

# **MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA DESVIACIÓN DE LAS DOVELAS EN LOSAS DE PAVIMENTO RÍGIDO**

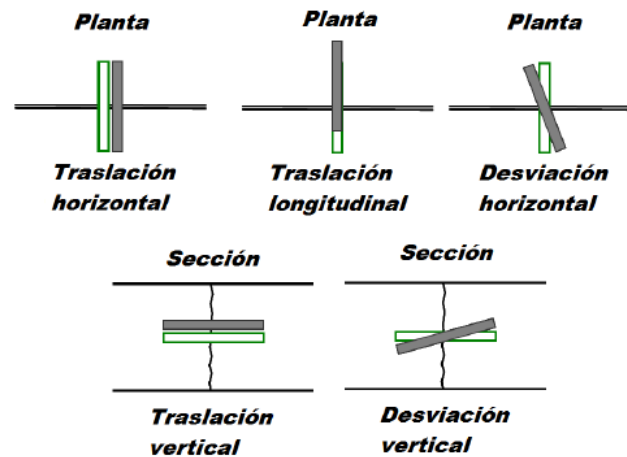
## **CAPÍTULO I “INTRODUCCIÓN”**

### **1.1 ANTECEDENTES**

Los pavimentos de concreto de cemento Pórtland requieren juntas transversales para controlar los esfuerzos de flexión inducidos por los cambios de temperatura y humedad en la masa del concreto. Dichas juntas constituyen puntos de discontinuidad estructural en los cuales es necesario un mecanismo de transferencia de las cargas de tránsito para reducir la intensidad de los esfuerzos en el sistema losa – fundación y los problemas asociados de bombeo y escala. Los mecanismos convencionales de transferencia de carga incluyen la ligazón de agregados y la instalación de barras pasajunta de acero liso conocidas como “dovelas”. La efectividad de la unión de agregados es susceptible a los cambios volumétricos del concreto y se recomienda sólo en pavimentos para bajos volúmenes de tránsito y con losas cortas. La instalación de las dovelas se puede realizar de varias formas: (a) mediante canastillas antes del vaciado del concreto, (b) mediante un equipo automático de inserción en el concreto fresco y (c) mediante la inserción manual. La práctica aceptada requiere que las dovelas queden correctamente alineadas y niveladas dentro de la masa de concreto para que permitan el libre movimiento de la junta, lo cual se logra sólo con los dos primeros métodos de instalación.

En 1986, Tayabji (Hoegh & Khazanovich, 2009), definió cinco posibles casos de alineamiento incorrecto de dovelas: (1) traslación horizontal, (2) traslación longitudinal, (3) traslación vertical, (4) desviación horizontal y (5) desviación vertical (Figura 1).

**FIGURA N° 1, Casos de Alineamiento Incorrecto de Dovelas.**



**Fuente:** (Tayabji, 1986 en Hoegh & Khazanovich, 2009)

En los Estados Unidos de Norteamérica, la Federal Highway Administration (FHWA, 1990) ha limitado las desviaciones vertical y horizontal a un máximo de 6.3 mm en 305 mm (2%) aunque aclara que esta tolerancia requiere estudios adicionales. Por otra parte, la American Concrete Pavement Association (ACPA, 2004) recomienda una tolerancia de 9.5 mm en 305 mm (3%) a partir de los resultados presentados en la Síntesis 56 del National Cooperative Highway Research Program (NCHRP, 1979). En este trabajo se analiza el efecto de la desviación horizontal, con valores superiores a las tolerancias citadas, y se comparan los resultados con observaciones de laboratorio hechas y con valores modelo.

Una estructura pierde utilidad cuando sufre alguna inestabilidad o tiene deformaciones excesivas. Si el material del que está compuesta la estructura es dúctil, como el acero, puede seguir soportando cargas aunque con deformaciones plásticas irreversibles hasta llegar al colapso o rotura definitiva. Luego para la determinación precisa del nivel de cargas que provocarán la rotura de la estructura es necesario llevar en cuenta el comportamiento elastoplástico (desplazamientos y las tensiones en un sólido deformable) de los materiales.

