la Malla						
	A	B	C	D	E	F
2"	100	100	...	...	...	...
1"	...	75-95	100	100	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	...	...
N° 4	25-65	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
N° 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
N° 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
N° 200	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20	8-25

Fuente: AASTHO M147

Adicionalmente el material deberá cumplir con lo que se indica a continuación:

Limite Liquido	25 % máx.
Indice de Plasticidad	6 % máx.
Desgaste de los Ángeles	40 % máx.
Contracción Lineal	4 % máx.
Equivalente de Arena	25 % min.
C.B.R.	≥ 40

Para el control tecnológico se ejecutan los siguientes ensayos:

- Un ensayo de compactación para la determinación de la densidad máxima según el método AASHTO T-180-D (100% y 97% Ds.máx.), con un espaciamiento máximo

de 100 mt. lineales; con las muestras recogidas en puntos que obedezcan siempre el orden: borde derecho, eje, borde izquierdo y viceversa, a 60 cm. del borde.

- Determinación de la densidad en sitio cada 100 mt. lineales en los puntos donde fueran obtenidas las muestras para los ensayos de compactación.
- Determinación del contenido de humedad cada 100m. lineales inmediatamente antes de la compactación.
- Ensayos de granulometría AASHTO 27, de límite líquido AASHTO T-89 y límite plástico AASHTO T-90; espaciamiento máximo de 150 mt. lineales.
- Un ensayo del Índice de Soporte de California **C.B.R.** de acuerdo con el método AASHTO T-193, con un espaciamiento máximo de 300 mt. lineales.

2.3.3. Superficie de rodadura

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. En general, se puede indicar que el concreto hidráulico distribuye mejor las cargas hacia la estructura de pavimento.

Un pavimento rígido se halla constituido por un elemento estructural fundamental una losa de concreto; debido a la rigidez que presenta esta losa, esta clase de pavimentos no requieren, al menos desde un punto de vista teórico, apoyarse sobre una explanada o capa de elevada capacidad de soporte.

Normalmente el espesor de la losa puede partir de unos 15 cm. para tránsito muy ligero, hasta llegar a ser del orden de 40 cm. en el caso de autopistas y carreteras con alto nivel de tránsito pesado, requiriendo además concretos homogéneos y de alta calidad, con resistencias a la tensión no inferiores a 3.5 MPa, y muy comúnmente de 4 Mpa. o más.

El hormigón de tipo vibrado utilizado para trabajos de pavimentación debe satisfacer ciertas características muy particulares, que marcan diferencias con respecto a los hormigones utilizados en otro tipo de obras, por lo que puede clasificarse como un hormigón de alto comportamiento. A continuación se indican las características que son fundamentales para la

correcta elaboración de la mezcla, que su finalidad es satisfacer los requerimientos indispensables para la elaboración de la losa de hormigón.

2.3.3.1. Propiedades y Control

La calidad de un concreto se define en términos de trabajabilidad, resistencia y durabilidad. Estos aspectos de la calidad del concreto fueron optimizados en el proyecto, encontrar un método de diseño que garantice estas características con el resultado de un concreto económico es una tarea importante.

Los objetivos particulares que se busca son:

- Su trabajabilidad para su colocado fácilmente.
- Resistencia y durabilidad satisfactoria.
- El logro de mezcla competitiva a costos los más bajos posibles.

Dentro de las actividades de control que se debe poner atención en la ejecución de losa de hormigón, podemos mencionar las más importantes:

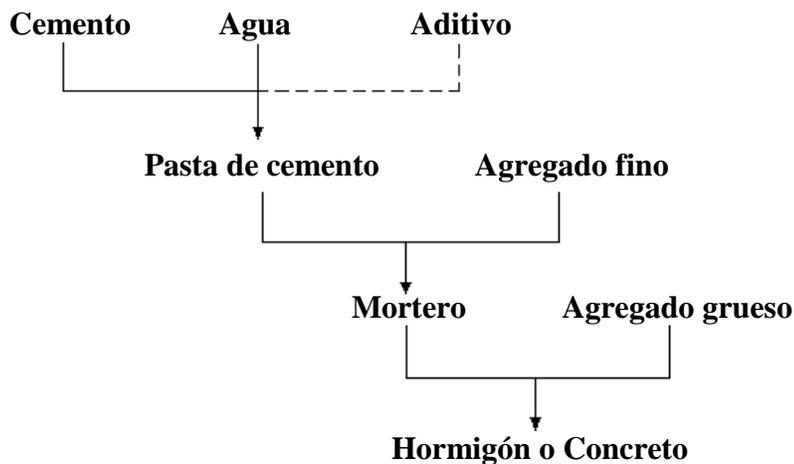
- Verificación previa de la calidad y consolidación de los materiales que componen las capas de transición o de apoyo.
- Evaluación y aceptación de los materiales que conformaran el hormigón, respaldados mediante certificados de calidad y abalados por ensayos físico-químicos de un laboratorio de materiales.
- Verificación y oportuna corrección al diseño y dosificación de la mezcla.

Control del transporte, colocación, vibrado, terminado y curado de la losa de hormigón.

2.3.4. Características y propiedades del hormigón

El hormigón, o concreto de uso común o convencional, se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales, cemento, agua y agregados, a los cuales eventualmente se incorpora un cuarto componente que genéricamente se designa como aditivo.

Fig. 2.3. Esquema de Integración del Hormigón



Fuente: Instituto Boliviano del Cemento y Hormigón

Las propiedades que presenta el hormigón, en estado fresco y endurecido difieren una de otra, de igual forma los fenómenos como la retracción, la temperatura, características mecánicas, reológicas y durabilidad del hormigón; es por esta razón que vamos a indicar y detallar las mismas de forma general (por no ser el centro de nuestro estudio).

2.3.5. Propiedades del hormigón fresco

❖ Trabajabilidad y Consistencia

Es la menor o mayor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse. Varía por varios factores: Cantidad de agua de amasado, tamaño máximo, granulometría y forma de los áridos; el que más influye es la cantidad de agua de amasado.

Para determinar la consistencia, el cono de Abrams es uno de los más usados:

El cono de Abrams es un molde troncocónico de 30 cm. de altura (Fig. 1.5) que se rellena con el hormigón a ensayar.

La pérdida de altura que experimenta la masa fresca del hormigón una vez desmoldada, expresada en centímetros, da una medida de su consistencia

Fig. 2.4 Prueba de Asentamiento con el Cono de Abrams



Fuente: Guía para ensayos de suelos. México 2006

En ningún procedimiento para determinación de la consistencia del hormigón deben usarse tamaños de árido superiores a 40 mm. en cuyo caso es necesario cribar previamente por el cedazo de dicha abertura y prescindir del material retenido.

Los hormigones se clasifican por su consistencia en:

Tabla 2.3

Consistencia de los Hormigones

Consistencia		Asiento en cono d Abrams (cm)
Seca	(S)	0 a 2
Plástica	(P)	3 a 5
Blanda	(B)	6 a 9
Fluida	(F)	10 a 15
Líquida	(L)	≥ 16

Fuente: normas AASTHO

❖ Segregación del hormigón

La segregación de una mezcla de concreto se define como la separación de sus constituyentes por falta de cohesividad, de manera que su distribución deja de ser uniforme.

Las principales causas de segregación en el concreto son la diferencia en tamaño de las partículas, la densidad de los constituyentes de la mezcla y una mala gradación de los agregados.

Así mismo, pueden influir otros factores como un mal mezclado, un inadecuado sistema de transporte, una colocación deficiente y un exceso de vibración en la compactación.

❖ **Exudación o sangrado del hormigón**

La exudación se considera como una forma de segregación en la que una parte del agua de mezclado tiende a elevarse a la superficie de una mezcla de concreto recién colocado.

Esto es debido a que los constituyentes sólidos de la mezcla no pueden retener toda el agua cuando se asientan durante el proceso de fraguado.

La exudación de la mezcla trae consecuencias nocivas. Por un lado, la parte superior de una porción del concreto se vuelve demasiado fluida lo que conlleva a estructuras porosas, débiles y poco durables. Por otra parte, si la evaporación del agua en la superficie del concreto es más rápida que la velocidad de la exudación, se producen grietas plásticas de contracción.

❖ **Docilidad**

La docilidad, concepto de difícil definición, puede considerarse como la aptitud de un hormigón para ser puesto en obra con los medios de compactación de que se dispone.

La docilidad depende, entre otros factores, de los siguientes:

- a) La cantidad de agua de amasado; cuanto mayor sea ésta, mayor será la docilidad.
- b) De la granulometría de los áridos, siendo más dóciles los hormigones cuyo contenido en arena es mayor, Pero por otra parte, a mayor cantidad de árido fino corresponde mayor agua de amasado necesaria y, por tanto, menor resistencia. Por ello las relaciones que indicamos no pueden extrapolarse más allá de ciertos límites.

❖ **Homogeneidad**

Es la característica por la cual los diferentes componentes del hormigón aparecen regularmente distribuidos en toda la masa, de manera tal que dos muestras tomadas de distintos lugares de la misma resulten prácticamente iguales. La homogeneidad se consigue

con un buen amasado y, para mantenerse, requiere un transporte cuidadoso y una colocación adecuada.

La homogeneidad puede perderse por segregación (separación de los gruesos por una parte y los finos por otra) o por decantación (los granos gruesos caen al fondo y el mortero queda en la superficie, cuando la mezcla es muy líquida).

Ambos fenómenos aumentan con el contenido de agua, con el tamaño máximo del árido, con las vibraciones o sacudidas durante el transporte y con la puesta en obra en caída libre.

❖ **Peso Específico**

Un dato de gran interés como índice de la uniformidad del hormigón en el transcurso de una obra, es el peso específico del hormigón fresco, sea sin compactar, sea compactado. La variación de cualquiera de ambos repercute en la consistencia, indica una alteración de la granulometría de los áridos, del contenido en cemento o del agua de amasado, por lo que debe dar origen a las correcciones oportunas.

2.3.6. Proceso de fraguado y endurecimiento

En general, el concreto fresco debe permanecer lo suficientemente plástico durante un tiempo, preferentemente una hora o por lo menos media hora, para que pueda ser manejado y consolidado convenientemente; después de ese tiempo, y dejada la mezcla en reposo, comienza el proceso de endurecimiento normal hasta que se dice que "ha fraguado". La Norma Americana ASTM C-403 adoptó el de la resistencia a la penetración. Esta prueba es similar a la efectuada con la aguja vicat, y consiste en tomar una muestra de mortero procedente del tamizado a través de la malla de 4,76 mm. (Nº 4) de una porción de concreto fresco. Se somete a penetración durante un período de varias horas a una profundidad de 25mm con agujas de punta plana cuyas áreas varían entre 16 y 645 mm². Con la fuerza de penetración, el área de la aguja y el tiempo en el que se hace la medición y se dibuja una curva.

De dicha curva, se toma como tiempo de fraguado inicial aquel cuya resistencia a la penetración es de 35 Kg./cm² y como tiempo de fraguado final aquel que alcanza un valor de 280 Kg./cm². Una vez que se obtiene el fraguado final, se dice que comienza el endurecimiento.

2.3.7. Propiedades del hormigón endurecido

❖ Peso específico

Depende de muchos factores, principalmente de la naturaleza de los áridos, de su granulometría y del método de compactación empleado.

El peso específico del hormigón será tanto mayor cuanto mayor sea el de los áridos utilizados y la mayor cantidad de árido grueso contenga, bien clasificado; y tanto mayor cuanto mejor compactado esté.

De todas formas, las variaciones de peso específico del hormigón son pequeñas, pudiendo tomarse en los cálculos el valor $2,3 \text{ t/m}^3$ para los hormigones en masa y $2,5 \text{ t/m}^3$ para los armados.

❖ Compacidad

Una buena compacidad no sólo proporciona una mayor resistencia mecánica (frente a esfuerzos, impactos, desgaste, vibraciones, etc.), sino también una mayor resistencia física (efecto de la helada) y química frente a las acciones agresivas, ya que, al contener una cantidad mínima de huecos o porosidades, las vías de penetración de los agentes exteriores son también mínimas.

❖ Permeabilidad

Los factores que influyen en la permeabilidad son las formas que el agua puede entrar al hormigón ya sea por presión y por capilaridad. El más influyente es, sin duda, la relación agua/cemento. Al disminuir ésta, disminuye la permeabilidad; mientras que para una relación agua/cemento igual a 0,5 el factor de permeabilidad es aproximadamente 15, para 0,8 es alrededor de 450, o sea, treinta veces mayor.

Medir la permeabilidad en un hormigón es un problema difícil, que no se encuentra resuelto satisfactoriamente. Existen diversos métodos, unos dedicados a la permeabilidad bajo presión y otros a la permeabilidad por succión (absorción)

❖ Resistencia al desgaste

En ciertos casos, como sucede en los pavimentos de carretera o interiores de construcciones industriales, interesa que el hormigón presente una gran resistencia al desgaste. Para conseguirlo, la primera condición es emplear un hormigón seco, ya que la lechada superficial es un elemento débil, fácilmente desgastable y productor de polvo.

Es también imprescindible emplear arena sílice y no caliza, al menos en una proporción no inferior al 30 por 100 de la arena total.

2.3.8. Retracción del hormigón

2.3.8.1. El fenómeno

Durante el proceso de fraguado y endurecimiento, el hormigón contrae su volumen cuando tal proceso se verifica en el aire; y se entumece si se verifica en el agua. Al primer fenómeno se denomina retracción. La retracción puede explicarse por la pérdida paulatina de agua en el hormigón.

El agua capilar y parte de la adsorbida pueden evaporarse a la temperatura ordinaria. El agua correspondiente a los otros tres estados puede perderse por calentamiento a temperatura cada vez más elevada, a medida que se asciende en la lista. Si el hormigón no está en un ambiente permanentemente húmedo, va perdiendo el agua capilar, lo que no produce cambios de volumen, y parte del agua adsorbida.

2.3.8.2. Factores que influyen en la retracción

Aparte del grado de humedad ambiente, en el fenómeno de retracción influyen:

- a) El tipo, clase y categoría del cemento influyen en el sentido de dar más retracción los más resistentes y rápidos, a igualdad de las restantes variables.
- b) A mayor finura de molido del cemento corresponde una mayor retracción.
- c) La presencia de finos en el hormigón aumenta apreciablemente la retracción. Los finos pueden provenir de los áridos o, lo que influye más todavía, de adiciones inertes que pueda poseer el cemento.
- d) La cantidad de agua de amasado está en relación directa con la retracción. Por ello a igualdad de dosis de cemento por m³ de hormigón, la retracción aumenta con la relación agua/cemento; y a igualdad de relación A/C, aumenta con la dosis de cemento.

e) La retracción aumenta cuando disminuye el espesor del elemento en contacto con el medio ambiente, por ser entonces mayor el efecto de desecación con respecto al volumen de la pieza.

2.3.9. Efectos de la temperatura en el hormigón

2.3.9.1. Hormigonado en tiempo frío

El hormigón no adquiere la resistencia necesaria cuando su fraguado y primer endurecimiento tienen lugar en tiempo de heladas.

Por esta causa, lo mejor es suspender el hormigonado cuando se prevean bajas temperaturas siendo lo deseable que la temperatura de la superficie más expuesta del hormigón no baje de 5° C durante las 72 primeras horas después del hormigonado.

Las precauciones que pueden adoptarse, caso de que sea imprescindible:

- 1) Calentar el agua de amasado a unos 40° C, o más, excepcionalmente, cuidando de que no se formen grumos en la hormigonera. Para ello conviene verter una parte de los áridos antes que el cemento o calentar los áridos.
- 2) Proteger las superficies hormigonadas, mediante sacos, hojas de plástico (polietileno), balas de paja, tejadillos con lana de vidrio, etc.
- 3) Prolongar el curado durante el mayor tiempo posible.

El peligro de que se hiele el hormigón fresco, es tanto mayor cuanto más agua lleve éste. Por ello se recomienda emplear, en estos casos, hormigones tan secos como sea posible.

2.3.9.2. Hormigonado en tiempo caluroso

No hay que olvidar que el calor, la sequedad y el viento provocan una evaporación rápida del agua, también de la del hormigón ya compactado lo que trae consigo pérdidas de resistencia, fisuras por aumento de la retracción en las primeras edades.

Para reducir la temperatura de la masa puede recurrirse al empleo de agua fría, con escamas o trozos de hielo en su masa. A ser posible, los áridos deben almacenarse protegidos del soleamiento.

- Hojas de plástico, que pueden colocarse directamente sobre el hormigón, aunque pueden marcarse los pliegues en su superficie.

- Capas de arena permanentemente húmedas (pueden manchar el hormigón).
- Inmersión en agua, de especial interés en prefabricación.

Como norma general y a pesar de las protecciones, no debe hormigonarse por encima de los 40° C, o por encima de los 35° C si se trata de elementos de mucha superficie (pavimentos, losas, soleras, etc.).

En las proximidades de estas temperaturas conviene regar continuamente, al menos durante 10 días, los encofrados y superficies expuestas de hormigón.

2.3.9.3. Influencia de la temperatura en el hormigón endurecido

El empleo de aireantes mejora apreciablemente la resistencia a la helada, también son eficaces las impregnaciones de la superficie de hormigón con aceite de linaza, tratamiento que se emplea en la técnica de pavimentos rígidos.

En cuanto a las altas temperaturas, el hormigón se comporta frente a ellas experimentando una serie de fenómenos fisicoquímicos que, en lo esencial, se resumen en la tabla 2.4.

Tabla 2.4

Acción de Altas Temperaturas Sobre el Hormigón

TEMPERATURA	EFEECTO SOBRE EL HORMIGÓN
< 100° C	Ninguna influencia
100°C a 150°C	El hormigón cede su agua capilar y de absorción
150° C durante un tiempo bastante largo	Ligera disminución de la resistencia a compresión y fuerte caída de la resistencia a tracción
Hasta 250°C en periodos cortos	Disminución de la resistencia a tracción sin afectar a la de compresión
300°C a 500°C	Pérdida de un 20 por 100 de la resistencia a compresión; la de tracción puede haber desaparecido
A 500°C y más	La cal hidratada se destruye por pérdida del agua de cristalización (agua combinada químicamente)
Hacia 900°C - 1000°C	La deshidratación es total y provoca la destrucción completa del hormigón

Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto IMCYC

2.4. Características mecánicas del hormigón

2.4.1. Resistencia a compresión y característica del hormigón

La resistencia a compresión simple es la característica mecánica más importante de un hormigón. Su determinación se efectúa mediante el ensayo de probetas. El concepto de resistencia característica se refiere, por antonomasia, a la resistencia a compresión medida sobre probetas cilíndricas 15 x 30 de veintiocho días de edad, fabricadas, conservadas y rotas según métodos normalizados; pero puede hacerse extensivo a cualquier tipo de ensayo, clase de probeta, modo de conservación y edad del hormigón, ya que se trata de una definición de tipo estadístico. Siempre que se hable, en esta obra, de resistencia característica, nos referimos a la primera definición, salvo advertencia en contrario.

.En definitiva, los valores recomendables de f_{ck} son 25 y 30 N/mm² para estructuras, reservándose los restantes valores de la serie para obras civiles, obras de hormigón pretensado y prefabricación.