Las condiciones que ofrece la movilización de bienes y personas sobre las vías, constituyen uno de los principales aspectos relacionados con la productividad de una ciudad, de una región y de la misma nación, teniendo como consecuencia las ventajas comparativas que se pueden adquirir frente a otras. Asimismo, el estado de las vías es un parámetro importante relacionado con la calidad de vida de los ciudadanos.

En los pavimentos rígidos, las dovelas o barras pasajunta tienen como función transmitir la carga entre losas de concreto de cemento Pórtland y están dispuestas, por lo general, de forma transversal al sentido del flujo vehicular. Las dovelas contribuyen con la disminución de los esfuerzos y deformaciones debidas a las cargas de tránsito. Sus características de diseño tienen en cuenta la longitud, el diámetro y el espaciamiento, y son determinadas a partir de los esfuerzos producidos en la interacción dovela–losa. La correcta instalación de las dovelas requiere que éstas sean horizontales y paralelas al flujo vehicular y que estén ubicadas en la mitad del espesor de la losa.

Las vías provinciales y departamentales interconectadas son alternativas de origen – destino, dando un mayor cubrimiento económico y social. Nuestras vías son un patrimonio muy grande que hay que mantener y rehabilitar mediante procedimientos acorde con sus solicitudes de servicio utilizando tecnologías económicas pero que igualmente sean soluciones válidas, acertadas y experimentadas.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

En la ciudad de Tarija, en sus Provincias y en la red troncal vial del país, se ha observado a través del tiempo, que los pavimentos rígidos, han sufrido gran deterioro, debido a problemas en el diseño, en la calidad de los materiales y situaciones climatológicas; es por esto que se pretende hacer una modelación numérica si es que existe alguna influencia en la posición del colocado de las dovelas o pasajuntas en losas de pavimento rígido y de esta manera modelar las fuerzas cortantes ejercidas en las losas si reducen o aumentan estas fuerzas.

Por otro lado, actualmente se disponen de modelos numéricos, principalmente basados en el Método de los Elementos Finitos que permiten representar adecuadamente el comportamiento de un diseño estructural. Sin embargo, la mayoría de las formulaciones no lleva en cuenta la presencia inevitable de imperfecciones en la geometría de las estructuras que pueden provocar una degradación considerable de su capacidad portante.

En este proyecto de investigación se realizará la modelación numérica del efecto de la desviación horizontal sobre el comportamiento de las dovelas mediante la comparación con una condición de construcción ideal. Se incluirán referencias a investigaciones sobre modelos físicos para contrastar con las conclusiones de los autores.

La presente investigación se justifica para saber si es importante conocer el efecto de la desviación horizontal de las dovelas de forma transversal en los pavimentos rígidos para la parte constructiva en las losas.

### **1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.3.1 Situación Problemática**

Las calles, avenidas, carreteras diseñadas y construidas con Pavimento Rígido presentan en algunos casos fisuras transversales y problemas asociados de bombeo (relacionado con la humedad) y escalonamiento (relacionado con la carga). Pudiendo ser un efecto el no respetar si su diseño es para bajos volúmenes de tránsito o para altos volúmenes de tránsito y con losas cortas o largas.

Faltando en esta parte señalización Vehicular Visible y Educación Vial en los conductores; con el respeto a las normas de tránsito y señalética.

El tema de la existencia y estado de las carreteras es uno de los que está presente en el diario vivir de las personas de comunidades, barrios, ciudades, tanto por la necesidad de traslado de personas por motivos laborales, educacionales, acceso a establecimientos de salud, como por motivos productivos que implica la movilización de carga desde un origen productivo y un destino de consumo.

Las carreteras también son fuente de accidentes, muchos de los cuales se evitarían con buenos trazados siguiendo las normas para el diseño y no sólo accediendo a una necesidad mezquina para no dar los taludes y radios necesarios a un diseño, de acuerdo a la categoría de carretera, buen estado de las vías, adecuadas demarcaciones y señalamientos. De tal forma que la necesidad de adecuadas carreteras es un derecho muy apreciado por la población en general.

Al producirse el deterioro de nuestras avenidas y carreteras con baches, fisuras y otros nos vemos en la necesidad de analizar posibles causas que las producen y de esta manera realizar mejores diseños y construcciones evitando de esta manera problemas sociales legales y económicos.

En las construcciones ya realizadas en la ciudad de Tarija no se cuenta con diseño en refuerzo transversal y este se requiere para contrarrestar cambios en el volumen de suelos por humedad y temperatura que pueden inducir fisuras longitudinales.