2.4.2. Resistencia a tracción del hormigón

Para ciertos elementos de hormigón, como en el caso de pavimentos, puede ser más interesante el conocimiento de la **resistencia a tracción** que la de compresión, por reflejar mejor ciertas cualidades, como la calidad y limpieza de los áridos.

La **resistencia a tracción** que ofrece un hormigón se puede definir como el esfuerzo inverso al de compresión, que actúa de forma paralela a la línea axial mayor de un elemento sometido a alguna acción o sollicitación de carga.

2.4.3. Factores que inciden en la resistencia del hormigón

Entre los factores que inciden en la resistencia de concreto definiremos los siguientes:

a) Relación agua/cemento

En general, el factor más importante en la resistencia de un concreto totalmente compactado es la relación agua/cemento (a/c), Entre mayor es el contenido de agua de mezclado, mayor es la cantidad de agua que no se combina con el cemento, y por consiguiente, al disiparse la parte de agua evaporable la pasta será más porosa y la resistencia del concreto disminuye.

b) Cantidad de cemento

Generalmente se cumple que a mayor contenido de cemento se consiguen mayores resistencias. Dicha afirmación tiene su límite ya que se ha demostrado que para mezclas con una baja relación agua/cemento y con un contenido de cemento muy alto (superior a 470 Kg./m³), en la resistencia surge una disminución, en especial cuando se utiliza agregado de gran tamaño. Este comportamiento se debe a los esfuerzos inducidos por la contracción, que al ser obstruida por las partículas de agregado, causa agrietamiento de la pasta o una pérdida de adherencia entre el cemento y el agregado.

c) Características de los agregados

En general, se puede decir, que para una misma relación agua/cemento, las partículas de agregado con textura rugosa o de forma angular forman concreto más resistentes que otros redondeados o lisos debido a que hay mayor trabazón entre los granos gruesos y el mortero; sin embargo, para igual contenido de cemento, los primeros exigen mayor cantidad de agua para lograr una determinada manejabilidad y por ello el efecto neto sobre la resistencia no varía en forma apreciable

Una masa de agregados cuya granulometría sea continua, permite elaborar mezclas de alta compacidad, mucho más densos y por lo tanto se consiguen mayores resistencias.

La resistencia y rigidez propia de los granos de agregado también influyen en la resistencia del concreto. Esto se debe a que un agregado muy poroso y de baja densidad, tiene menor resistencia que uno de alta resistencia y muy denso.

d) Tamaño máximo del agregado

En general, la diferencia en tamaño máximo de un mismo tipo de agregado bien gradado, tienen dos efectos opuestos en la resistencia a la compresión del concreto. En primer lugar, para una consistencia dada y para igual contenido de cemento, la utilización de tamaños máximos mayores requiere menos agua de mezclado que los agregados de tamaño máximo menores.

Por otro lado, mezclas con la misma consistencia e igual relación agua/cemento, presentan resistencias más bajas cuando se utilizan agregados de tamaño máximo mayor.

En particular, se ha logrado demostrar que para concretos de alta resistencia, mientras mayor sea la resistencia requerida, menor deberá ser el tamaño máximo para que la eficiencia sea máxima.

Asimismo, para concretos de baja resistencia, mientras mayor sea el tamaño máximo, mayor será la eficiencia.

Sin embargo para concretos de resistencia intermedia, existe un rango amplio en los tamaños máximos que se pueden usar para una misma resistencia, esencialmente con igual contenido de cemento.

e) Agua

El agua es un elemento que influye considerablemente en la resistencia del concreto. El agua de mezclado forma aproximadamente el 15% del volumen total del concreto de donde, un 5% sirve para hidratar el cemento y el 10% restante lubrica al concreto y luego se evapora durante el proceso de fraguado, por lo que deja poros interiores que reducen la resistencia del concreto. Por otro lado, el agua que se utiliza en el curado del concreto, es importante, debido a que ésta cumple la función de seguir hidratando al cemento después de que fragua éste, por lo que la escasez de aquella puede dar lugar a menores resistencias.

f) Influencia del fraguado del concreto

Las condiciones de tiempo y temperatura durante el proceso de fraguado es otro de los factores que afectan la resistencia del concreto.

En climas fríos, el proceso de hidratación del cemento es más lento debido a que el medio ambiente le "roba" parte del calor de hidratación con el subsecuente retardo del tiempo de fraguado y, por lo tanto, la adquisición de resistencia se demora.

Por el contrario, cuando la temperatura es elevada, se aumenta la resistencia a muy temprana edad, pero se disminuye aproximadamente después de los 7 días. La razón es que una rápida hidratación inicial de los granos de cemento es superficial y parece formar una pasta con una estructura física más pobre y posiblemente más porosa.

g) Luego del proceso de fraguado del concreto, es necesario mantener el concreto tan saturado de agua como sea posible con el fin de terminar de hidratar al cemento y conseguir así su máxima eficiencia.

Por esta razón, la resistencia del concreto depende en gran medida de la atención que se le preste a este factor.

Otro factor importante en el curado es la temperatura, debido a que un aumento durante este proceso acelera las reacciones químicas de la hidratación lo cual afecta en forma benéfica la resistencia a edades tempranas del concreto; pero, con consecuencias adversas en la resistencia posterior.

h) Influencia de la edad del concreto

En la práctica, normalmente se especifica que el concreto alcanza la máxima resistencia a la compresión a la edad de 28 días. La explicación es porque de dicho tiempo el aumento de resistencia es muy poco.

2.4.4. Durabilidad del hormigón

A continuación, citaremos someramente los distintos agentes agresivos al hormigón y la forma de protegerse contra ellos.

2.4.4.1. Agentes agresivos al hormigón

Los agentes que pueden atentar contra la durabilidad del hormigón son muchos:

Acciones mecánicas: Cargas, sobrecargas, impactos, vibraciones, rozamientos. Producidos por causas naturales (agua corriente, aire) o artificiales. Las acciones mecánicas deben tenerse en cuenta en el cálculo.

Acciones físicas: Variaciones de temperatura y humedad, heladas, temperaturas extremas, fuego, corrientes eléctricas, radiaciones. Las acciones citadas pueden producir en el hormigón grietas, erosiones, fallos de unión pasta-árido, formación de compuestos expansivos, etc.

Acciones químicas: Sales, productos químicos orgánicos (aceites, grasas) o inorgánicos. Suelos y terrenos agresivos.

2.4.4.2. Protecciones

En la protección del hormigón frente a posibles acciones agresivas, las medidas preventivas que se adoptan de origen son las más eficaces y menos costosas.

Cualquier acción que aumente la compacidad del hormigón y disminuya su permeabilidad, mejora la durabilidad del mismo. Para ello, aparte de las medidas de tipo intrínseco, puede recurrirse a impermeabilizarlo o defenderlo mediante tratamientos o protecciones externas.

A continuación se enuncian algunos de los más empleados, por orden creciente de importancia y eficacia:

- Aplicación de lechada o mortero de cemento rico, en medio húmedo, cuando el hormigón es poroso y pobre en cemento.
- Revestimientos de chapas de resina sintética o goma, resistentes a muchos ácidos, álcalis y otras sustancias, que se aplican con adhesivos especiales.

En medios particularmente agresivos es muy recomendable emplear más de una medida de protección, previendo un posible fallo parcial en alguna zona. Las capas protectoras deben vigilarse y conservarse en buen estado de forma continua.

2.5. Materiales que constituyen la losa de hormigón

2.5.1. Cemento

Los cementos son los conglomerantes hidráulicos, o sea materiales artificiales de naturaleza inorgánica y mineral, que finamente molidos y convenientemente amasados con agua, forman pastas que fraguan y endurecen tanto en el aire como bajo el agua. Los cementantes que se utilizan para la fabricación del hormigón son hidráulicos, es decir, fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua, aún estando inmersos en ella, característica que los distingue de los cementantes aéreos que solamente fraguan y endurecen en contacto con el aire.

Los cementos para hormigón hidráulico son elaborados a base de clinker Pórtland en nuestro medio, por cuyo motivo se justifica centrar el interés en éste. Para la elaboración del clinker Pórtland se emplean materias primas capaces de aportar principalmente cal y sílice, y accesoriamente óxido de fierro y alúmina, para lo cual se seleccionan materiales calizos y arcillosos de composición adecuada. Estos materiales se trituran, dosifican, muelen y mezclan íntimamente hasta su completa homogeneización, ya sea en seco o en húmedo.

La materia prima así procesada, ya sea en forma de polvo o de lodo, se introduce en hornos rotatorios donde se calcina a temperaturas del orden de 1400° C, hasta que alcanza un estado

de fusión incipiente. En este estado se producen las reacciones químicas requeridas y el material se subdivide y aglutina en fragmentos no mayores a 6 cm. Cuya forma se regulariza por efecto de la rotación del horno. A este material fragmentado, resultante de la calcinación, se le denomina clinker Pórtland.

Una vez frío, el clinker en proporción en masa entre el 95 y 100%, se muele conjuntamente con una reducida proporción de yeso en masa entre 0 y 5%, que tiene la función de regular el tiempo de fraguado, y con ello se obtiene el polvo fino de color gris que se conoce como cemento Pórtland simple, el mismo que se constituye en el cemento que se ha utilizado tradicionalmente para la fabricación del concreto hidráulico en el país.

En la siguiente tabla 2.5 y tabla 2.6 obtenidos de la Norma Boliviana (IBNORCA).

Tabla 2.5

Análisis Químico-Físico y Mecánico de los Cementos

Análisis Químico	Unidad	Requisitos Según NB 011
Oxido de Magnesio: (NB 061) MgO	%	menor a 6,0
Oxido de Azufre: (NB 061) SO3	%	menor a 4,0
Pérdidas Por Calcinación: (NB 061) PPC	%	menor a 7,0
Ensayos Físicos	Unidad	
Tiempo inicial de fraguado: (NB 063)	h:min.	mayor a 0:45
Tiempo final de fraguado: (NB 063)	h:min.	menor a 10:00
Expansión (Le Chatelier C-A): (NB 643)	mm	menor a 10:00

Finura, Superficie Específica según Blaine: (NB 472)		cm ² /g	mayor a 2600
Peso específico: (NB 064)		g/cm ³	No especifica
Ensayos Mecánicos		Unidad	
Norma NB 470 (ASTM C1099)			
Resistencia a la compresión	3 días	MPa	mayor a 17
En mortero normalizado a:	7 días	MPa	mayor a 25
	28 días	MPa	mayor a 40

Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto IMCYC

TIPO	CARACTERÍSTICA	AJUSTE PRINCIPAL
I	Cemento normal u ordinario, destinado a obras de concreto en general.	Sin ajuste específico en este aspecto.
II	Destinado a obras de concreto en general y obras expuestas a la acción moderada de sulfatos o donde se requiere moderado calor de hidratación.	Moderado C3A
III	Cemento Portland de alta resistencia inicial.	Alto C3S
IV	Es el cemento del cual se requiere bajo calor de hidratación.	Alto C2S, moderado C3A
V	Es el cemento del cual se requiere alta resistencia a la acción de los sulfatos.	Bajo C3A

Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto IMCYC

El cemento Pórtland más usado en nuestro país, es el TIPO I (ASTM).

Tabla 2.6

Categorías Resistentes de los Cementos

Categorías resistentes		Resistencias a la compresión (Mpa) (NB 470) (1)		
		Mínimas a 3 días	Mínimas a 7 días	Mínimas a 28 días
Alta	40 Mpa	17	25	40
Media	30 Mpa	-	17	30
Corriente	25 Mpa	-	15	25

Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto IMCYC

2.6. Componentes del pavimento rígido

Los materiales incluidos en el concreto que en general se utilizan en la construcción de carreteras, son los agregados gruesos, agregados finos, agua, cemento y uno o más aditivos.

2.6.1. Agregados gruesos

Los agregados gruesos que se utilizan con más frecuencia en el concreto de cemento portland incluyen la piedra triturada, la grava, y la escoria de los altos hornos. También pueden emplearse otros materiales inertes, y los materiales listados se pueden usar solos o en combinación de unos con otros.

Los requerimientos específicos en relación con los agregados gruesos que se utilizan para este fin, se pueden dividir en cinco grupos: noticias nocivas, porcentaje de desgaste, solidez, peso por pie cubico (escoria) y granulometría.

El agregado grueso debe cumplir con lo especificado en la siguiente tabla:

Tabla 2.7: Graduación de agregado grueso para mezcla de concreto hidráulico para pavimentos.

Tamiz	% por peso que pasa por los tamices de malla cuadrada (AASHTO T-27 y T-11)	
	Designación de la Graduación	
	A	B
37,5 mm	100	---
25,0 mm	95 - 100	100
19,0 mm	---	90 - 100
12,5 mm	25 - 60 (5)	---
9,5 mm	---	20 - 55 (5)
4,75 mm (N° 4)	0 - 10 (5)	0 - 10 (5)
2,36 mm (N° 8)	0 - 5 (4)	0 - 5 (4)

Fuente: Guía AASHTO “Diseño de estructuras de pavimentos, 1993”

Además debe cumplir con las siguientes especificaciones:

Pérdida por abrasión, AASHTO T-96. 50% máximo, la cual se determina utilizando la máquina de Los Ángeles.

1.-Sanidad de los agregados gruesos utilizando sulfato de sodio (5 ciclos), AASHTO T-104 (18% máximo).

2.-Partículas con una o más caras fracturadas producto de la trituración (retenido malla N° 4) (50% mínimo).

3.-Porcentaje que pasa por el tamiz N° 200, AASHTO T-11 (1% máximo).

4.- Contenido de arcilla y partículas friables AASHTO T-112 (3% máximo).

2.6.2. Agregados finos

La arena es el agregado fino que, por lo general, tiene mayor utilización en el concreto (tanto natural como manufacturada), y está compuesta por granos fuertes, duros y durables.

El agregado fino deberá cumplir con los siguientes requisitos.

Tabla 2.8 : Graduación de agregado fino para mezclas de concreto hidráulico para pavimentos

Tamiz	% por peso que pasa por los tamices de malla cuadrada (AASHTO T-27 y T-11)
9,5 mm	100
4,75 mm (Nº 4)	95 - 100
1,18 mm (Nº 16)	45 - 80 (4)
300 µm (Nº 50)	10 - 30 (3)
150 µm (Nº 100)	2 - 10 (2)

Fuente: Guía AASHTO “Diseño de estructuras de pavimentos, 1993”

Además:

- 1.- Sanidad de los agregados finos, utilizando sulfato de sodio (5 ciclos), AASHTO T-104 (15% máximo).
- 2.- Equivalente de arena, AASHTO T-176, método de arbitraje (75 mínimo).
- 3.- Porcentaje que pasa por el tamiz n° 200, AASHTO T-11 (4% máximo)
- 4.- Libre de materia orgánica o impurezas, según ensayo AASHTO T-21.
- 5.- Contenido de arcilla y partículas friables AASHTO T-112 (3% máximo).

2.6.3. Agua

En la elaboración del concreto de cemento portland se puede utilizar casi cualquier tipo de agua. Es frecuente que las especificaciones para este material solo se requieran que el agua que se usa en la mezcla sea adecuada para beber, aun cuando se puedan utilizar en algunas ocasiones otras aguas, si se ha demostrado en pruebas de laboratorio o en experiencias de campo que son adecuadas para este propósito. El agua que se emplea no debe tener un exceso de alcalis, ácidos, aceite o materia orgánica. Los detergentes en el agua provocan contenido alto de aire. En algunas mezclas de concreto ha dado resultados satisfactorios el agua de mar, aun cuando no se ha usado por lo común en operaciones de pavimentación. El agua que se utiliza en la mezcla debe estar limpia, libre de aceites, ácidos, azúcar, materia orgánica, que se considere potable y que cumpla con la norma AASHTO T-26.

2.6.4. Cemento portland

El cemento portland se produce en cinco categorías básicas, designadas como tipos I a V. en la construcción de carreteras se usan por lo general tres de estas clases de cemento: los tipos I, II y III. Si en estas composiciones se introduce un agente portador de aire, se les denomina como tipos IA, IIA y IIIA, respectivamente.

Según el CR-2010 el cemento hidráulico debe cumplir con la norma AASHTO M 85 como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2.9. Especificaciones para el cemento hidráulico.

Tipo	Especificación
Cemento Portland, tipo I, II, o V	AASHTO M 85
Cemento hidráulico mezclado, tipo IS, IP, P, I(PM), o I(SM)	AASHTO M 240
Cemento de mampostería, tipo N, S, o M	ASTM C 91

Fuente: Guía AASHTO “Diseño de estructuras de pavimentos, 1993”

2.6.5. Aditivos

Por aditivo se entiende, en este caso, cualquier sustancia diferente de los agregados, aguas o cemento Portland, que se puede incorporar a una mezcla de concreto. Un gran número de aditivos se pueden utilizar junto con los ingredientes estándar de concreto de cemento portland para diferentes propósitos y en diversas formas.

Se deben proveer aditivos reductores de fragua, aceleradores de fragua y estabilizadores de hidratación o combinaciones de ellos que satisfacen la norma AASHTO M 194. Los aditivos estabilizadores de la hidratación deben cumplir con la norma AASHTO M 194, tipo B o D.9.

2.7. Esfuerzos en pavimentos rígidos

2.7.1. Esfuerzos debido al alabeo de la losa

❖ Definición del alabeo de losas.-

Figura 2.5: Alabeo en losas de concreto



Fuente: eldiosdelhormigon.blogspot.com/2012/11/el-dios-del-hormigon.htm

El alabeo es la curvatura hacia arriba o hacia abajo de las losas de hormigón.

Los esfuerzos generados en los pavimentos de concreto tienen diferentes orígenes. Algunos se deben a las características mismas del concreto y se presentan como consecuencia de las reacciones del cemento con el agua y se conocen como esfuerzos de retracción por secado, otros esfuerzos que se presentan en las losas se deben a las cargas a que se ven sometidas durante la vida útil, otro tipo de esfuerzos son los que se presentan por los cambios térmicos y de humedad en las losa

❖ **Causas del efecto del alabeo en losas de hormigón**

Típicamente, el alabeo hacia arriba de los bordes de la losa es provocado por el encogimiento debido al secado o contracción relativa de la parte superior respecto a la base de la misma. Cuando una superficie de la losa cambia de magnitud mas que la otra, la losa se arquea por sus bordes en la dirección del acortamiento relativo. Este alabeo es más perceptible en los lados y las esquinas.

Los cambios en las dimensiones de la losa que conducen al alabeo son más frecuentemente relacionados con los gradientes de humedad y de temperatura en la losa. Una característica primaria del concreto que afecta el alabeo es la retracción por secado. El caso más común de alabeo es cuando la parte superior de la losa se seca y se retrae con respecto con la base de la misma.

Los bordes de la losa se alabean hacia arriba.

❖ **Alabeo inmediato de la losa**

El alabeo inmediato de una losa es más frecuentemente relacionado con un pobre curado y un secado rápido de la superficie; y cualquier factor que incremente la retracción por secado, tal como un aditivo, tendera a incrementar el alabeo

El alabeo inmediato de una losa es más frecuentemente de lo que se cree y está relacionado con un pobre curado y un secado rápido de la superficie; y es que en las placas una exudación y un curado pobre, tienden a producir un concreto en la superficie con mayor riesgo de contracción por secado que el concreto en la parte inferior de la misma. La exudación se acentúa en placas sobre polietileno o mezclas colocadas encima de placas existentes de concreto; y las diferencias de contracción de la parte superior con respecto a la parte inferior en estos casos son mayores que para las placas sobre bases absorbentes. Las placas delgadas con espaciamientos muy largos de las juntas tienden a incrementar el alabeo. Por esta razón, las losas de remate no adheridas a losas existentes necesitan tener un espaciamiento de junta bastante menor.

Algunas veces se ha observado que los espesores en las losas de concreto cumplen por criterios de resistencia por efectos de las cargas de servicio, pero presentan importantes deformaciones en las esquinas, dando lugar a problemas de nivel y hasta fisuras de esquina, por esto a los diseños deben asegurar una correcta modulación en donde se modelen y se cuantifiquen estos efectos.

❖ **Alabeo por construcción**

En las losas, una exudación (sangrado) y un curado pobre tienden a producir un concreto en la superficie con mayor riesgo de contracción por secado que el concreto en la parte inferior de la misma. La exudación se acentúa en las losas sobre polietileno o mezclas colocadas encima de losas existentes de concreto; y las diferencias de contracción de la parte superior con respecto a la parte inferior en estos casos son mayores que para las losas sobre sub.-bases absorbentes.

Las losas delgadas y los espaciamientos muy largos de las juntas tienden a incrementar el alabeo. Por esta razón, las losas de remate no adheridas a losas existentes necesitan tener un espaciamiento de juntas bastante menor.

Otro factor que puede causar alabeo son las diferencias de temperatura en las partes superior e inferior de la losa. La parte superior de la losa expuesta al sol se expandirá en relación con la porción inferior menos caliente provocando un alabeo hacia abajo de los bordes. Alternativamente, bajo temperaturas frías durante la noche cuando la parte superior se contrae con respecto a la parte subyacente cálida el alabeo debido a este diferencial de temperatura se añadirá al alabeo hacia arriba provocando por los diferenciales de humedad. Durante el día cuando la temperatura en la parte más alta de las losas es mayor que en el fondo, la parte de encima tiende a expandirse con respecto al eje neutro durante el cual el fondo tiende a contraerse. Sin embargo, el peso de la losa restringe la expansión y la contracción de la misma, de esta manera, el esfuerzo de compresión son inducidos en lo alto de la losa cuando el esfuerzo de tensión ocurre en el fondo. En la noche cuando la temperatura en la parte superior de la losa es inferior que en el fondo, la parte superior tiende a contraerse con respecto al fondo, así, el esfuerzo de tensión son inducidos en la parte superior y los esfuerzos de compresión en la parte inferior.

Fig. 2.6: Alabeo por cambios diarios de temperatura



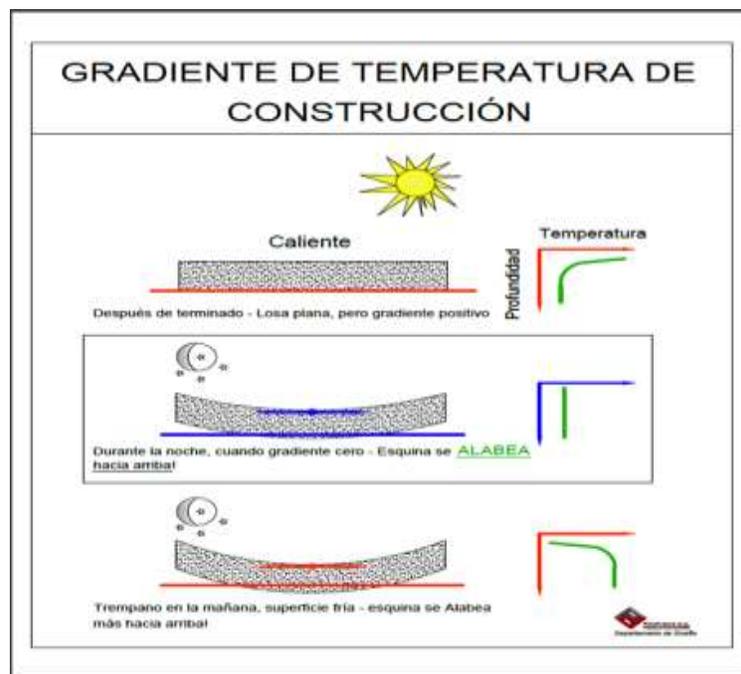
Fuente: eldiosdelhormigon.blogspot.com/2012/11/el-dios-del-hormigon.htm

El concreto, como muchos materiales de construcción, no es dimensionalmente estable cuando se somete a cambios en el contenido de humedad.

Las losas se secan desde la superficie hacia abajo, el gradiente de humedad a través de la losa conduce a una contracción diferencial. La carbonatación se suma a la contracción de superficie, pero puede reducirse mediante el uso de revestimientos superficiales, selladores y endurecedores.

Si las técnicas de acabado utilizadas causan que la pasta de cemento y el agregado fino se concentre en la superficie, la contracción diferencial puede agravarse.

Fig. 2.7: Alabeo por cambios diarios de temperatura



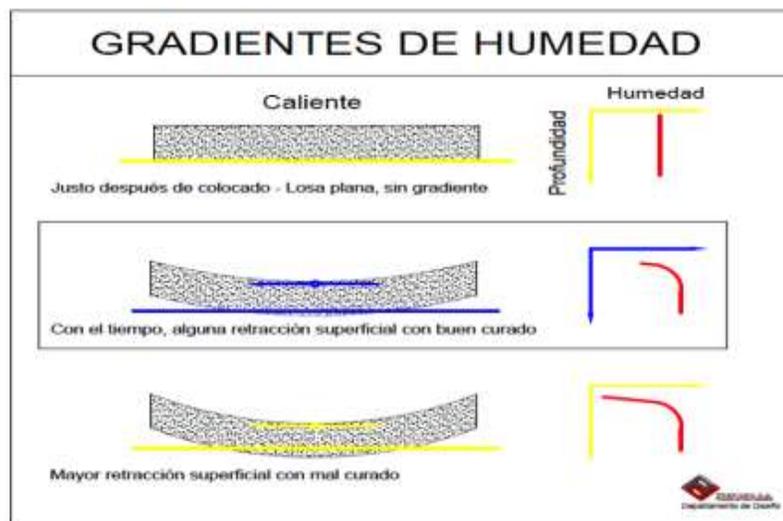
Fuente: eldiosdelhormigon.blogspot.com/2012/11/el-dios-del-hormigon.htm

La causa básica de alabeo es la contracción diferencial que se origina cuando la superficie se seca y el núcleo todavía se encuentra en estado plástico. Esta contracción también puede ser incrementada por la carbonatación del concreto en la superficie, en mezclas de concreto ricos en cemento, también puede ser por la desecación interna (contracción autógena) que producen los hidratos de la pasta de cemento.

Los factores que afectan la magnitud del alabeo en una losa son determinados por la humedad relativa y el gradiente de humedad en la losa. Estos incluyen el material de base,

las características de la mezcla, el manejo del concreto y las condiciones en servicio después de la construcción. Cuando la pérdida de humedad es mayor y la contracción ocurre cerca de la superficie expuesta del concreto comparado con el inferior de la losa se generara un gradiente de contracción el cual aplica un momento que alabea la losa. Si el momento de alabeo es mayor que aquel producido por el peso propio de la losa más cualquier carga aplicada, la losa se desviará hacia arriba o se alabea.

Fig. 2.8: Gradientes de humedad



Fuente: eldiosdelhormigon.blogspot.com/2012/11/el-dios-del-hormigon.htm

2.7.2. Acciones a realizar para evitar el alabeo en losas de hormigón

❖ **Concreto:**

Reducir la contracción por secado del concreto tiene un impacto en la contracción diferencial debida a un secado no uniforme, los materiales que constituyen el concreto, sus proporciones en la mezcla y el agua total que contiene el concreto son algunos de los factores que pueden afectar la contracción por secado.

❖ **Preparación de las capas de agregado de superficie, base y sub base**

Conformación de subbase - Normalmente en Bolivia la conformación de subbase se efectúa con motoniveladora y compactador de rodillo liso - Las tolerancias en la cota final deben ser estrictas para que no influyan negativamente en el espesor de la losa - **Conformación subbase de hormigón compactado con rodillo (hcr)** - Hormigón muy seco (asentamiento 0) elaborado en planta y transportado en volquetas - Puede colocarse como subbase para pavimento rígido con grandes beneficios para evitar el bombeo de finos y proporcionar apoyo uniforme - Se utiliza una colocadora de asfalto para esparcir el hormigón sobre la subrasante y el precompactado - Generalmente el espesor necesario oscila entre los 10 y 15 cm - Se construye carril por carril

Conformación subbase de hcr - Luego que el hormigón ha sido colocado el compactador de rodillo debe realizar dos pasadas por sector vaciado con el HCR - Las dos pasadas se realizan con vibración - El operador debe tener cuidado con el carril ejecutado anteriormente y que al momento de la compactación ya ha fraguado - Debe trabajarse con cuidado la unión de los dos carriles (junta constructiva longitudinal entre carriles)

Texturizado y curado

El texturizado de la superficie de la losa se realiza con fines de proporcionar seguridad de conducción a la superficie de rodadura del pavimento - Luego de colocado, consolidado y texturizado el hormigón la losa queda expuesta a los efectos medioambientales - La losa al tener una superficie plana de grandes dimensiones debe ser protegida mediante un curado adecuado - Se recomienda colocar una membrana de curado para evitar la evaporación del agua necesaria para la ganancia de resistencia y para que el gel de cemento reaccione con ésta retrasando la retracción por secado.

El texturizado se debe aplicar en el momento en el que el agua superficial ha desaparecido (brillo de la superficie de la losa) - Si se aplica antes las hendiduras pueden llegar a ser más profundas de lo permitido - Las hendiduras deben estar en 0.5 y 1 mm, no más - El proceso de texturizado debe ser continuo y de manera tal que no se formen “rebarbas” superficiales.

Fig. 2.9: Preparación de mantas para el curado



Fuente: Instituto Boliviano del Cemento y Hormigón

En zonas descubiertas donde la temperatura es alta y el viento y la humedad tienen un efecto de desecar muy rápidamente el agua superficial de la losa, es necesario colocar carpas para aminorar este efecto. A los pocos minutos de aplicada la membrana de curado se arrastran las carpas hacia la parte recién vaciada levantándolas por sectores. Se ha comprobado que esta faena colabora en la no disecación violenta del agua superficial aminorando la presencia de fisuras por retracción y secado. El tiempo en el que las carpas permanecen sobre la losa llega como máximo a seis horas, siendo lo común cuatro.

Fig. 2.10: Detalle de mantas para el curado



Fuente: Instituto boliviano del Cemento y Hormigón

En zonas como las del altiplano donde la temperatura del ambiente durante la noche puede llegar a los -10°C es necesaria la colocación de una manta de curado.

La manta (similar a una frazada) se va acopiando sobre un sector ya vaciado para luego ser colocada sobre el hormigón una vez que esta haya empezado a fraguar y tenga suficiente

resistencia de tal modo que no se deforme por el peso. Para evitar que se pegue el material de la manta a la losa todavía fresca, se coloca un plástico en la parte inferior. Las mantas deben tener un ancho similar al espaciamiento de las juntas transversales más un traslape para evitar que el frío penetre en la unión con las vecinas. Este ancho permitirá realizar los cortes destapando la mínima superficie posible.

Se utilizan perfiles metálicos para cuidar que en los traslapes se conserve el hermetismo que evita que el frío penetre dentro de la losa y para mantener fijada la manta a la losa por el borde y además evitando que el viento la levante.

La manta debe permanecer tres días como mínimo sobre la superficie de la losa para garantizar la adecuada ganancia de resistencia del hormigón

En zonas lluviosas o en vaciados durante la época del verano con precipitaciones frecuentes, se recomienda disponer de carpas móviles para evitar que el agua deteriore la superficie recién vaciada de la losa.

2.7.3. Consecuencias del alabeo

Por diferentes razones, un alabeo importante constituye un problema.

En la superficie de la losa se producen tensiones de tracción considerables, desde los bordes que tienden a alabearse hacia arriba, debido al peso propio y cualquier carga o restricción vertical que intenta empujarlos hacia abajo; esto, además de la retracción, puede producir agrietamiento y al aplicar una carga sobre la losa puede producir fisuras. El alabeo, en especial el alabeo diferencial en una junta o grieta,

también puede afectar a los materiales de piso que cubren la losa. Las juntas muy alabeadas o grietas pueden reducir la fluidez del tránsito vehicular de un piso o pavimento, provocando desagrado en el conductor, problemas en el vehículo y reducción de la productividad.

2.8. Incidencia del factor del alabeo en el diseño de pavimento rígido

Debido a que el concreto presenta deformaciones de acortamiento durante su

operación, las que se producen desde el fraguado, debe ser dimensionado en secciones de un largo máximo para configurar lo que se denomina una “losa de concreto”, y que da lugar a las denominadas juntas del pavimento, este dimensionamiento permite controlar el agrietamiento, las deformaciones y los esfuerzos asociados por alabeo y cargas.

El efecto de estas deformaciones es generalmente el levantamiento de los bordes en las juntas, lo que produce y se denomina “alabeo de la losa”, y que tiene como consecuencia una disminución de las zonas de apoyo sobre la base. Debido al peso de la zona levantada, este alabeo le induce esfuerzos de tracción al concreto, las cuales aumentan más al ser dicha zona cargada por el tránsito, lo cual constituye el principal criterio que busca controlar el diseño del pavimento de concreto.

2.9. Alternativa para disminución del alabeo:

Se considera la alternativa variando la geometría de las losas a cortas (1,75 x 2,80). Los motivos para plantear esta opción se consideran el mejor desempeño del pavimento rígido de losas cortas.

El ancho del carril de tráfico se divide en dos partes de 1.75 m, entre cada parte se materializa una nueva junta longitudinal. Las nuevas losas resultantes (losas cortas) tienen un largo de 2.8 m. La berma pasa a tener un revestimiento de hormigón conservando el ancho de 2.0 m. Entre la berma y la calzada (losas cortas) se materializa una nueva junta de amarre, en estas circunstancias se tiene un espesor de losa extendida hasta la berma.

Esta alternativa con losas cortas tienen la ventaja de solicitar a cada losa del pavimento con una rueda de camión a la vez, resultando en desempeños mejorados porque las tensiones disminuyen notablemente. Estudios basados en modelos de elementos finitos demuestran una notable reducción de tensiones cuando se utilizan losas de medio carril de ancho, lo que lleva a una mayor durabilidad del pavimento.

La Guía de diseño AASHTO no contempla el efecto de las variaciones climáticas, que en zonas de altos y medios gradientes térmicos producen el alabeo de las losas, las que con el paso de las cargas pueden originar tensiones excesivas.

Por este motivo, la única forma de poder verificar las tensiones en las losas bajo el efecto del alabeo y las cargas, es por medio de la teoría de elementos finitos. Esta verificación se realiza mediante un software especializado (EverFe) que permite el modelado de estos efectos.

Se ha determinado que la geometría de las losas tiene gran incidencia en las tensiones resultantes, de esta manera losas más cortas resisten mejor las tensiones que las losas tradicionales e incluso con menores espesores de cálculo. En casos de climas severos, las tensiones de las losas cortas pueden llegar a ser inclusive un tercio de las tensiones que alcanzarían losas con dimensiones tradicionales.

Por lo tanto, se propone para el presente proyecto la geometría de losas cortas y para su análisis se consideran cuatro alternativas, donde la primera está constituida por losas de geometría tradicional para poder comparar la variación de los valores de las tensiones con las alternativas con geometrías optimizadas.

Las tensiones máximas de tracción, una vez determinadas por el modelo de elementos finitos, puesto que el pavimento está sujeto a la aplicación de cargas repetitivas, deben compararse con modelos de fatiga probados para establecer la idoneidad del diseño.

Para ello, las tensiones resultantes se comparan con los esfuerzos admisibles a través del modelo de fatiga de la Portland Cement Association. Es importante recalcar que los métodos de diseño de AASHTO en actual vigencia no permiten considerar los efectos de alabeo constructivo de las losas, aspectos que están en estudio para ser incorporados en la nueva Guía AASHTO Mecánica – Empírica que a la fecha recién está en consulta con los Departamentos de Transporte de Estados Unidos para posteriormente establecer su vigencia plena en dicho país, motivo por el cual la adopción de métodos tensionales para la determinación de esfuerzos es la única vía posible de análisis para la consideración de alabeos constructivos y determinación elástica de tensiones en una estructura de pavimento rígido.

La influencia del clima en los pavimentos rígidos se manifiesta mediante el “alabeo constructivo” y el “alabeo por temperatura y humedad”, estos últimos son variables a lo largo del día y pueden incrementar o reducir el alabeo total que sería la suma de ambos. La deformación de las losas, en las condiciones extremas se expresa mediante un “gradiente equivalente”, que viene a ser la diferencia de temperatura entre las caras superior e inferior de una losa que aplicada a la misma en su estado plano, modela las condiciones extremas de deformación debidas tanto al alabeo constructivo así como las variaciones térmicas y por humedad.

Las sollicitaciones ambientales y el alabeo constructivo, se expresan como un gradiente térmico interno que se deduce a partir de la deformación total que puede experimentar el

hormigón, vale decir por: Alabeo Constructivo; Alabeo por diferencia de temperatura entre la cara superior y la inferior y Alabeo por diferencia de humedad entre ambas caras.

El alabeo constructivo se puede explicar desde el punto de vista de la temperatura y de la retracción. En cuanto a la temperatura, si el hormigón se vacía a tempranas horas de la mañana, la cara superior estará expuesta a la radiación solar y al propio calor de hidratación del hormigón y por tanto alcanzará una temperatura más elevada que la parte inferior de la losa. Esto puede ocurrir durante varias horas mientras el hormigón se encuentra en estado líquido o semisólido sin capacidad aún de resistir tensiones. Así el hormigón alcanza su punto de fraguado final con la cara superior muy caliente y la inferior más fría, y endurece con esa diferencia.

Si la diferencia de temperaturas en ambas caras es notable, el material fragua con geometría plana (en contacto completo con la sub-base) pero con una diferencia de temperatura interna. Cuando la superficie se enfría y llega a igualarse con la temperatura de la cara inferior, la losa se albea hacia arriba generando una curvatura cóncava denominada “alabeo negativo”. Durante las primeras horas del día siguiente, cuando la temperatura en la cara superior es menor (más fría) que en la cara inferior las esquinas se levantan aún más incrementando el alabeo negativo.

Si bien éste fenómeno tiene su importancia especialmente en climas extremos con alta radiación solar, la diferencia de temperatura tiene mayor importancia y se debe principalmente al hecho de que en las zonas secas y de altura se produce una mayor evaporación en la superficie de las losas manteniéndose la humedad en la parte inferior. Dependiendo del tipo de curado y el de acabado en la superficie del hormigón, (un elevado contenido de pasta o agua superficial al momento del frotachado agravan éste aspecto), entonces al secarse más la parte superior que la inferior se produce una diferencia en la retracción del hormigón, lo que origina nuevamente un alabeo negativo con las puntas hacia arriba. A medida que pasa el tiempo, si las condiciones de curado no son óptimas, la cara superior tendrá mayor retracción y por tanto se generará un mayor alabeo constructivo. Cuando se tiene un significativo incremento de humedad en la parte superior éste fenómeno puede ser parcialmente reversible, pero nunca en su totalidad.