### **1.3.2 Problema**

La colocación de barras pasajuntas o dovelas en losas con pavimento rígido tiene una función importante en el comportamiento de las mismas. ¿Será que al analizar en laboratorio a través de un modelamiento numérico para ver si incide o no la inclinación de dovelas en losas de pavimento rígido se obtiene resultados que nos puedan permitir afirmar sobre el efecto de su posición de estas dovelas en la losa?

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo General**

Realizar un análisis acerca del comportamiento de las dovelas mediante la comparación con una condición de construcción ideal y real respecto a la desviación horizontal o vertical en juntas transversales de pavimento rígido y con ello mostrar un análisis numérico con el software EverFE, en su Desviación Horizontal y la fuerza cortante calculada en las dovelas al cambio de posición de la desviación, con la innovación en métodos de análisis y diseño.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

- Obtener toda la información acerca de los materiales adicionales para desarrollar la parte práctica de la investigación y preparar correctamente los materiales empleados (grava, arena, cemento, barras de transferencia de carga), antes de dar inicio con el vaciado de los moldes con hormigón.
- Analizar todos los conceptos necesarios relacionados al pavimento rígido, juntas transversales y dovelas (pasadores), para establecer todos los lineamientos que deberán seguirse para la correcta ejecución de la parte práctica de la investigación.
- Modelación de las dovelas método del elemento finito para este estudio.
- Estudio y desarrollo de técnicas numéricas para el análisis elastoplástico de estructuras de pavimento rígido con inclinación horizontal y vertical en la posición de las dovelas mediante elemento finitos.
- Modelación numérica con el software EverFE (Davids, 2004), el cual permite el análisis tridimensional de pavimentos de concreto no reforzado y con juntas, sometidos a cargas de tránsito y efectos ambientales.
- Obtener resultados con el programa EverFE e ilustrar en Figuras (desplazamientos del sistema) y la (fuerza cortante en la dovela a definir) para losas con cierto espesor sobre una fundación con módulo de reacción de 14 MPa/m
- Desarrollar las actividades concernientes a la investigación de una forma correcta y ordenada para finalmente establecer los resultados obtenidos y estos poder plasmarlos en gráficos para su análisis y observación.
- Determinar los esfuerzos producidos en las losas de dimensiones superficiales optimizadas, en pavimentos de concreto hidráulico, por medio de programas computacionales.
- Establecer a partir de los resultados las conclusiones y recomendaciones que se puedan obtener después de la investigación.

## **1.5 HIPÓTESIS**

Si es mayor la desviación horizontal de las dovelas entonces se presenta un incremento en la fuerza cortante en las mismas. Dicho incremento causará el aumento del esfuerzo de soporte en la interface dovela–losa.

## **1.6 VARIABLES**

Variable Dependiente.- Angulo de Inclinación o desviación horizontal de la Dovela en la Losa.

Variable Independiente.- Módulo de reacción de la fundación sobre el cortante máximo de cada dovela para cierto espesor.

## **1.7 ALCANCE**

El proyecto de investigación tendrá como alcance:

En la primera parte Capítulo I de Introducción, se establecerá el fundamento para realizar este análisis en losas de pavimentos rígidos, además se justificará las razones por las cuales se debe realizar esta investigación, estableciendo clara y puntualmente el objetivo general a lograr, así como también los específicos. También se planteará una hipótesis a través de la cual se logrará llegar al objetivo fundamental, se desarrollará posteriormente todos los trabajos de gabinete y laboratorio más el uso de programas computacionales que se requiera en esta investigación.

En el Segundo Capítulo se procede a redactar todo lo desarrollado como estado de conocimiento sobre el tema de investigación desde los conceptos básicos de los pavimentos rígidos, sus componentes, características y propiedades de los pavimentos, además profundizando lo referente a la colocación de dovelas y su importancia dentro del comportamiento.

En el Tercer Capítulo se enfocará a la parte de fabricación y creación de las vigas tipo previa caracterización de materiales, ejemplos de ensayos y resultados de losa modelada en paquete computacional, laboratorio y gabinete; y especialmente a lo que será la modelación en sí. De esta forma sacar conclusiones al tema investigado.

El trabajo de investigación alcanzará estudios a nivel de pregrado aplicando los conocimientos adquiridos en las aulas universitarias, y la correspondiente tutoría del docente asignado se realizará a nivel de modelación en paquetes computacionales y prueba en laboratorio.

## **1.8 DISEÑO METODOLÓGICO**

### **1.8.1 Unidad**

Los elementos que serán medidos en la segunda parte de la investigación como ser momento máximo en dovela por espesor de losa y variaciones de la fuerza cortante.

### **1.8.2 Población**

La investigación tomará como universo, el pavimento rígido con distintos grados de inclinación en dovelas; en secciones o tamaños de losas definidos.

### **1.8.3 Muestra**

Para obtener la muestra se deberá efectuar prospecciones de probetas para laboratorio..

### **1.8.4 Medios y Técnicas**

Las técnicas para la recolección de datos de las muestras de secciones de losa para pavimento rígido serán descritas al momento de llegar a la etapa de materiales y muestras en laboratorio.

### **1.8.5 Metodología**

En la primera etapa se recolecta material y se realizan ensayos a los mismos para el concreto empleado en el pavimento rígido, posteriormente una observación de lo que sucede al ejecutar los ensayos de laboratorio:

- Caracterización de materiales.
- Se realizarán los ensayos de laboratorio como roturas de secciones de pavimento rígido con dovelas en estudio y obtener valores que se utilizarán como muestras patrón.
- Se presentará graficas con los resultados en figuras y tablas.



El trabajo busca en su segunda etapa, recopilar, elaborar y presentar los conceptos de la tecnología EVER FE ó ISLAB- Modelo de Elementos Finitos para calcular los esfuerzos en el hormigón por cargas y temperatura Esfuerzos en la Losa para entender el desarrollo del tema.

Y por último, con los datos obtenidos realizar la tabla de resultados, análisis de los gráficos y comparación de lo hecho en laboratorio contra lo modelado en software.

Por otro lado, se ha tenido en cuenta para el desarrollo de la investigación una hipótesis inicial, la cual consiste en si es mayor desviación horizontal de las dovelas entonces se presenta un incremento en la fuerza cortante en las mismas. Dicho incremento causará el aumento del esfuerzo de soporte en la interface dovela–losa.

El procedimiento seguido en la elaboración de esta investigación se desarrolla en capítulos posteriores la misma será elaborada con la finalidad de cumplir con los objetivos propuestos anteriormente.

#### **1.8.6 Tratamiento Estadístico**

Utilizar la estadística descriptiva con los siguientes indicadores de tendencias:

- Media
- Desviación estándar
- Coeficiente de variación

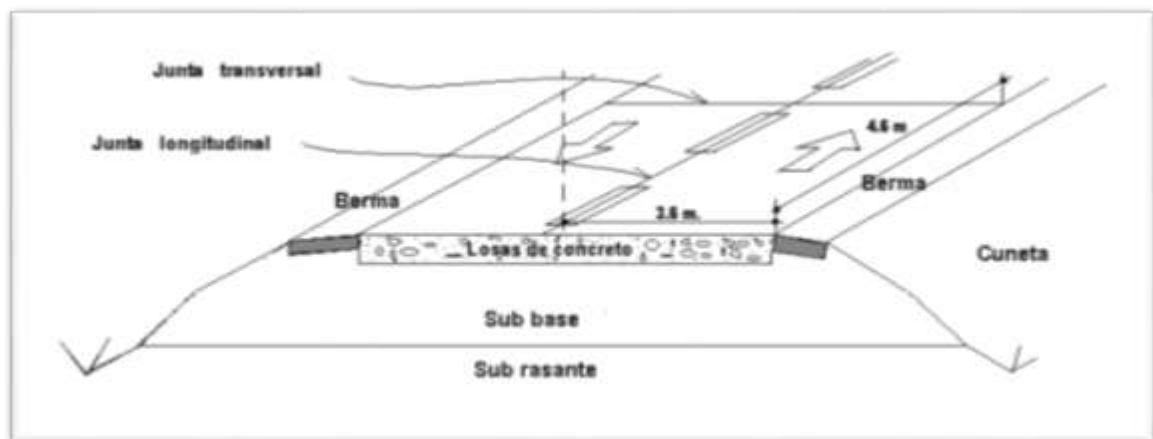
## CAPÍTULO II “ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE DOVELAS EN LOSAS DE PAVIMENTO RÍGIDO”