El efecto del alabeo constructivo sumado a un posible descuido de los procesos constructivos podrá generar esfuerzos adicionales en la losa, lo que en función a su magnitud pueden producir tensiones significativas.

2.10. Métodos de dimensionamiento

2.10.1. Método AASHTO

El método de diseño AASHTO, originalmente conocido como AASHO, fue desarrollado en los Estados Unidos en la década de los 60, basándose en un ensayo a escala real realizado durante 2 años en el estado de Illinois, con el fin de desarrollar tablas, gráficos y fórmulas que representen las relaciones deterioro-solicitación de las distintas secciones ensayadas.

A partir de la versión del año 1986, y su correspondiente versión mejorada de 1993, el método AASHTO comenzó a introducir conceptos mecanicistas para adecuar algunos parámetros a condiciones diferentes a las que imperaron en el lugar del ensayo original. Se ha elegido el método AASHTO, porque a diferencia de otros métodos, éste método introduce el concepto de serviciabilidad en el diseño de pavimentos como una medida de su capacidad para brindar una superficie lisa y suave al usuario.

Los criterios de diseño son:

- El número de ejes equivalentes de cargas axiales de 18,000 libras
- El espesor de la losa,
- El módulo de elasticidad del hormigón,
- El módulo de ruptura del hormigón,
- El módulo de reacción de la subrasante,
- El coeficiente de transferencia de carga en las juntas
- El coeficiente de drenaje
- Confiabilidad
- Desviación estándar o nivel de servicio fina

Todos estos factores son necesarios para predecir un comportamiento confiable de la estructura del pavimento y evitar que el daño del pavimento alcance el nivel de colapso durante su vida en servicio.

Un pavimento de concreto o pavimento rígido consiste básicamente en una losa de concreto simple o armado, apoyada directamente sobre una base o subbase. La losa, debido a su rigidez

y alto módulo de elasticidad, absorbe gran parte de los esfuerzos que se ejercen sobre el pavimento lo que produce una buena distribución de las cargas de rueda, dando como resultado tensiones muy bajas en la subrasante.

Según AASHTO Las dimensiones típicas de losas de pavimentos de hormigón son de 3,6 m de ancho por 4,5 m de longitud (AASHTO 93) con espesores de entre 15 a 35 cm, dependiendo del nivel de tráfico, el clima y los materiales. El espesor requerido depende principalmente de la carga por eje y el número de repeticiones de carga, resistencia del hormigón, la longitud de la losa, y las condiciones climáticas durante el curado (alabeo de construcción).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL ALABEO EN LOSAS DE CONCRETO

3.1. Introducción

En el transcurso de este proceso de evaluación se tomara en cuenta aspectos imprescindibles como ser descripción de las características más relevantes para facilitar la identificación, procedimientos de medición y cuantificación, así como esquemas explicativos y fotografías.

Este trabajo se abocará principalmente al estudio de cómo afecta el alabeo que se produce en las losas de hormigón a la calidad funcional, del pavimento, que es la parte del firme que está en contacto con los vehículos y que se conoce también con el nombre de capa de rodadura.

3.2. Generalidades

El conocimiento del efecto del alabeo en losas de hormigón y de su comportamiento a través del tiempo, son tópicos de vital importancia para el organismo encargado de su diseño, construcción, conservación y operación; sin embargo dichos tópicos interesan en forma fundamental al numeroso grupo de usuarios de los pavimentos, tanto urbanos como carreteros, por las implicaciones que tienen en la seguridad y economía del transporte.

El conocimiento de dichos tópicos se obtiene mediante un proceso de investigación, tanto en el campo como en el gabinete, recabando información de tipo documental o efectuando mediciones en el campo de cada una de las losas de concreto que conforman un determinado segmento de estudio que es la acción principal para poder determinar el efecto del alabeo en dichas losas convirtiéndose en un proceso sistematizado, capaz de aportar información confiable y necesaria para la toma de decisiones sobre las posibles estrategias que pueden ser aplicables para aceptar, y tratar de contrarrestar este fenómeno.

Como se menciono anteriormente, el proceso de evaluación implica la obtención de una serie de datos recopilados únicamente mediante mediciones realizadas en campo utilizando instrumentos topográficos de alta precisión y confiabilidad.

3.2.1. Importancia de la evaluación y seguimiento

En los países en desarrollo como en los altamente desarrollados, se vuelve objeto de gran importancia, el conocimiento del estado actual y futuro de los caminos, las relaciones vehículo-pavimento-usuario y las implicaciones económicas del estado superficial del pavimento en la economía del transporte, así como de las decisiones tomadas por el organismo encargado de las redes viales respecto a los trabajos de conservación, rehabilitación o reconstrucción que deban ejecutarse, para alcanzar un nivel de servicio predeterminado, incluyendo eficiencia técnica muy desarrollada de cada estrategia propuesta.

Se establece dentro de los aspectos relevantes como se manifiesta el efecto del alabeo en las losas de hormigón que conforman el pavimento rígido, la presencia de el levantamiento de las esquinas de las losas son fallas que pueden ser observadas a simple vista dentro del tramo evaluado que pueden no estar directamente relacionadas con el diseño, pues dependen por ejemplo, del deterioro normal acumulado, de la calidad de la construcción, de la calidad y variabilidad de los materiales, entre otros. El deterioro que produce el alabeo en las losas de concreto son de gran importancia para los usuarios, ya que de ellas dependen, en gran parte las condiciones de seguridad, comodidad y economía del servicio que el pavimento ofrece al usuario.

Un aspecto importante que debe señalarse es el relativo a que no pueden establecerse reglas fijas para efectuar la evaluación del alabeo de losas de un pavimento, debiendo más bien considerarse que cada caso presenta condiciones particulares.

Por otra parte, debe tenerse en cuenta que los resultados de la evaluación efectuada en un momento dado constituyen la información sobre el estado o condición del pavimento en ese momento, pero si se comparan los resultados correspondientes a las evaluaciones en tramos de pavimento cuyo tiempo de vida útil sea completamente diferente de la vida del pavimento, se tendrá información sobre el comportamiento del pavimento en el lapso cubierto por las dos evaluaciones, de manera que se pueda realizar la comparación de ambos tramos evaluados pudiendo comprobar de que manera se manifiesta el alabeo en las losas de hormigón a través del tiempo y de las cargas continuas que recibe el mismo.

3.3. Procesos de evaluación

3.3.1. Evaluación inicial

La evaluación inicial forma parte de la investigación necesaria del estado en el que se encuentran las losas de concreto del tramo de estudio el pavimento antes de entrar en operación, como pavimento en caso del primer tramo de estudio o como pavimento antiguo como es el caso de la avenida circunvalación.

3.3.2. Evaluación sistematizada y seguimiento

A partir de la ubicación de los tramos de estudio, se procederá a efectuar un programa de mediciones, que constituyen un proceso netamente de medición de cada losa de pavimento rígido presente en los segmentos designados para el estudio del efecto del alabeo en las losas. En este tipo de evaluación se deberá aplicar un proceso de recopilación de datos obtenidos por mediciones realizadas utilizando instrumentos topográficos que permitan la obtención confiable y precisa de la información.

3.3.3. Evaluación puntual

Este tipo de evaluación fundamentalmente tiene como finalidad definir adecuadamente un problema específico, conociendo en la forma más completa posible los rangos presentes del alabeo en las losas de concreto para determinar las causas que ha originado este efecto.

3.4. Identificación del alabeo de losas en el pavimento

Está destinado a facilitar y uniformar criterios y procedimientos para la identificación y recolección de información relacionada con la presencia del levantamiento de las esquinas de losas que conforman el pavimento que es la característica del efecto del alabeo.

3.4.1. Método empleado para la determinación del alabeo en losas de concreto

3.4.1.1. Perfilometría con nivel de ingeniero

3.4.1.2. Definición

La perfilometría es una técnica que se utiliza con el fin de medir el perfil de una superficie. Mediante la perfilometría originamos perfiles en los cuales se puede apreciar el alabeo que se produce en un determinado tramo de pavimento rígido.

3.4.2. Tramos de Evaluación

La primera etapa corresponde al trabajo de campo en el cual se realiza una inspección previa del lugar definiendo los dos tramos de estudio que fueron determinados para este estudio

como también la subdivisión de segmentos donde serán realizadas las mediciones de los cuales obtuvimos sus coordenadas.

- Una vez identificados los dos tramos de estudio se fijó los límites para cada segmento de medición.
- Posteriormente estos tramos son divididos en unidades de muestreo, los cuales deben ser marcados e identificados para comenzar con su medición.

3.4.2.1. Unidades de muestreo

Se realizó un estudio comparativo por lo que se requiere de dos tramos de estudio con características diferentes el uno del otro para establecer el efecto del alabeo en las losas, se dividieron segmentos de medición cada 1km tomando como muestra 4km para cada tramo haciendo un total de 8km, de los cuales se tomaron segmentos de 200m cada km para su medición losa por losa.

3.4.2.2. Procedimiento de Medición del alabeo

La primera etapa corresponde al trabajo de campo en el cual se puede observar e identificar a simple vista que existe alabeo en las losas de hormigón ya que sus bordes se encuentran claramente levantados de su superficie. Esta información se registra en formatos adecuados para tal fin; en la práctica debe proveerse el espacio necesario para registrar toda la información requerida para el cálculo posterior, entonces se recurre a planillas de apoyo de esquemas gráficos o registro gráfico del alabeo presente en las losas.

3.4.2.3. Método de Medición

El registro y medición nos proporciona todas las características necesarias para la evaluación y análisis de la presencia del alabeo en las losas de concreto y su magnitud. Para tal fin es necesario establecer el tipo de medición a realizarse en el presente estudio, tomando como información de respaldo lo contenido en el presente trabajo, nos referimos específicamente al levantamiento de las esquinas de las losas que es apreciado a simple vista siendo el objeto de medición, en base a esta información se procederá a realizar la medición realizando el levantamiento topográfico para poder establecer:

- Medición del desnivel presente entre las esquinas de las losas y su superficie original tomando el eje central de la vía de los tramos de estudio definidos anteriormente.

- Número losas afectadas.
- Deformaciones longitudinales del eje de la vía atribuibles al desnivel (mm.) causado por el alabeo presente en las losas.
- Medidas en mm de los desniveles existentes en las losas debido al levantamiento de sus esquinas.

❖ Ejecución de la perfilometría

Fig. 3.1. Levantamiento topográfico en campo



Fuente: Elaboración propia

Para la ejecución del levantamiento topográfico requerido para la perfilometría se requieren de tres personas que trabajan conjuntamente, un operador que conduce el nivel óptico y realiza las lecturas, un auxiliar que las anota y una persona que sostenga la mira para realizar la lectura de las cotas de los puntos que sean requeridos para originar los perfiles de la superficie e estudio.

Asimismo, debe haberse seleccionado los tramos de estudio y su clasificación en segmentos de muestra de 200m cada km. Las mediciones se efectúan leyendo con el nivel óptico la mira que se va trasladando a cada punto del cual se requiere conocer su cota terreno.

Para determinar las cotas se realizan diferentes lecturas con el instrumento teniendo un valor en m que al ser procesado en gabinete nos proporciona la cota terreno del punto sobre el que se realizó la lecturación.

La posición que adopta el equipo la elegimos según corresponda la lecturación que se quiere realizar estando dentro del rango de 0m hasta 5m que es la longitud máxima de la mira metálica, datos que deben ser anotados en una planilla con formato determinado que consta de una cuadrícula compuesta por una cantidad de filas y columnas necesarias según la longitud en la que se requiere realizar el levantamiento topográfico; empezando por el casillero (1), los datos se llenan de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha, culminando en el último casillero.

El proceso de medición es continuo. Se observa a continuación el formato de planilla de campo utilizado para el registro de 200m de medición, correspondientes para un segmento de estudio.

❖ **Material y Equipo de Trabajo**

La evaluación del alabeo incluye los siguientes aspectos:

❖ **Equipo Utilizado para realizar la perfilometría**

La perfilometría puede ser realizada mediante levantamiento topográfico, utilizando el nivel de ingeniero ya que es más preciso que cualquier otro equipo para realizar la nivelación de cualquier segmento para su estudio.

❖ **Nivel digital SOKKIA SDL50**

El **nivel topográfico**, también llamado nivel óptico o equaltímetro es un instrumento que tiene como finalidad la medición de **desniveles** entre puntos que se hallan a distintas alturas o el traslado de [cotas](#) de un punto conocido a otro desconocido

El nivel óptico consta de un anteojo similar al del teodolito con un retículo estadimétrico, para apuntar y un nivel de burbuja muy sensible (o un compensador de gravedad o magnético en el caso de los niveles automáticos), que permita mantener la horizontalidad del eje óptico del anteojo, ambos están unidos solidariamente de manera que cuando el nivel está

desnivelado, el eje del anteojo no mantiene una perfecta horizontalidad, pero al nivelar el nivel también se horizontaliza el eje óptico.

Fig. 3.2: Nivel de ingeniero



Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Nivel_topográfico

En los últimos treinta años se ha producido un cambio tal en estos instrumentos, que por aquella época, principios de la década del '80 casi todos los instrumentos que se utilizaban eran del tipo "manual" pero en este momento es raro encontrar uno de aquellos instrumentos, incluso son raras las marcas que aun los fabrican ya que las técnicas de fabricación se han perfeccionado tanto que los automáticos son tan precisos y confiables como los manuales, a pesar de la desconfianza que despertaban en los viejos topógrafos los primeros modelos automáticos.

Este instrumento debe tener unas características técnicas especiales para poder realizar su función, tales como burbuja para poder nivelar el instrumento, anteojo con los suficientes aumentos para poder ver las divisiones de la mira, y un retículo con hilos para poder hacer la puntería y tomar las lecturas, así como la posibilidad de un compensador para asegurar su perfecta nivelación y horizontalidad del plano de comparación

La precisión de un nivel depende del tipo de nivelación para el que se lo utilice. Con este nivel y la metodología apropiada se pueden hacer nivelaciones con un error de aproximadamente 1.5 cm por kilómetro de nivelada.

❖ **Mira telescópica de aluminio**

Fig. 3.3: Mira de aluminio



Fuente: Elaboración propia

Es una regla graduada que permite mediante un nivel topográfico, medir desniveles, es decir, diferencias de altura. Con una mira, también se pueden medir distancias con métodos trigonométricos, o mediante un telémetro estadimétrico integrado dentro de un nivel topográfico, un teodolito, o bien un taquímetro se encuentra graduada en milímetros, cada metro. Alcanza una extensión de hasta 5m.

❖ Trípode

Fig. 3.4: Trípode



Fuente: Elaboración propia

Es un aparato indispensable para el uso del nivel de ingeniero, esta compuesto por tres patas las cuales tienen tornillos para su regulación según la tarea que se quiera realizar, contiene una base en su parte superior que es el lugar donde se apoya el nivel óptico.

❖ Gps

Fig. 3.5: GPS Garmin



Fuente: Elaboración propia

El **sistema de posicionamiento global (GPS)** es un sistema que permite determinar en toda la Tierra la altura a nivel del mar de cualquier punto precisado o la posición de un objeto una precisión de hasta centímetros (si se utiliza GPS diferencial), aunque lo habitual son unos pocos metros de precisión.

El GPS funciona mediante una red de 24 satélites en órbita sobre el planeta Tierra, a 20 200 km de altura, con trayectorias sincronizadas para cubrir toda la superficie de la Tierra.

Cuando se desea determinar la posición, el receptor que se utiliza para ello localiza automáticamente como mínimo cuatro satélites de la red, de los que recibe unas señales indicando la identificación y la hora del reloj de cada uno de ellos. Con base en estas señales, el aparato sincroniza el reloj del GPS y calcula el tiempo que tardan en llegar las señales al equipo, y de tal modo mide la distancia al satélite mediante el método de trilateración inversa, el cual se basa en determinar la distancia de cada satélite al punto de medición. Conocidas las distancias, se determina fácilmente la propia posición relativa respecto a los satélites.

❖ **Elementos de medición: cinta métrica-flexómetro**

Permiten determinar longitudes o alturas en m, cm y mm de cualquier lugar que se requiera realizar la medición, son operados manualmente.

3.4.3. Descripción del trabajo de campo

Previo al trabajo en terreno, se deberá verificar:

- El material y equipo a emplear en el registro del levantamiento de las esquinas de las losas producido por la presencia del alabeo.
- Planos, esquemas gráficos o simplemente planillas de identificación del terreno ya sea mediante progresivas, coordenadas UTM, cotas terreno determinadas con el gps sobre la altura del nivel mar, datos que son imprescindibles para poder comenzar con el perfil

Las actividades a realizarse son las siguientes:

Replanteo: Planillas de identificación de los tramos de estudio, marcación de los segmentos de división sobre las losas que confirman el pavimento rígido.

Inspección Visual: Para tal efecto, se efectuará un recorrido de los tramos a estudiar, con la finalidad de obtener información sistematizada para lo cual será necesario seleccionar o subdividir en segmentos de medición tomando 200m cada 1km. Se realizara la marcación de los límites de cada segmento además de la marcación de puntos en el eje de las vías de cada losa de los cuales se realizo el levantamiento topográfico.

Toma de datos: Luego del análisis y el levantamiento topográfico obteniendo lecturas mediante las cuales se puede determinar las cotas terreno de cada esquina de las losas para

realizar la comparación con el diseño original , la información de terreno es anotada en planillas de cálculo elaboradas de manera particular (ver planillas de registro y procesamiento en Anexos III, V).

Procesamiento de la Información: La información recogida es procesada, de acuerdo al cálculo presentado por la metodología, pudiendo obtener de esta manera el desnivel entre las esquinas de las losas y su rasante determinando de esta manera la presencia del alabeo en las losas que fueron estudiadas.

Para tal efecto, se efectuará un recorrido de los tramos a estudiar, con la finalidad de obtener información sistematizada para lo cual será necesario seleccionar o subdividir en segmentos de medición tomando 200m cada 1km. Se realizara la marcación de los límites de cada segmento además de la marcación de puntos en el eje de las vías de cada losa de los cuales se realizo el levantamiento topográfico.

3.5.Cálculo del alabeo en losas de hormigón

Como se ha explicado, para la generación de los datos requeridos para calcular el delta del alabeo se procedió al levantamiento topográfico mediante el cual se obtuvieron lecturas en cada esquina de las losas para poder determinar su cota terreno de cada punto y realizar la comparación con las cotas rasante que nos fueron proporcionadas del diseño original para determinar la presencia del alabeo y su magnitud tras más de 15 años de vida útil como es el caso del tramo de la AVENIDA CIRCUNVALACIÓN para realizar la comparación con un tramo nuevo con no más de dos años de construcción como es el pavimento rígido de LA NUEVA TERMINAL DE BUSES DE TARIJA.

Al realizar los perfiles de la superficie de cada losa con las cotas terreno obtenidas mediante el levantamiento se demostrara que las losas del pavimento tienen un perfil cercano a una línea recta donde se puede apreciar de forma clara que donde existe alabeo la cota terreno se encuentra por encima de la cota rasante generando un Δ calculado en mm que sería la deformación del alabeo en las losas de hormigón.

La dispersión de los datos obtenidos con el nivel de ingeniero es analizada y procesada para determinar las cotas terreno de cada losa a partir de las lecturas obtenidas mediante el levantamiento topográfico para generar planillas de cálculos y expresar los resultados mediante graficas con puntos de dispersión donde se puede notar claramente la diferencia

entre las cotas terreno y las cotas rasante de las esquinas de las losas, diferencia producida debido al levantamiento de sus esquinas fenómeno establecido como alabeo.

Posteriormente procedimos a realizar perfiles cada diez losas del pavimento donde se puede apreciar la desviación que se produjo de algunos puntos a causa del efecto del alabeo presente en las losas.

Después del cálculo del alabeo se realizaron graficas de las losas más representativas, eligiendo las que presentaban mayor Δ de alabeo en las esquinas con respecto a su punto del centro.

Los resultados fueron expresados mediante graficas individuales de cada losa realizando un análisis de cada una de ellas según los resultados obtenidos.

3.6. Alternativa para disminuir la presencia del alabeo en losas de concreto

El diseño del pavimento rígido propuesto como alternativa para disminuir la presencia del alabeo en losas de concreto, se está considerando la alternativa de losas cortas (4 losas de 1.75 x 2.80 m y bermas de hormigón de 1.50 x 2.80 m), cuyos beneficios y características son ampliamente conocidos, resaltando el excelente comportamiento de este tipo de losas ante las solicitaciones del tráfico, efectos de soporte y aspectos medio ambientales.

Se plantean losas cortas para disminuir los esfuerzos de una losa normal, una losa corta tendrá la mitad del esfuerzo que en una losa normal, por eso se plantea esta alternativa, si bien el alabeo seguirá presente en las losas no será el mismo ya que no abran los otros esfuerzos producidos en la losa que sumen este efecto y pongan en una situación crítica a la losa hasta provocar su fisuración, para esto disminuimos la longitud y el criterio lógico en el ancho es partir por la mitad la losa y en la longitud hacer el valor más pequeño que cumple con la relación de lados establecida por la norma AASHTO que establece que la relación ancho de losa sobre la longitud debe ser mayor a 0,6m, haciendo esta relación se tiene una valor de 2,92m de longitud el cual no se lo tomo por no estar al límite y por grado de seguridad se opto por 2,80m.

Se demostrará el efecto de las losas cortas por geometría, espesor y esfuerzos. Las características geométricas de las losas cortas responden ante las cargas con menores tensiones y desplazamientos, como así también con menor retracción y alabeo.

Para lograr los objetivos propuestos se han realizado diversos análisis en base a las metodologías actuales disponibles, como son: el procedimiento de diseño y verificación de pasajuntas cuyo análisis se realiza en base a los lineamientos propuestos por Westergaard, las últimas investigaciones sobre transferencia de carga entre losas y las modelaciones por medio de elementos finitos, las cuales se describen en los siguientes puntos.

Una vez realizado este cálculo, para facilitar el análisis se ha recurrido al software especializado EverFE que modela pavimentos en elementos finitos y verifica tensiones en losas y barras pasajuntas.

3.6.1 Método de elementos finitos

El método de los elementos finitos es un método numérico utilizado frecuentemente para obtener la solución aproximada de un sistema de ecuaciones diferenciales parciales, permitiendo encontrar soluciones apropiadas para diversos campos de la ingeniería, uno de los tópicos en el que se utiliza más comúnmente es en los problemas físicos que poseen geometrías muy complicadas lo que hace necesario el uso de un computador para llevar a cabo la implementación del método. Generalmente el método de elementos finitos se programa computacionalmente para calcular los desplazamientos, las deformaciones y tensiones cuando se trata de un problema de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. Dada la dificultad de encontrar la solución a estos problemas de manera analítica, con frecuencia en la práctica los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en una herramienta alternativa para encontrar estas soluciones, ya que la convergencia de esta metodologías puede decirse es buena.

3.6.2. Respuesta del modelado estructural del pavimento rígido

Para la realización de la metodología de diseño debemos tomar en cuenta lo siguiente:

- La selección del programa de elementos finitos para el desarrollo de la estructura del modelo.
- El desarrollo de modelos de elementos finitos para determinar las esfuerzos críticos en las losas del pavimento.

3.6.4. Selección de programa de elementos finitos

El rendimiento de los pavimentos rígidos depende de los esfuerzos y deformaciones impuestas por repeticiones de cargas de tráfico y ambientales. Por ejemplo, el agrietamiento transversal en los pavimentos JPCP se rige por los máximos esfuerzos de tracción (tensión) en la parte inferior de la losa de concreto. Por lo tanto, predicciones fiables de las respuestas del pavimento son esenciales para la realización de un diseño adecuado. El modelo estructural utilizado para esas predicciones se debe cumplir que el modelo debe ser capaz de analizar la carga del medio ambiente (como el alabeo debido a la temperatura y la deformación por humedad). La utilización de métodos de elementos finitos permite el desarrollo de modelos estructurales que satisfagan todos estos requisitos. En la actualidad existen una variedad de programas de elementos finitos, para la utilización en el modulado de los pavimentos. Para la realización de nuestra investigación ocuparemos el programa **EverFE 2.24**.

3.6.3 Descripción del programa EVERFE

EVERFE es una herramienta de análisis de elementos finitos 3D para pavimentos Rígidos, desarrollado en la Universidad de Washington en cooperación con el Departamento de Transporte de Washington. En la actualidad, EVERFE es el programa finito 3D más sofisticado y fácil de usar, con elementos específicamente desarrollado para el análisis de pavimento rígido. El programa cuenta con una interfaz gráfica de usuario intuitiva que simplifica en gran medida la generación de modelos, y la interpretación de los resultados que se visualizan a través de él.

CAPÍTULO IV

DETERMINACIÓN DEL ALABEO EN LOSAS DE HORMIGÓN

4.1. Ubicación del proyecto

Ubicación de los tramos de estudio

Para este proyecto se tomo como área de aplicación dos tramos de pavimento rígido ubicados en diferentes puntos de la ciudad de Tarija.

Tramo 1: Pavimento rígido de la nueva terminal de buses de la ciudad de Tarija.

Tramo 2: Pavimento rígido de la avenida Circunvalación.

4.1.1. TRAMO 1: PAVIMENTO RÍGIDO DE LA NUEVA TERMINAL DE BUSES DE LA CIUDAD DE TARIJA

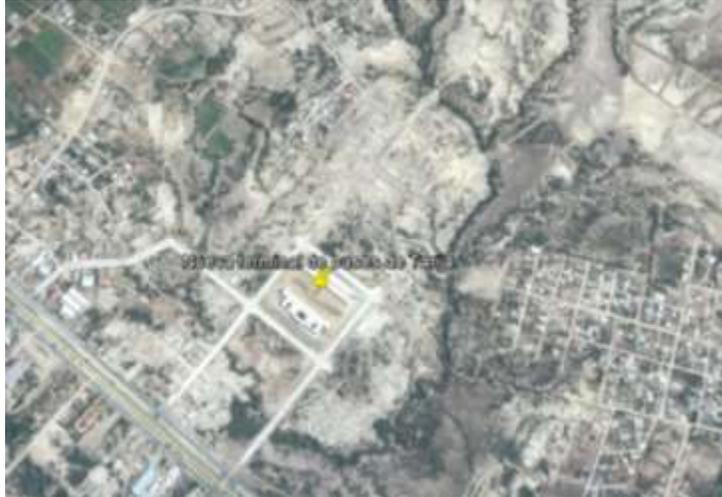
Para este proyecto se tomo como área de aplicación la nueva terminal de buses de la ciudad de Tarija ubicada en el Barrio “Torrecillas”; zona sudeste de la Ciudad de Tarija, primera sección de la provincia Cercado, del departamento de Tarija.

Fig.4.1.: Ubicación del lugar



Fuente: www.guiarte.com › América del Sur › Bolivia › Tarija › Tarija

Fig.4.2.: Ubicación satelital del tramo de estudio



Fuente: Google earth

Coordenadas de ubicación

Latitud 21°33'35.53"S

Longitud 64°40'26.48"O

Altitud 1865m

4.1.1.1. Antecedentes y descripción del tramo

Esta nueva terminal cuenta con 4.6km de pavimento rígido, mismo que fue construido en uno de los paquetes que fueron el cerramiento y las vías, para la construcción de la terminal de buses se realizó mediante un convenio del gobierno central, gobernación y municipio. En el primer paquete está referido a la construcción de vías de acceso para la nueva terminal obra que superó los 14 millones de bolivianos y que se encontró a cargo de la empresa Asociación Accidental COFAL y Asociados y que tuvo un plazo de 300 días calendario.

El segundo paquete es referido a la construcción del cierre perimetral los trabajos fueron adjudicados por la empresa MACOMET y tuvieron un plazo de 180 días calendario, el costo superó los 147 mil bolivianos.

Fig.4.3. Pavimento rígido del tramo de estudio



Fuente: Elaboración propia

Cabe destacar que sumados todos los paquetes para la construcción de la edificación de la Nueva Terminal, tendría un costo de 50 millones de bolivianos aproximadamente.

El municipio de cercado recibió muchas críticas sobre el traslado de la nueva terminal, una de las principales contemplaba la distancia, ya que se trata de una zona bastante alejada al centro de la ciudad es en este sentido que el sistema de transporte público deberá implementarse para el traslado de las personas que arriben a la capital o que quieran ser trasladados a la terminal del ciudad para tomar otros destinos, ya que la anterior terminal será utilizada para transporte interprovincial.

Actualmente el barrio torrecillas cuenta con una sola línea de micros la línea Z blanco, que tiene su parada en la zona más habitada del barrio mismo que cuenta con 350hectareaas de superficie, El barrio también cuenta con otra línea de micros que es la línea Z verde, pero ésta realiza su recorrido por la carretera principal de salida al Chaco, dejando a las personas a dos cuadras de la nueva terminal.

4.1.2. TRAMO 2: PAVIMENTO RIGIDO DE LA AVENIDA CIRCUNVALACIÓN

Fig.4.4.: Ubicación satelital del tramo de estudio



Fuente: Google earth

La avenida Circunvalación es una de las más importantes de la ciudad de Tarija, pero también una de las más descuidadas. Genera una mala presentación turística de la capital chapaca ya que los buses que llegan del norte del país ingresan por esta vía que es poco atractiva a la vista

La circunvalación es una de las avenidas más importantes de la ciudad debido a los negocios que se encuentran cerca como también a la comunicación que ofrece a las personas de los barrios aledaños. Esta avenida actualmente tiene una vida útil de 15 años mismos que durante estos rara vez fue objeto de mantenimiento por parte de las autoridades, es por esta razón se observa serios problemas en su estructura.

La avenida circunvalación fue construida con pavimento rígido, con losas de 4mts. De longitud misma que cubre los 5 km. que tiene dicha avenida, su construcción fue realizada por dos empresas distintas en dos tramos diferentes siendo la primera desde la av. Romero hasta la mejillones y la segunda fase desde la calle av. Mejillones hasta el surtidor Agrupa.

Incluso se tiene pensado construir una segunda avenida circunvalación debido a el acelerado crecimiento poblacional de la ciudad de Tarija, registrado en los últimos años, ha generado

un crecimiento vehicular (existían 43.427 vehículos según el censo del 2012), que sumado al comercio hacen a la actual Circunvalación una avenida complicada. Por la vía circula todo el tráfico pesado y el liviano (particular y público), generando un congestionamiento vehicular que se traduce en riesgos, accidentes y grandes niveles de contaminación que afectan la calidad.

La Circunvalación es una de las avenidas más largas de la ciudad de Tarija, pero también una de las más descuidadas.

La imagen que tiene actualmente deja mucho que desear a quien llega al departamento y pasa por esta zona, o para los viajeros que necesariamente deben transitar por el lugar en flota para ir hacia el norte.

Esta avenida inicia desde la rotonda del barrio Panamericano y concluye en el cruce al barrio el Aeropuerto. Se caracteriza por ser una zona comercial en donde se puede encontrar desde una pequeña tienda de barrio hasta una gran concesionaria de vehículos. Y cada año más comercios aparecen, no obstante, ello no significa la mejora de la avenida sino, muchos de estos negocios, aportan a empeorar la mala imagen que ya tiene.

4.1.2. Recorrido e inspección visual de los tramos

Previamente al inicio de los trabajos de campo, se efectuó un recorrido de inspección, a lo largo de las vías, a fin de verificar las características generales que presentaban y las condiciones en que se encontraba la estructura del pavimento.

TRAMO 1: NUEVA TERMINAL DE BUSES DE LA CIUDAD DE TARIJA

En este tramo de estudio al ser un pavimento nuevo no se puede evidenciar a simple vista si existe alabeo en las losas de concreto además se pudo observar que en la nueva terminal existe un tráfico de maquinaria pesada por los trabajos que se continúan realizando dentro de la edificación además que se debe considerar dentro del estudio que tiene alrededor de 8 meses de servicio no continuo.

TRAMO 2: AVENIDA CIRCUNVALACIÓN

En este segundo tramo de estudio se pudo observar a simple vista la manifestación del fenómeno del alabeo de losas de hormigón, ya que se evidencio el levantamiento de las

esquinas de las losas de forma considerable lo cual se encuentra dentro del nivel aceptable considerando que este pavimento tiene más de 15 años de vida útil.

4.2. Análisis y determinación del alabeo

4.2.1. Demarcación de tramos de evaluación

De acuerdo a la información presentada en el capítulo anterior; con respecto a la metodología de ejecución del alabeo, que nos describe con claridad la incidencia en la aplicación de un tramo de estudio. Tomando en cuenta que el alabeo de losas se produce en el levantamiento de las esquinas de las losas se hace necesario realizar las mediciones en el total de la longitud de los tramos en estudio para ambos carriles de la superficie de rodadura.

4.2.2. Medición del alabeo

Tomando en cuenta que el alabeo de las losas de concreto se manifiesta mediante el levantamiento de las esquinas de la losa debido a diferentes razones explicadas en capítulos anteriores, el alabeo fue determinado realizando la perfilometría del lugar que consistió en el levantamiento topográfico utilizando nivel de ingeniero para poder determinar las cotas terreno en cada punto del eje de la vía.

El alabeo resulta de la resta del Δ que se produce entre las cotas terreno que las obtuvimos mediante levantamiento topográfico y las cotas rasante que nos fueron proporcionadas del diseño original de ambos tramos de estudio.

4.2.2.1. Identificación de los segmentos de estudio

❖ TRAMO 1: NUEVA TERMINAL DE BUSES DE LA CIUDAD DE TARIJA

Para el estudio de este tramo se tomaron las vías principales que rodean la edificación de la terminal, son vías conformadas por ocho losas en todo lo ancho y tienen un pavimento total de de 4,3km. Se realizo el estudio de todo el pavimento rígido de la terminal tomando una muestra de 200m por cada km, de los carriles de subida y bajada de cada tramo.

Se comenzó con la numeración de cada segmento asignando letras y números para su identificación, se realizo el levantamiento topográfico losa por losa para poder determinar de esta manera las cotas terreno actuales buscando encontrar la diferencia de las mismas con las cotas rasantes del diseño original.

En total se realizó la medición de 4km de pavimento, tomando una muestra de 200m de cada 1km teniendo en total la medición de 800m de pavimento del carril derecho y 800m del carril izquierdo haciendo un total de 1600m de muestra estudiados para la determinación del alabeo de losas teniendo aproximadamente 536 losas y un total de 1080 puntos para realizar la perfilometría del pavimento y poder determinar el labeo presente en las losas.

❖ **TRAMO 2: AVENIDA CIRCUNVALACIÓN**

Para la medición de este tramo se procedió de igual manera que el primer tramo, se tomaron los ejes de las vías de ambos carriles, de subida y bajada, desde donde empieza la avenida circunvalación en la rotonda del AGRUPA hasta la rotonda de la avenida Romero, tomando una longitud aproximada de 5km.

Se tomaron 4km para realizar el estudio tomando una muestra de 200m cada 1km, teniendo un total de 800 m de muestra estudiada en el carril de subida y 800m en el carril de bajada haciendo un total de 1600m en los que se realizaron las mediciones correspondientes para el estudio del alabeo en las losas de hormigón.

En total se realizó la medición de 400 losas, tomando lecturaciones con el equipo cada 2m ya que está conformado por losas de 4m de longitud, se tomaron los puntos de las esquinas y centro de cada losa teniendo una lecturación total de 808 puntos con los cuales se procedió a realizar los perfiles para determinar la existencia del alabeo en las losas de hormigón.

Obtención de las cotas terreno de la vía mediante nivelación

Paso 1. Corresponde a un conocimiento correcto del equipo de medición ya sea inicialmente en la calibración y en la manipulación al realizar los ensayos de medición correctamente.

Paso 2. El material y equipo de trabajo. Para la ejecución de las mediciones se requiere de tres personas que trabajan conjuntamente, un operador que conduce el equipo, en este caso el nivel de ingeniero, y realiza las lecturas, un auxiliar que las anota y una tercera persona que debe trasladarse con la mira para poder lecturar en el punto exacto donde se precise conocer la cota terreno. Estas lecturas son registradas en planillas que constan de una cuadrícula compuesta por filas y columnas; empezando por el casillero (1,1), los datos se llenan de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha (ver en Anexos II, formato de tablero y hoja de registro).

Paso 3. Las mediciones se realizaron en forma continua a lo largo de los dos tramos, se tomo una muestra de 200m cada 1km y se tomaron lecturaciones de cada esquina de la losa, se tomo como punto de referencia la cota rasante del centro de cada losa para tener un punto de apoyo, en el caso del tramo de la avenida Circunvalación las losas tenían una longitud de dos metros por lo que las mediciones fueron efectuadas cada metro, tomando ambos puntos de las esquinas y un punto central de la losa, se continuo con esta lecturación hasta concluirlos 200m de cada segmento compuesto por aproximadamente 50 losas de concreto.

Para el tramo de la nueva terminal de buses de la ciudad de Tarija está construido por losas cortas de 3m de longitud, por lo que se tomo lecturaciones con el equipo cada 1,50m siguiendo el mismo procedimiento explicado para el tramo anterior, teniendo una lecturación de cada segmento de 200m compuesto por alrededor de 67 losas.

Tabla 3.2

Resumen de obtención de cotas terreno para el perfil de alabeo

Tabla Modelo

Nivelacion Avenida Circunvalacion A1-B1							
ESTACA	DIST. PARC.	DIST. ACUM.	LECT. AT.(m)	LECT. INT.(m)	LECT. ADEL.(m)	ALT. DEL INSTR.	COTA TERRENO(m)
0	2	0	1,461			1874,4610	1873,0000
1	2	2		1,515		1874,4610	1872,9460
2	2	4		1,598		1874,4610	1872,8630
3	2	6		1,649		1874,4610	1872,8120
4	2	8		1,732		1874,4610	1872,7290
5	2	10		1,792		1874,4610	1872,6690
6	2	12		1,862		1874,4610	1872,5990
7	2	14		1,929		1874,4610	1872,5320
8	2	16		1,976		1874,4610	1872,4850
9	2	18		2,039		1874,4610	1872,4220
10	2	20		2,100		1874,4610	1872,3610
11	2	22		2,191		1874,4610	1872,2700
12	2	24		2,248		1874,4610	1872,2130
13	2	26		2,298		1874,4610	1872,1630
14	2	28		2.340		1874.4610	1872.1210

Fuente: Elaboración propia

Paso 4. Con los datos obtenidos por medio del levantamiento topográfico, se somete al cálculo de las cotas terreno, procediendo a expresar los valores resultantes en planillas de presentación.