### 2.1 DEFINICIÓN DEL PAVIMENTO RÍGIDO

Conjunto de capas superpuestas, relativamente paralelas, de varios centímetros de espesor, de materiales de diversas características, adecuadamente compactados, que se construyen sobre la subrasante obtenida por el movimiento de tierras y que han de soportar las cargas del tránsito durante varios años sin presentar deterioros que afecten la seguridad y la comodidad de los usuarios o la propia integridad de la estructura. (Kraemer & Del Val)

Es una estructura vial que tiene como finalidad resistir los esfuerzos producidos por el tráfico, brindando una superficie de rodadura limpia, cómoda, segura y durable, por medio de losas de hormigón hidráulico que pueden tener o no refuerzo.

**FIGURA N° 2,** Esquema Estructural del Pavimento Rígido.



**Fuente:** <http://libro-pavimentos.blogspot.com/search/label/Pavimentos>

Pavimento rígido constituido por un conjunto de losas de concreto de cemento portland que se pueden construir directamente sobre la subrasante preparada o sobre una capa intermedia de apoyo (base o subbase), elaborada con materiales granulares o estabilizados o con un concreto pobre.

Los pavimentos de concreto o pavimento rígido como también se les designa, difieren de los pavimentos flexibles, primero, en que poseen una resistencia considerable a la flexión, y segundo, en que son afectados grandemente por los cambios de temperatura.

Los pavimentos rígidos están sujetos a los siguientes esfuerzos:

- Esfuerzos de compresión y tensión que resulta de la deflexión de las losas bajo las cargas de las ruedas.
- Esfuerzos de compresión y tensión causados por la expansión y contracción del concreto.
- Esfuerzos de compresión y tensión debidos a la combadura del pavimento por efectos de los cambios de temperatura.

En virtud de estar los pavimentos rígidos sujetos a los esfuerzos ya anotados, es notorio que para que estos pavimentos cumplan en forma satisfactoria y económica la vida útil que de ellos se espera, es necesario que su proyecto esté basado en los siguientes factores:

- Volumen, tipo y peso del tránsito a servir en la actualidad y en un futuro previsible.
- Valor relativo de soporte y características de la subrasante.
- Clima de la región.
- Resistencia y calidad del concreto a emplear.

Si no se toma en cuenta alguna de los puntos mencionados en un proyecto, el pavimento no será económico, por ejemplo, si los espesores de las losas de concreto son muy elevados, su capacidad de carga es mayor a la que realmente soporta y tendrá un comportamiento satisfactorio, pero su costo de construcción será excesivo. Por el contrario, si los espesores son menores que los requeridos para las cargas que soportara, se acortara su vida de servicio y tendrá un costo de conservación muy alto y por lo tanto se volverá antieconómico y con un comportamiento poco satisfactorio.

## 2.2 PROPIEDADES Y FUNCIONES DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS

### 2.2.1 ASPECTOS GENERALES

Ante todo se debe conocer que los pavimentos flexibles son aquellos que tienden a deformarse y recuperarse después de sufrir deformación, transmitiendo la carga en forma lateral al suelo a través de sus capas. Está compuesto por una delgada capa de mezclas asfálticas, colocada sobre capas de base y sub base, generalmente granulares.

En tanto que los Pavimentos Rígidos: son aquellos formados por una losa de concreto Pórtland sobre una base, o directamente sobre la subrasante. Transmite directamente los esfuerzos al suelo en una forma minimizada, es autoresistente, y la cantidad de concreto debe ser controlada.

En función a lo señalado anteriormente; se puede diferenciar que en el pavimento rígido, el concreto absorbe gran parte de los esfuerzos que las ruedas de los vehículos ejercen sobre el pavimento, mientras que en el pavimento flexible este esfuerzo es transmitido hacia las capas inferiores (Base, Sub base y Subrasante).

**FIGURA N° 3**, Diagrama de Esfuerzo en Pavimento Rígido y Flexible.



**Fuente:** <http://oswaldodavidpavimentosrigidos.blogspot.com/>

### 2.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS

Funciones de la estructura de un pavimento.- Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento de los pavimentos rígidos son las siguientes:

- Para reducir y distribuir los esfuerzos producidos por las cargas del tránsito, de manera que no causen daño en la subrasante.