Los valores son registrados en las planillas de campo, se traslada los datos de campo a gabinete para el desarrollo de cálculo. Se obtuvieron valores en el tramo de la avenida circunvalación de hasta 30mm como máximo y en el tramo de la terminal el alabeo máximo fue de 9mm.

4.2.3. RESULTADOS DEL CALCULO DEL ALABEO

4.2.3.3. TRAMO 1: TERMINAL DE BUSES DE LA CIUDAD DE TARIJA

DOCUMENTO EXCEL

4.3. Alternativa para disminuir la presencia del alabeo en losas de concreto

4.3.1. Dimensionamiento de losas

❖ Datos utilizados para la propuesta para los tres casos

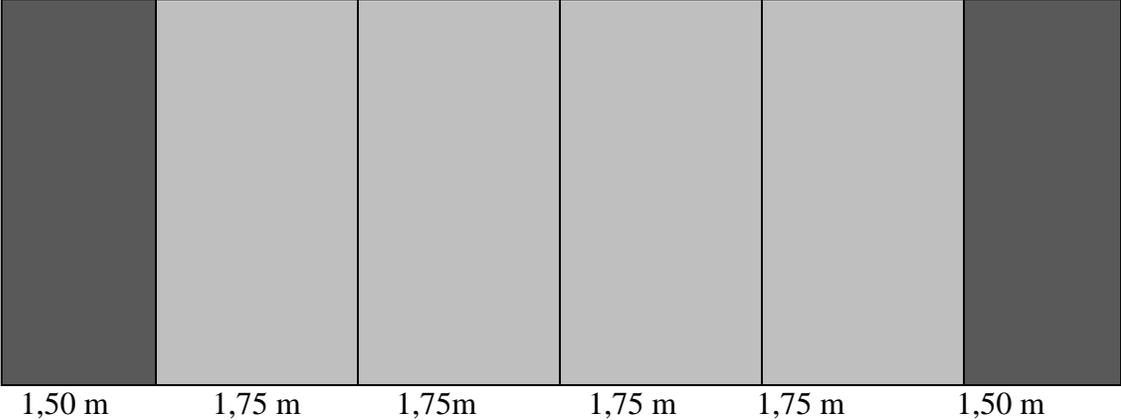
El análisis se realizó a los dos tramos en los cuales se estudio el alabeo de losas y en la nueva alternativa de losas propuesta para poder comprobar la diferencia que existe en cada uno de ellos. Para el cálculo según Westergaard se utilizaron datos generales en los tres diseños, se tomo una resistencia característica del hormigón de 250 Kg/cm^2 , ya que 210 Kg/cm^2 es la mínima resistencia utilizada en el diseño de pavimentos y la máxima 280 Kg/cm^2 por lo que se adopto un valor medio y más usado en el diseño, el modulo de elasticidad está en función a la resistencia por lo que se uso $E = 238752 \text{ Kg/cm}^2$, no usamos el menor 210 para no correr el riesgo de no cumplir con la resistencia a flexión. Se tomo como peso específico del hormigón 2300 Kg/m^3 (0.0023 Kg/cm^3) y como esfuerzo de tensión del acero 400 MPa (4080 Kg/cm^2), ya que actualmente la resistencia de los aceros llegan entre 4000 y 4200 Kg/cm^2 . lo referente al diámetro de las barras los más utilizado son de 16 mm y 12 mm , en el presente proyecto se tomara de 159 mm (1.59 cm), referente al coeficiente de fricción se tomara 2 que es el mas usual. Con estos valores se tiene los siguientes resultados que se detallan. Por otra parte es recomendable un espaciamiento máximo de 1.20 m establecido por la teoría de Westergaard.

❖ Dimensionamiento de losas cortas(Alternativa propuesta)

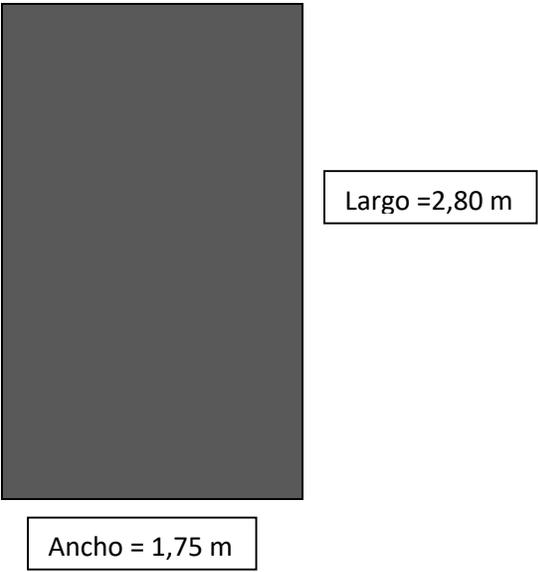
El dimensionamiento concretamente del ancho, largo y espesor de las losas cortas en el proyecto se basa en la teoría establecida oportunamente por Westergaard que mostraba las

bondades de las losas cortas en cuestión de absorción de esfuerzos y mejores condiciones de comportamiento ante el alabeo y esfuerzos a flexión de la misma.

Sabiendo que los carriles serán de 3,5 m, las bermas de hormigón de 1,50 m se establece la siguiente relación de anchos de losa en la calzada de pavimento rígido del proyecto.



Respecto al largo de las losas cortas del análisis de esfuerzos realizados por la supervisión se determina que el largo deseable para las losas cortas es de 2,80 m lo que permite una relación de lados $a/L = 0.625 > 0,6$ como recomiendan las normas.



En lo que se refiere al espesor luego del análisis realizado en base a las condiciones de tráfico futuro se concluye que el **ESPESOR DE LOSA ADECUADA ES DE 21 cm**



- **Dimensionamiento según la teoría de Westergaard**
- ✓ **Esfuerzos de combado o alabeo**

$$S_c = \frac{E \cdot e \cdot t}{2(1-u)}$$

Donde:

S_c = Esfuerzo debido al gradiente de temperatura, en Kg/cm²

E = Modulo de elasticidad del concreto, en Kg/cm²

e = Coeficiente de dilatación térmica lineal del concreto (cm/cm/°C), tomado usualmente como 1×10^{-5}

t = Diferencia de temperatura entre la parte superior y la inferior de la losa (°C)

u = Coeficiente de Poisson, usualmente 0,15.

Datos utilizados:

Para encontrar el esfuerzo debido al gradiente de temperatura utilizamos los siguientes valores que son los más usuales: En nuestro caso se tomara una resistencia característica del hormigón de 250 Kg/cm², por lo tanto el modulo de elasticidad para dicha resistencia será $E = 238752 \text{ Kg/cm}^2$. Realizando un análisis según los datos obtenidos en campos podemos determinar la diferencia de temperatura de 12°C, ya que la parte superior de la losa se encontraba a una temperatura aproximada de 32°C, y la subbase a diferente temperatura cuya media es 20°C.

Por lo tanto es esfuerzo de combado o alabeo será igual a:

$$S_c = 16,85 \text{ Kg/cm}^2.$$

- **Juntas transversales**
- ✓ **Máximo esfuerzo de tensión producido en la sección media de la losa**

$$S_2 = \frac{a \cdot h \cdot (L/2) \cdot f \cdot \gamma}{a \cdot h} = \underline{L \cdot \gamma \cdot f}$$

Donde:

A= ancho de la losa en metros.

H= espesor de la losa en metros.

L= longitud de la losa en metros.

F= coeficiente de fricción entre el suelo y el concreto, varía entre 0,5 a 2,5. Usualmente se usa 2.

Y= Peso volumétrico del concreto en Tm/m³.

Para determinar el máximo esfuerzo de tensión producido en la sección media de la losa utilizamos el ancho propuesto para la losa corta de 1.75m, el espesor de 20cm y la longitud de la losa de 2,80m. se tomo como peso volumétrico del concreto de 2,3Tm/m³.

Por lo tanto el máximo esfuerzo de tensión es de : $S_2 = 6,44 \text{Tm/m}^2$.

➤ **Dispositivos especiales en juntas**

✓ **Dimensionamiento de pasadores y pasajuntas:**

El dimensionamiento de los pasadores en juntas longitudinales y transversales ha sido realizado siguiendo la misma metodología propuesta por el Dr. Westergaard, la cual está sustentada por relaciones utilizadas en normas de diferentes países.

Westergaard analizo el problema del combado y alabeo producidos por los diferentes gradientes de temperatura a través de las losas.

✓ **Diseño de de barras de amarre en las juntas longitudinal y transversal**

Las barras de acero que en este proyecto se considerara corrugado en las longitudinales y liso en las transversales, las longitudinales se colocan de manera perpendicular a la junta longitudinal para que la misma no se separe con el tiempo, en las juntas transversales las barras se colocan paralelas al eje. El diseño consiste en determinar la separación entre barras y la longitud de las mismas.

✓ **Separación entre barras**

La separación de las barras tanto en juntas longitudinales como en transversales se calculan con las siguientes expresiones.

$$e_L = \frac{\pi d^2 f_s}{4 a h \gamma F}$$

$$e_T = \frac{\pi d^2 f_s}{4 L h \gamma F}$$

Donde:

eL : Separación entre barras o pasa juntas en juntas Longitudinales (cm).

eT : Separación entre barras o pasa juntas en juntas transversales (cm).

d : Diámetro de la barra (cm).

fs : Esfuerzo de tensión del acero (Barra) (Kg/cm²).

a : Ancho de la losa (cm).

h : Espesor de losa (cm).

γ : Peso específico del hormigón (Kg/cm³).

L : Longitud de losa (cm).

F : Factor de fricción.(usualmente 2)

En el presente proyecto se tomara como peso específico del hormigón 2300 Kg/m³ (0.0023 Kg/cm³) y como esfuerzo de tensión del acero 400MPa (4080 Kg/cm²), en lo referente al diámetro de las barras los más utilizado son de 16mm y 12mm, en el presente proyecto se tomara de 159mm (1.59 cm), referente al coeficiente de fricción se tomara 2 .Con estos valores se tiene los siguientes resultados que se detallan. Por otra parte es recomendable un espaciamiento máximo de 1.20m.

Teniendo como resultado la separación de las barras en juntas longitudinales de 479,21cm y juntas transversales de 299,5cm. Valores que no se encuentran dentro de los parámetros por lo que se adopta un espaciamiento máximo de 1.20m.

✓ Longitud de barras

La longitud de las barras en las juntas se determina con la siguiente expresión.

$$b = \frac{3,14 * d^2 * f_s}{4 * p * u}$$

Donde:

d : Diámetro de la barra (cm).

fs : Esfuerzo de tensión del acero (Barra) (Kg/cm²).

μ : esfuerzo de adherencia entre el concreto y el acero (Kg/cm^2).

$$\mu = 0.69 \sqrt[3]{f_{ck}^2}$$

Donde: f_{ck} : resistencia del hormigón (Kg/cm^2),

En nuestro caso se tomara $250 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ tal como se menciona anteriormente, por lo tanto el esfuerzo de adherencia será:

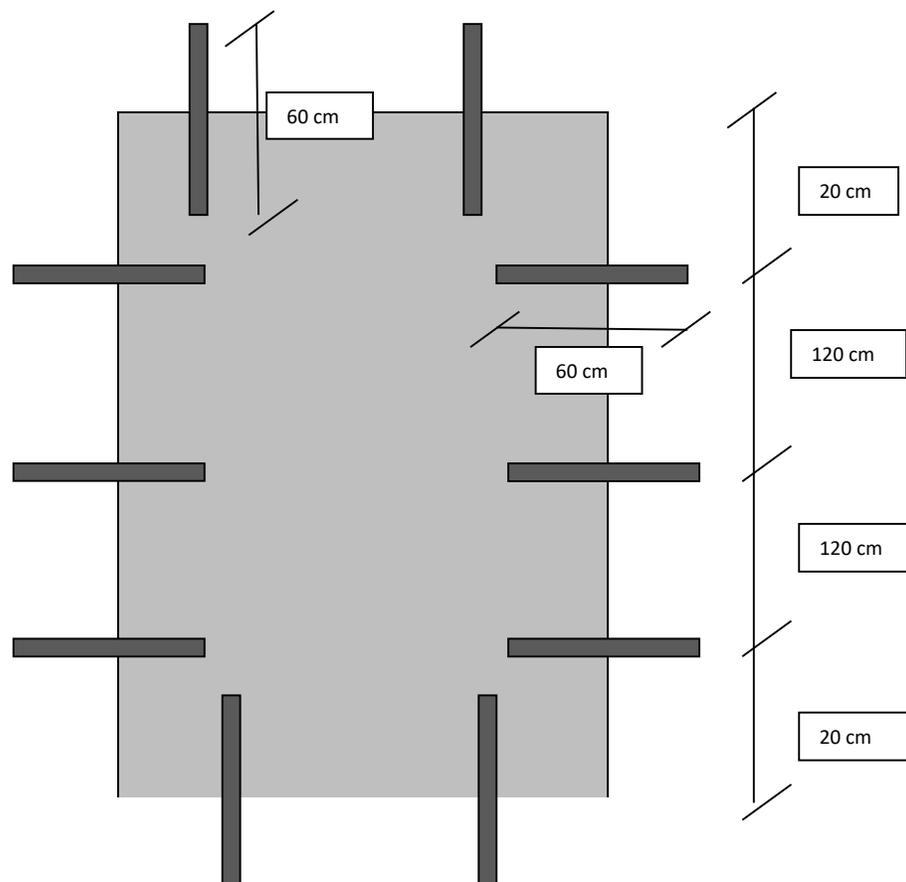
$$\mu = 27.38 \text{ Kg}/\text{cm}^2$$

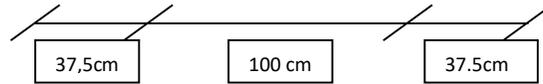
Luego aplicando la formula (6) reemplazando sus valores respectivos, se tiene la longitud de las barras.

$$l = 59,14 \text{ cm.}$$

Se adopta un valor de: **$l = 60 \text{ cm}$**

SE UTILIZARAN DOS BARRAS TRANSVERSALES Y TRES BARRAS LONGITUDINALES



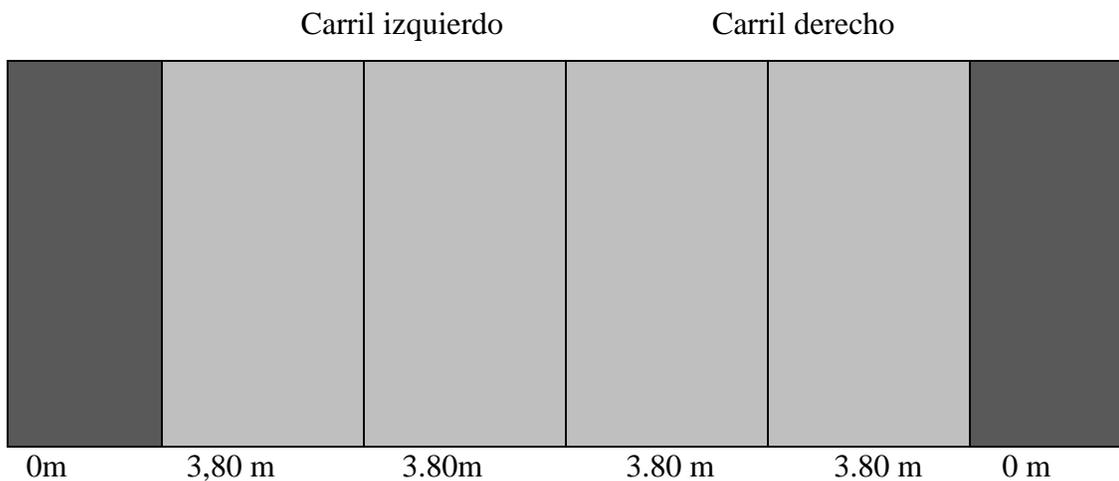


Para realizar la comparación de las losas antiguamente usadas en los diseños del pavimento rígido de la avenida Circunvalación y de la Nueva terminal de buses de la ciudad de Tarija, se procedió a realizar el mismo dimensionamiento realizado para la nueva propuesta de losa corta.

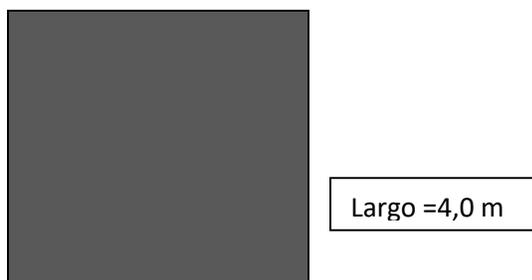
❖ **Dimensionamiento de losas avenida Circunvalación:**

El dimensionamiento concretamente del ancho, largo y espesor de las losas cortas en el proyecto se basa en la teoría establecida oportunamente por Westergaard que mostraba las bondades de las losas cortas en cuestión de absorción de esfuerzos y mejores condiciones de comportamiento ante el alabeo y esfuerzos a flexión de la misma.

Sabiendo que los carriles serán de 3,8 m, sin bermas, se establece la siguiente relación de anchos de losa en la calzada de pavimento rígido del proyecto.



Respecto al largo de las losas se tiene una longitud de 4m, siendo losas de dimensiones mucho mayores a la losa corta propuesta mediante este estudio.





Ancho = 3,80 m

En lo que se refiere al espesor el dato proporcionado por el fiscal de esta obra es de ESPESOR DE LOSA DE 20 cm.



Espesor=0.20m

- **Dimensionamiento según la teoría de Westergaard**
- ✓ **Esfuerzos de combado o alabeo**

$$S_c = \frac{E \cdot e \cdot t}{2(1-\nu)}$$

Donde:

S_c = Esfuerzo debido al gradiente de temperatura, en Kg/cm²

E = Modulo de elasticidad del concreto, en Kg/cm²

e = Coeficiente de dilatación térmica lineal del concreto (cm/cm/°C), tomado usualmente como 1×10^{-5}

t = Diferencia de temperatura entre la parte superior y la inferior de la losa (°C)

ν = Coeficiente de Poisson, usualmente 0.15.

Para encontrar el esfuerzo debido al gradiente de temperatura utilizamos los siguientes valores que son los más usuales: En nuestro caso se tomara una resistencia característica del hormigón de 250 Kg/cm², por lo tanto $E = 238752$ Kg/cm². Realizando un análisis según los datos obtenidos en campos podemos determinar la diferencia de temperatura de 12°C, ya que la parte superior de la losa se encontraba a una temperatura aproximada de 32°C, y la subbase a diferente temperatura cuya media es 20°C.

Por lo tanto es esfuerzo de combado o alabeo será igual a:

$$S_c = 16,85 \text{Kg/cm}^2.$$

➤ **Juntas transversales**

✓ **Máximo esfuerzo de tensión producido en la sección media de la losa:**

$$S_2 = \frac{a \cdot h \cdot (L/2) \cdot f \cdot \gamma}{a \cdot h}$$
$$= \frac{L \cdot \gamma \cdot f}{2}$$

Donde:

A= ancho de la losa en metros.

H= espesor de la losa en metros.

L= longitud de la losa en metros.

F= coeficiente de fricción entre el suelo y el concreto, varía entre 0,5 a 2,5. Usualmente se usa 2.

γ= Peso volumétrico del concreto en Tm/m³.

Para determinar el máximo esfuerzo de tensión producido en la sección media de la losa utilizamos el ancho de la losa del pavimento de 3.80m, el espesor de 20cm y la longitud de la losa de 4m. Se tomo como peso volumétrico del concreto de 2,3Tm/m³.

Por lo tanto el máximo esfuerzo de tensión es de :

$$S_2 = 9,2 \text{Tm/m}^2.$$

➤ **Dispositivos especiales en juntas**

✓ **Dimensionamiento de pasadores.-**

El dimensionamiento de los pasadores en juntas longitudinales y transversales ha sido realizado siguiendo la misma metodología propuesta por el Dr. Westergaard, la cual está sustentada por relaciones utilizadas en normas de diferentes países.

Westergaard analizo el problema del combado y alabeo producidos por los diferentes gradientes de temperatura a través de las losas.

✓ **Diseño de de barras de amarre en las juntas longitudinal y transversal**

Las barras de acero que en este proyecto se considerara corrugado en las longitudinales y liso en las transversales, las longitudinales se colocan de manera perpendicular a la junta longitudinal para que la misma no se separe con el tiempo, en las juntas transversales las barras se colocan paralelas al eje. El diseño consiste en determinar la separación entre barras y la longitud de las mismas.

Separación entre barras:

La separación de las barras tanto en juntas longitudinales como en transversales se calculan con las siguientes expresiones.

$$e_L = \frac{\pi d^2 f_s}{4 a h \gamma F}$$

$$e_T = \frac{\pi d^2 f_s}{4 L h \gamma F}$$

Donde:

eL : Separación entre barras o pasa juntas en juntas longitudinales (cm).

eT : Separación entre barras o pasa juntas en juntas transversales (cm).

d : Diámetro de la barra (cm).

fs : Esfuerzo de tensión del acero (Barra) (Kg/cm²).

a : Ancho de la losa (cm).

h : Espesor de losa (cm).

γ : Peso específico del hormigón (Kg/cm³).

L : Longitud de losa (cm).

F : Factor de fricción. Usualmente se usa 2.

En el presente proyecto se tomara como peso específico del hormigón 2300 Kg/m³ (0.0023 Kg/cm³) y como esfuerzo de tensión del acero 400MPa (4080 Kg/cm²), como porcentaje de resistencia a la tracción un valor de 0.75%, es decir 300MPa (3060 Kg/cm²), en lo referente al diámetro de las barras los más utilizado son de 16mm y 12mm, en el presente proyecto se tomara de 16mm (1.59 cm), referente al coeficiente de fricción se tomara 2 (ver tabla No.13).

Con estos valores y los de la tabla No.12 se tiene los siguientes resultados que se detallan en las tablas No.13 y No.14. Por otra parte es recomendable un espaciamiento máximo de 1.20m.

Teniendo como resultado la separación de las barras en juntas longitudinales de 221,72cm y juntas transversales de 220,14cm. Valores que no se encuentran dentro de los parámetros por lo que se adopta un espaciamiento máximo de 1.20m.

Longitud de barras:

La longitud de las barras en las juntas se determina con la siguiente expresión.

$$l = \frac{3,14 * d^2 * f_s}{4 * p * u}$$

Donde:

d : Diámetro de la barra (cm).

f_s : Esfuerzo de tensión del acero (Barra) (Kg/cm²).

μ : esfuerzo de adherencia entre el concreto y el acero (Kg/cm²).

$$\mu = 0.69 \sqrt[3]{f_{ck}^2}$$

Donde: f_{ck} : resistencia del hormigón (Kg/cm²),

En nuestro caso se tomara 250 Kg/cm² tal como se menciona anteriormente, por lo tanto el esfuerzo de adherencia será:

$$\mu = 27.38 \text{ Kg/cm}^2$$

Luego aplicando la formula (6) reemplazando sus valores respectivos, se tiene la longitud de las barras.

$$l = 59,14 \text{ cm.}$$

Se adopta un valor de:

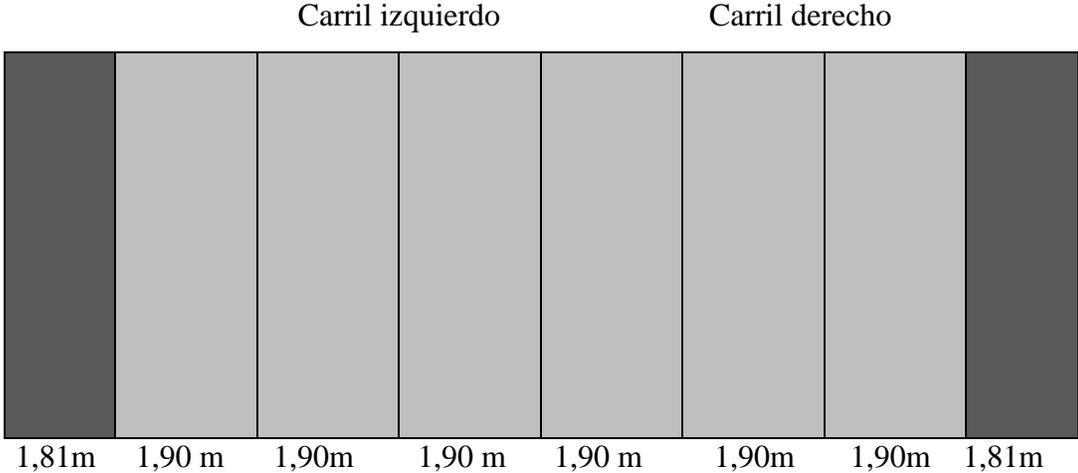
$$l = 60 \text{ cm.}$$

❖ Dimensionamiento de losas nueva terminal de buses de la ciudad de Tarija

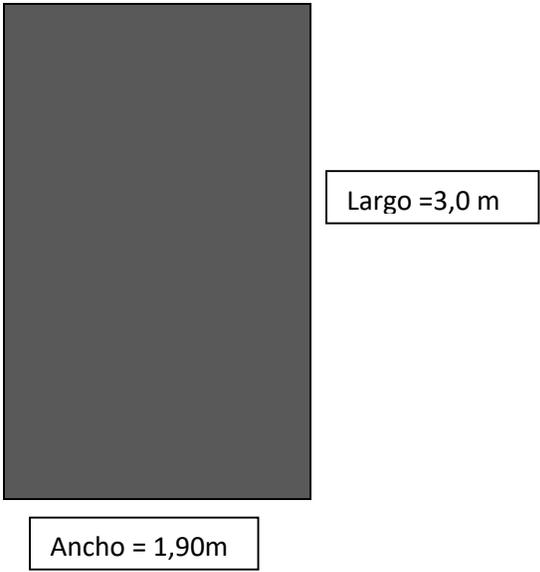
El dimensionamiento concretamente del ancho, largo y espesor de las losas cortas en el proyecto se basa en la teoría establecida oportunamente por Westergaard que mostraba las

bondades de las losas cortas en cuestión de absorción de esfuerzos y mejores condiciones de comportamiento ante el alabeo y esfuerzos a flexión de la misma.

Sabiendo que los carriles serán de 3,8 m, sin bermas, se establece la siguiente relación de anchos de losa en la calzada de pavimento rígido del proyecto



Respecto al largo de las losas se tiene una longitud de 3m, siendo losas de dimensiones mucho mayores a la losa corta propuesta mediante este estudio.



En lo que se refiere al espesor el dato proporcionado por el fiscal de esta obra es de ESPESOR DE LOSA DE 21 cm.





- **Dimensionamiento según la teoría de Westergaard**
- ✓ **Esfuerzos de combado o alabeo**

$$S_c = \frac{E \cdot e \cdot t}{2(1-u)}$$

Donde:

S_c = Esfuerzo debido al gradiente de temperatura, en Kg/cm²

E = Modulo de elasticidad del concreto, en Kg/cm²

e = Coeficiente de dilatación térmica lineal del concreto (cm/cm/°C), tomado usualmente como 1×10^{-5}

t = Diferencia de temperatura entre la parte superior y la inferior de la losa (°C)

u = Coeficiente de Poisson, usualmente 0,15.

Para encontrar el esfuerzo debido al gradiente de temperatura utilizamos los siguientes valores que son los más usuales: En nuestro caso se tomara una resistencia característica del hormigón de 250 Kg/cm², por lo tanto $E = 238752 \text{ Kg/cm}^2$. Realizando un análisis según los datos obtenidos en campos podemos determinar la diferencia de temperatura de 12°C, ya que la parte superior de la losa se encontraba a una temperatura aproximada de 32°C, y la subbase a diferente temperatura cuya media es 20°C.

Por lo tanto el esfuerzo de combado o alabeo será igual a:

$$S_c = 16,85 \text{ Kg/cm}^2.$$

- **Juntas transversales**
- ✓ **Máximo esfuerzo de tensión producido en la sección media de la losa**

$$S_2 = \frac{a \cdot h \cdot (L/2) \cdot f \cdot \gamma}{a \cdot h} \\ = \frac{L \cdot \gamma \cdot f}{2}$$

Donde:

A = ancho de la losa en metros.

H= espesor de la losa en metros.

L= longitud de la losa en metros.

F= coeficiente de fricción entre el suelo y el concreto, varía entre 0,5 a 2,5. Usualmente se usa 2.

Y= Peso volumétrico del concreto en Tm/m³.

Para determinar el máximo esfuerzo de tensión producido en la sección media de la losa utilizamos el ancho de la losa del pavimento de 1,90m, el espesor de 21cm y la longitud de la losa de 3m. Se tomo como peso volumétrico del concreto de 2,3Tm/m³.

Por lo tanto el máximo esfuerzo de tensión es de :

$$S_2= 6,9Tm/m^2.$$

➤ **Dispositivos especiales en juntas**

✓ **Dimensionamiento de pasadores.-**

El dimensionamiento de los pasadores en juntas longitudinales y transversales ha sido realizado siguiendo la misma metodología propuesta por el Dr.Westergaard, la cual está sustentada por relaciones utilizadas en normas de diferentes países.

Westergaard analizo el problema del combado y alabeo producidos por los diferentes gradientes de temperatura a través de las losas.

✓ **Diseño de de barras de amarre en las juntas longitudinal y transversal:**

Las barras de acero que en este proyecto se considerara corrugado en las longitudinales y liso en las transversales, las longitudinales se colocan de manera perpendicular a la junta longitudinal para que la misma no se separe con el tiempo, en las juntas transversales las barras se colocan paralelas al eje. El diseño consiste en determinar la separación entre barras y la longitud de las mismas.

✓ **Separación entre barras:**

La separación de las barras tanto en juntas longitudinales como en transversales se calculan con las siguientes expresiones.

$$e_L = \frac{\pi d^2 f_s}{4 a h \gamma F}$$

$$e_T = \frac{\pi d^2 f_s}{4 L h \gamma F}$$

Donde:

eL : Separación entre barras o pasa juntas en juntas longitudinales (cm).

eT : Separación entre barras o pasa juntas en juntas transversales (cm).

d : Diámetro de la barra (cm).

f_s : Esfuerzo de tensión del acero (Barra) (Kg/cm²).

a : Ancho de la losa (cm).

h : Espesor de losa (cm).

γ : Peso específico del hormigón (Kg/cm³).

L : Longitud de losa (cm).

F : Factor de fricción. Usualmente se usa 2.

En el presente proyecto se tomara como peso específico del hormigón 2300 Kg/m³ (0.0023 Kg/cm³) y como esfuerzo de tensión del acero 400MPa (4080 Kg/cm²), como porcentaje de resistencia a la tracción un valor de 0.75%, es decir 300MPa (3060 Kg/cm²), en lo referente al diámetro de las barras los más utilizado son de 16mm y 12mm, en el presente proyecto se tomara de 159mm (1.59 cm), referente al coeficiente de fricción se tomara 2 .Con estos valores se tiene los siguientes resultados que se detallan. Por otra parte es recomendable un espaciamiento máximo de 1.20m.

Teniendo como resultado la separación de las barras en juntas longitudinales de 441,72cm y juntas transversales de 279,54cm. Valores que no se encuentran dentro de los parámetros por lo que se adopta un espaciamiento máximo de 1.20m.

✓ **Longitud de barras:**

La longitud de las barras en las juntas se determina con la siguiente expresión.

$$b = \frac{3,14 * d^2 * f_s}{4 * p * u}$$

Donde:

d : Diámetro de la barra (cm).

f_s : Esfuerzo de tensión del acero (Barra) (Kg/cm²).

μ : esfuerzo de adherencia entre el concreto y el acero (Kg/cm²).

$$\mu = 0.69 \sqrt[3]{f_{ck}^2}$$

Donde:

f_{ck} : resistencia del hormigón (Kg/cm²),

En nuestro caso se tomara 250 Kg/cm² tal como se menciona anteriormente, por lo tanto el esfuerzo de adherencia será:

$$\mu = 27.38 \text{ Kg/cm}^2$$

Luego aplicando la formula (6) reemplazando sus valores respectivos, se tiene la longitud de las barras.

$$l = 59,14 \text{ cm.}$$

Se adopta un valor de

$$l = 60 \text{ cm.}$$

➤ **Verificación de la carga de los ejes equivalentes para el diseño propuesto**

Se la realizo mediante el metodo AASHTO utilizando parametros ya calculados anteriormente,obteniendo los siguientes resultados.

The screenshot shows the 'Ecuación AASHTO 93' software interface with the following data:

- Tipo de Pavimento:** Pavimento flexible, Pavimento rígido
- Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So):** 80 % Zr=-0.841, So = 0.45
- Serviciabilidad inicial y final:** PSI inicial = 4.5, PSI final = 2
- Módulo de reacción de la subrasante:** k = 44 pci
- Información adicional para pavimentos rígidos:**
 - Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi) = 3388731
 - Módulo de rotura del concreto - Sc (psi) = 240
 - Coefficiente de transmisión de carga - (J) = 1.2
 - Coefficiente de drenaje - (Cd) = 1.1
- Tipo de Análisis:** Calcular D, Calcular W18
- Ejes de 18 kips:** W18 = 7207111
- Buttons:** Calcular, Salir

Obteniendo el valor de 7207111 Kips resultado que es favorable ya que comprueba que el diseño propuesto podrá resistir las cargas por eje en las losas.

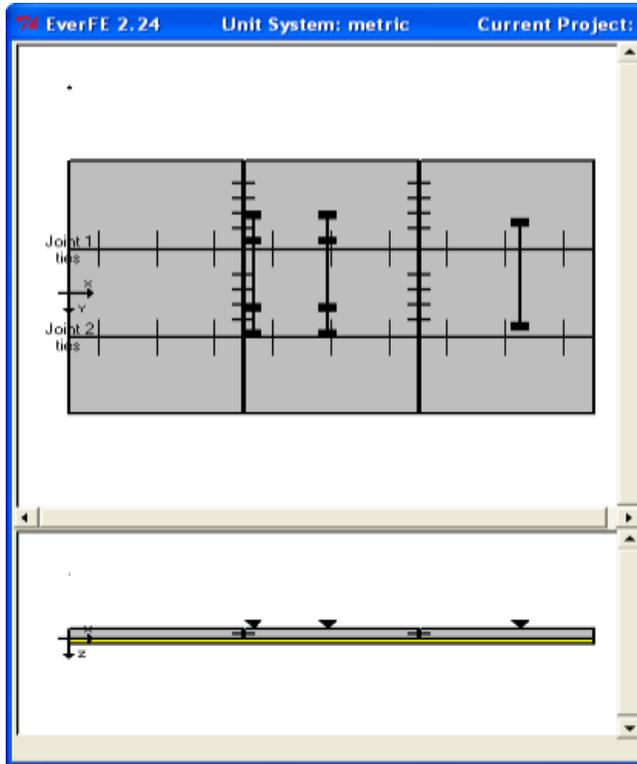
RESULTADOS DEL PROGRAMA UTILIZADO: EVERFE
ESFUERZOS Y DESPLAZAMIENTOS CRITICOS BARRAS
DISEÑO PROPUESTO DE LOSA

losas cortas 1.75x2.80m + Berma de 1.50m
 Espesor 21cm Gradiente térmico: 12 °C

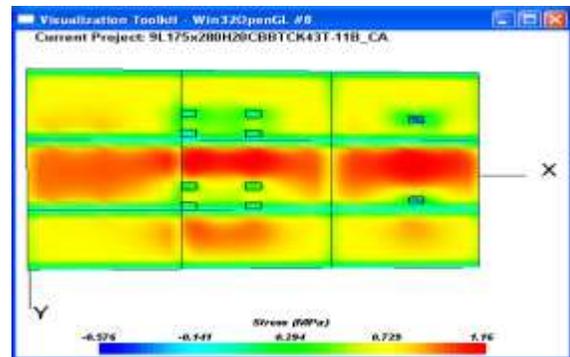
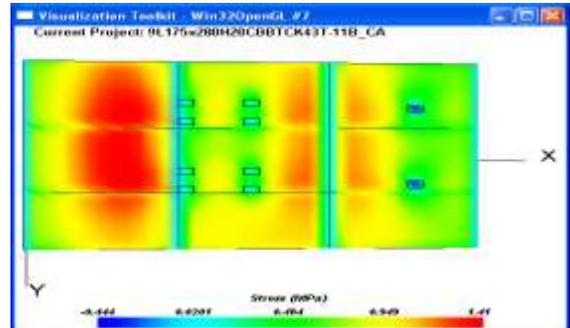
AUTOBUS

Posición carga: **ESQUINA**

Esquema del modelo



Tensión máxima de tracción en dirección del eje X en la parte superior de la losa 1.41 MPa y 1.16 en la dirección Y.



Desplazamiento:



$$1.41 < 2.025 \text{ MPa}$$

Tensión menor a la admisible

(45% de 4.5 MPa)

La losa corta es efectiva

ESFUERZOS Y DESPLAZAMIENTOS CRITICOS BARRAS

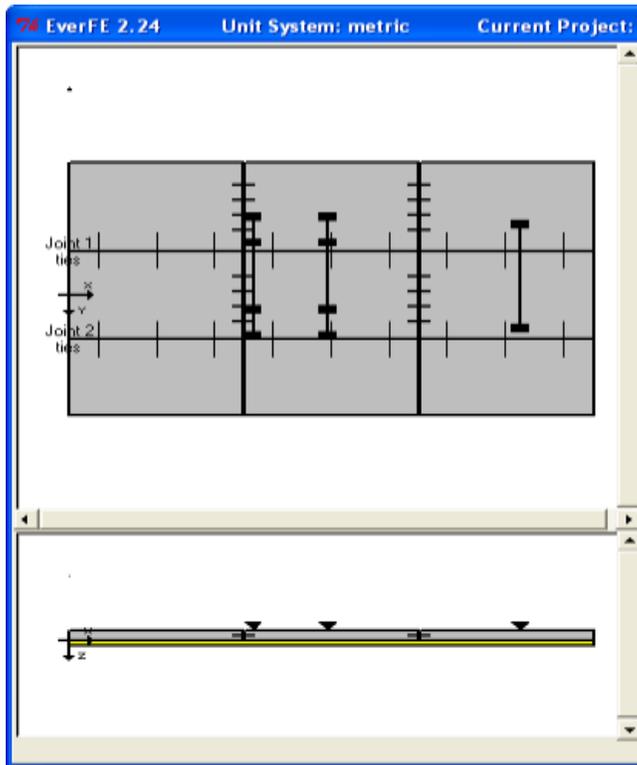
TRAMO: Avenida Circunvalación

losas de 4mx3,80m Espesor 20cm Gradiente térmico: 12 °C

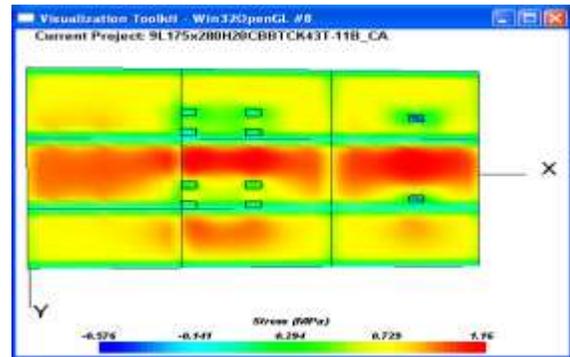
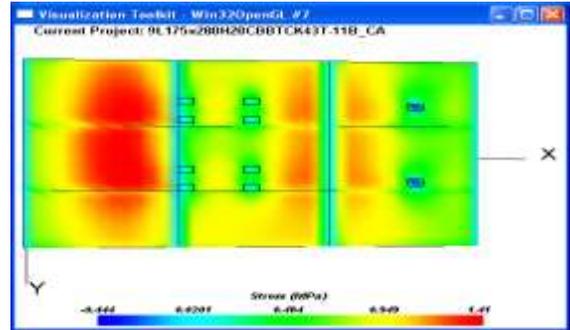
Tractocamión c/sobrecarga

Posición carga: **ESQUINA**

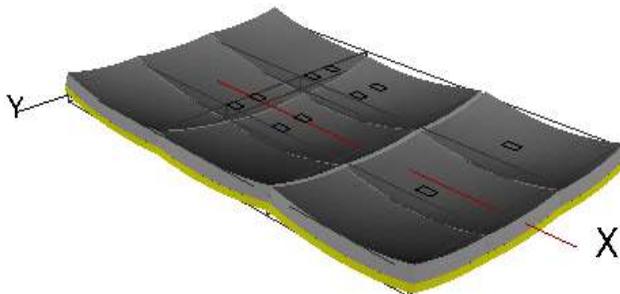
Esquema del modelo



Tensión máxima de tracción en dirección del eje X en la parte superior de la losa 1.68 MPa y 1.36 en la dirección Y.



Desplazamiento:



$$1.68 < 2.025 \text{ MPa}$$

Tensión menor a la admisible

La losa corta es efectiva

ESFUERZOS Y DESPLAZAMIENTOS CRÍTICOS BARRAS

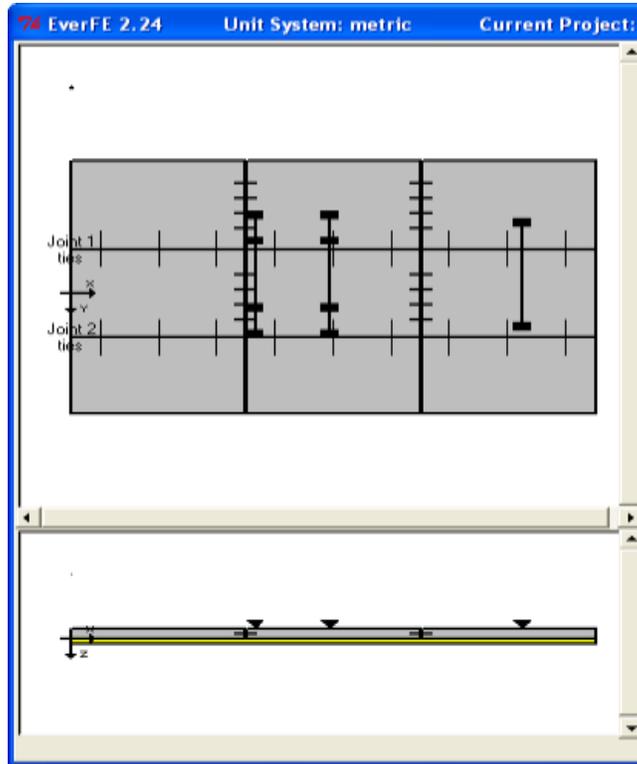
Tramo: Nueva terminal de buses de Tarija

losas 3mx1,90m Espesor 21cm Gradiente térmico: 12 °C

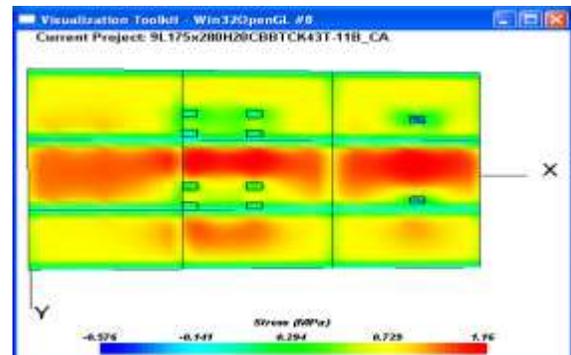
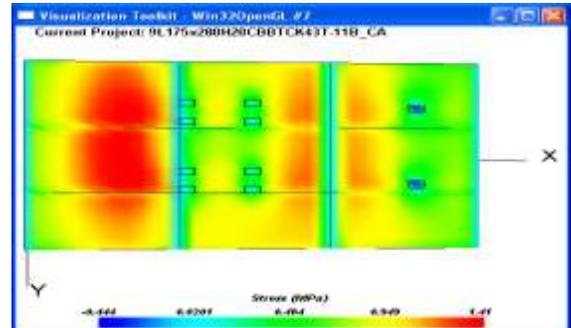
AUTOBUS

Posición carga: ESQUINA

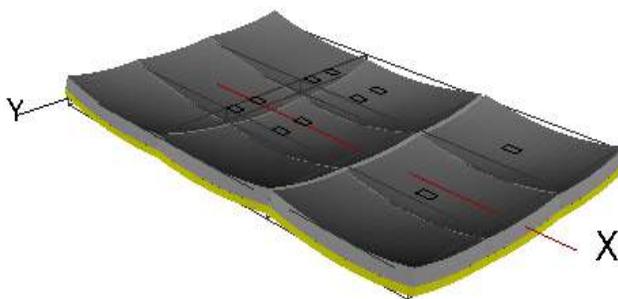
Esquema del modelo



Tensión máxima de tracción en dirección del eje X en la parte superior de la losa 1.50 MPa y 1.21 en la dirección Y.



Desplazamiento:



1.50 < 2.025 MPa

Tensión menor a la admisible

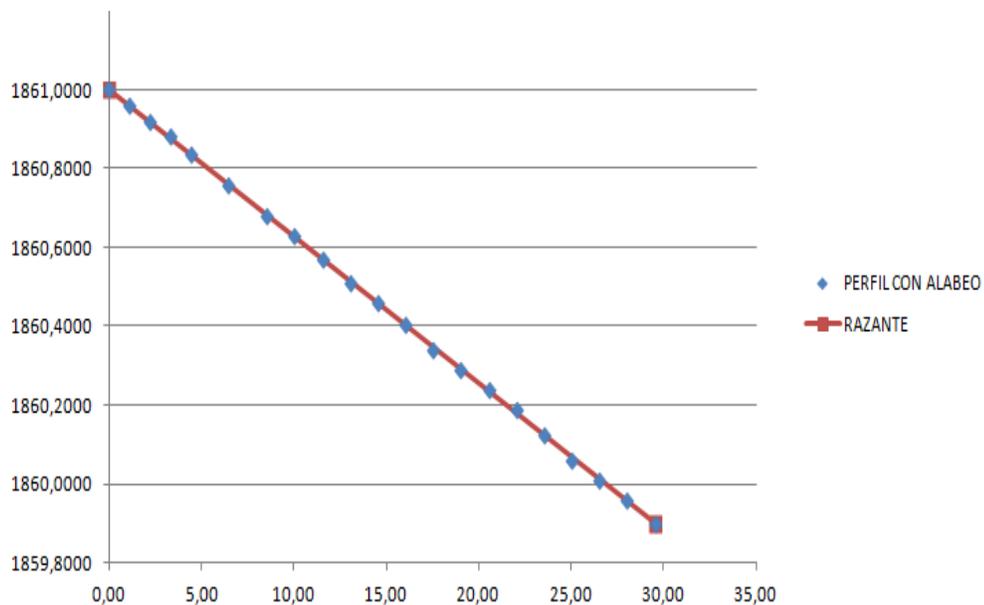
La losa corta es efectiva

4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Efecto del alabeo en losas de concreto

➤ TRAMO 1: NUEVA TERMINAL DE BUSES DE LA CIUDAD DE TARIJA

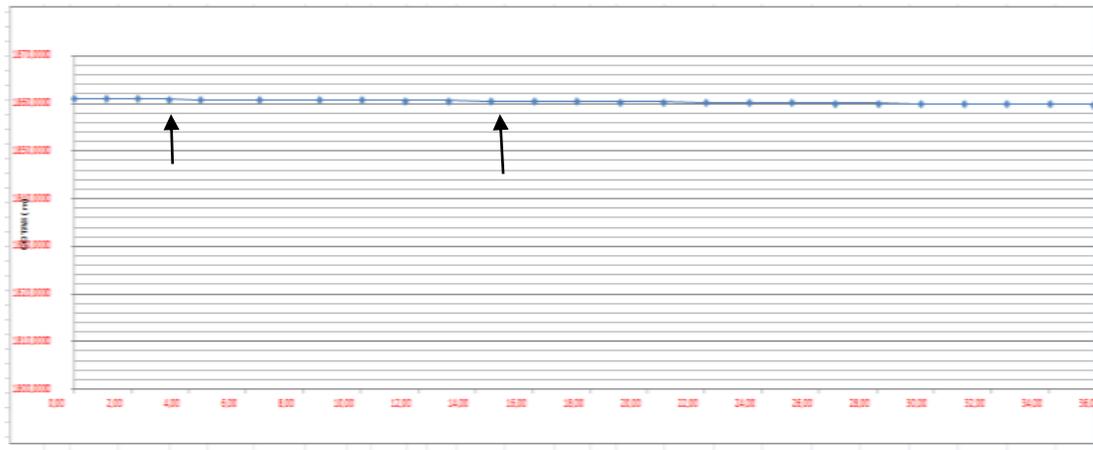
Luego de realizar los estudios de perfilometría de las losas en el pavimento rígido de la nueva terminal de buses de la ciudad de Tarija, se verifica que pese a ser un pavimento nuevo que aún no ha sido puesto en servicio en toda su capacidad estructural, el mismo muestra que el esfuerzo de alabeo se ha dado en todas las losas estudiadas como se esperaba, producto de las gradientes térmicas producidas por esos cambios de temperatura entre la capa superior e inferior de la losa del pavimento, cuyo efecto es inducido por los cambios de temperatura en el medio ambiente que circunda el pavimento, el estudio muestra una variación aceptable entre diferentes losas respecto a la combadura de la losa producto del alabeo cuya variación de todas las losas estudiadas está entre 0,0001m y 0,0028m, asimismo en perfiles transversales podemos establecer que se presentan alabeos entre 0,0005m y 0,00096m demostrando que el mayor alabeo se presenta en el perfil longitudinal.



En el estudio realizado a losas individuales se establece que las variaciones más extremas entre esquina y medio de la losa donde se produce el alabeo alcanza valores de 0,0030m como máximo y 0,0001m como mínimo.

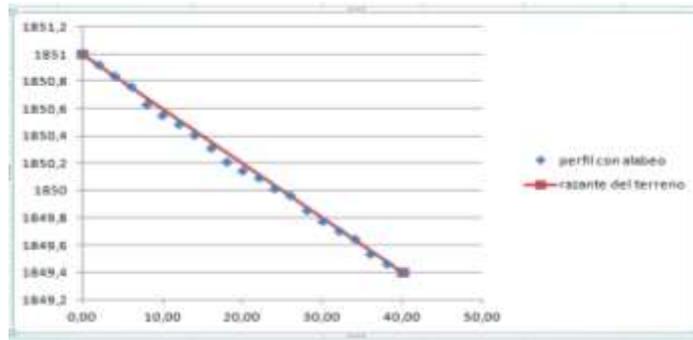
El estudio también nos muestra que la perfilometría longitudinal del pavimento se ve afectada por estos efectos de combadura en las losas, perdiendo el confort para la circulación vehicular que se hace más notorio cuanto mayores son los valores de alabeo.

Perfilometría-Nueva terminal de buses de Tarija



➤ TRAMO 2: PAVIMENTO RÍGIDO DE LA AVENIDA CIRCUNVALACIÓN

Luego de realizar los estudios de perfilometría de las losas en el pavimento rígido de la avenida circunvalación, se verifica que al ser un pavimento puesto en servicio más de 15 años, la misma muestra que el esfuerzo de alabeo además de los otros esfuerzos a los que está sometido el pavimento, se comprueba valores mayores de alabeo en todas las losas estudiadas como se esperaba producto de las gradientes térmicas producidas por esos cambios de temperatura entre la capa superior e inferior de la losa del pavimento, cuyo efecto es inducido por los cambios de temperatura en el medio ambiente que circunda el pavimento, el estudio muestra una variación aceptable entre diferentes losas respecto a la combadura de la losa producto del alabeo cuya variación de todas las losas estudiadas está entre 0,0009m y 0,03m, asimismo en perfiles transversales podemos establecer que se presentan alabeos entre 0,0057m y 0,0256m demostrando que el mayor alabeo se presenta en el perfil longitudinal, se nota que en tramos con pendiente esta variación se hace más acentuada haciendo que los vértices tengan una variación con respecto a otros puntos de la losa más pronunciada.



En el estudio realizado a losas individuales se establece que las variaciones más extremas entre esquina y medio de la losa donde se produce el alabeo alcanza valores de 0,030m como máximo y 0,003m como mínimo.

PERFIL A1-B1 AV. CIRCUNVALACION SEGMENTO 2-LOSA 2



El estudio también nos muestra que la perfilometría longitudinal del pavimento se ve afectada por estos efectos de combadura en las losas perdiendo el confort para la circulación vehicular que se hace más notorio cuanto mayores son los valores de alabeo.

- **Alternativa para disminuir la presencia del alabeo en losas de concreto**

Con los resultados obtenidos en el cálculo del esfuerzo del alabeo mediante la teoría de Westergaard de los dos tramos en estudio y de la nueva propuesta de losas cortas que arrojaron esfuerzos iguales por lo que podemos establecer que los esfuerzos de alabeo tienen como variable más importante el gradiente que se produce en la losa por los cambios de temperatura, aspecto que esta fuera de control del proyectista por lo que se establece que independientemente de las dimensiones, espesores y esfuerzos, las losas de hormigón siempre tendrán un esfuerzo de alabeo, cuya incidencia tendrá que ser disminuida a través de los otros esfuerzos que se generan en la losa.

La posibilidad de disminuir el alabeo a través de las losas cortas esta en disminuir geoméricamente las dimensiones de las longitudes, para ello utilizamos longitudes menores pero esas dimensiones no influyen en el espesor de la losa, ya que el espesor depende de otros factores que no están relacionados con las dimensiones geométricas de la losa por lo que va afectar la dimensión geométrica de la losa y no así el espesor que será igual en todos los casos debido a las condiciones en que se tiene el pavimento rígido. Para mejorar las condiciones del alabeo frente a los otros esfuerzos la disminución de esfuerzos se va producir por la carga disminuida que va entrar en una losa corta comparada con la carga que entraría en una losa convencional.

Esto lo verificamos con el cálculo de los esfuerzos de la losa mediante el programa de elementos finitos EVERFE.2.24. donde obtuvimos los siguientes valores:

TRAMO	ESFUERZO MÁXIMO PRODUCIDO EN LA LOSA
Av. Circunvalación	1.50MPa
Nueva Terminal de Buses de Tarija	1.68MPa
Losa propuesta	1.41 MPa

Por lo que se puede observar claramente que el diseño propuesto es efectivo ya que los valores de los esfuerzos arrojados por el programa para cada caso analizado nos muestra que el esfuerzo es menor al utilizar dimensiones mucho menores en la geometría de las losas.

CAPITULO V

5.1. CONCLUSIONES

- El alabeo que se presenta en el conjunto de las losas de la terminal nueva es mucho menor si comparamos con el alabeo presentado en el pavimento rígido de la avenida Circunvalación debido a que las losas han estado en servicio más cantidad de años.
- En la perfilometría del tramo de pavimento antiguo como es el caso de la Circunvalación por los años que tiene de servicio hay un desgaste mayor de losas y un efecto mayor del alabeo alcanzando valores de hasta 28mm.
- El alabeo por lo que se pudo analizar no afecta a la estructura como tal, sino simplemente al aspecto superficial dando menos confort en la circulación de los vehículos.
- La rugosidad en las losas en el caso de las losas del tramo de la Circunvalación podría influir negativamente en los valores del alabeo aunque no afecten en general a la perfilometría.
- El alabeo no es un factor que puede ser eliminado de forma total en las losas ya que depende fundamentalmente del gradiente de temperatura, situación que queda fuera de las manos del proyectista.
- Se puede concluir que si los otros esfuerzos que se generan en las losas disminuyen el alabeo va a tener menor incidencia, para disminuirlos la única posibilidad es la utilización de losas cortas.
- Una losa corta tendrá la mitad del esfuerzo que en una losa normal por eso planteamos losas cortas, si bien el alabeo no es el mismo no abran los otros esfuerzos que sumen y pongan crítica a la losa hasta provocar su fisuración, por eso disminuimos la longitud y el criterio lógico en el ancho es partir por la mitad la losa y en la longitud hace el valor más pequeño que cumpla la relación de lados que esta propuesta por la normativa AASHTO.
- Finalmente se puede concluir que el diseño de losa corta propuesto como alternativa de disminución del alabeo en las losas de concreto es efectivo y garantiza la disminución de la presencia del factor del alabeo.

5.2. Recomendaciones

- Se puede recomendar que la utilización de equipos de alta precisión es fundamental para realizar el levantamiento de la perfilometría tanto de los bordes de losa como del perfil definitivo.
- Se recomienda para una mejor precisión de los resultados en alabeo segmentar los tramos de estudio ya que de esta manera permite tener mayor certeza de los valores e relación a la perfilometría total
- Para el procesamiento del alabeo es necesario hacer una depuración de datos que no sean consistentes con el conjunto de información que se recaba de los tramos

Se recomienda realizar procesos de distinta segmentación para ver si las diferencias en el alabeo no son significativas y obedecen a una misma secuencia.