- Una superficie lisa, no resbaladiza, que resista la intemperie y finalmente debe proteger el suelo de la pérdida de sus propiedades, por efecto del sol, las lluvias y el frío.
- Proporcionar comunicación vehicular entre dos puntos en todo tiempo.
- Ancho, trazo horizontal y vertical adecuado, resistencia suficiente a las cargas para evitar las fallas y los agrietamientos, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aún en condiciones húmedas.
- Deberá presentar una resistencia adecuada a los efectos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua. Tendrá una adecuada visibilidad y contar con un paisaje agradable para no provocar fatigas.

Con la anterior definición hemos dado un avance de las condiciones mínimas que deben exigirse a los materiales que intervienen en la construcción de pavimentos. Pueden aceptarse como normas generales las que se mencionan a continuación:

- Ofrecer una superficie plana, sobre la que pueda caminar sin dificultad.
- Serán resistentes al uso, a fin de prolongar su duración, teniendo en cuenta que habrán de soportar no solamente pesos de importancia, sino también cambios de temperatura y choques con algún cuerpo proyectado con violencia, sobre todo cuando se trate de pavimentos exteriores.
- Procurar que su presencia sea decorativa, extrayendo de cada caso y de los materiales disponibles el mayor partido posible.

Estas características que acabamos de citar deberán hallarse atribuidas en mayor o menor grado según sea la aplicación a que vaya a destinarse el pavimento a construir, como es lógico de suponer, cada caso podría variar de acuerdo con sus propias conveniencias de perdurabilidad y de utilidad.

### 2.2.3 APLICACIÓN Y VENTAJAS

El Pavimento Rígido se aplica en todo tipo de pavimentos urbanos, carreteras, áreas de estacionamiento, aeropuertos, pisos industriales entre otros. Con notables ventajas tomando en cuenta los diferentes aspectos como son: la economía, comodidad, seguridad y durabilidad, los cuales se detallan a continuación.

**Economía:** el costo inicial es muy elevado frente a otras alternativas, pero el costo anual es muy bajo debido a que necesita menos mantenimiento y tiene un largo periodo de vida útil. Al final de su vida tiene un valor residual alto, porque puede ser reutilizado como una buena base para un nuevo pavimento. También se logra economía indirecta como en el caso de la iluminación pública, que puede minimizarse debido a su calidad reflectada. El acabado superficial reduce el desgaste de los automóviles y el consumo de combustible hasta en un 20 % en camiones tipo tráiler, en Bolivia, el uso de cemento nacional es positivo porque se genera empleo y se evita la fuga de divisas, que se originaría si se importa asfalto.

**Comodidad:** se brinda una superficie de rodamiento suave y segura, lograda gracias a los equipos de pavimentación y sistemas de transferencia de cargas cada vez más efectivos.

**Seguridad:** el color y textura otorgan mejor visibilidad nocturna y genera menos calor de día. La rugosidad superficial genera una superficie antideslizante más segura en superficies mojadas.

**Durabilidad:** el periodo de vida útil es mucho mayor al de otras alternativas, con rígido valor entre los 20 y 40 años. El hormigón con el tiempo va ganando resistencia, logrando soportar hasta tres veces la capacidad de carga de diseño, por lo que el mantenimiento que requiere es mínimo.

Resumiendo, las ventajas de un pavimento rígido radican en: velocidad en su construcción, mayor vida útil con alto índice de servicio, mantenimiento mínimo, no se deforma ni deteriora con el tiempo, requiere menor estructura de soporte.

## 2.2.4 TIPOS DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

- Losas de Concreto Simple o Monolítico (JPCP)

Pavimentos construidos con concreto simple y con juntas de contracción espaciadas de manera continua (5 a 10 metros)

**FIGURA N° 4,** Pavimento de Concreto Simple.



**Fuente:** diseño de pavimentos aashto 93-dipav 2 IBCH.

- Simple con dovelas o barras de transferencia (JPCP)

Barras de refuerzo o mecanismos de agarre son usados para transferir la carga de una capa a otra.

**FIGURA N° 5,** Pavimento de Concreto Simple, con barras de transferencia., Dovelas.

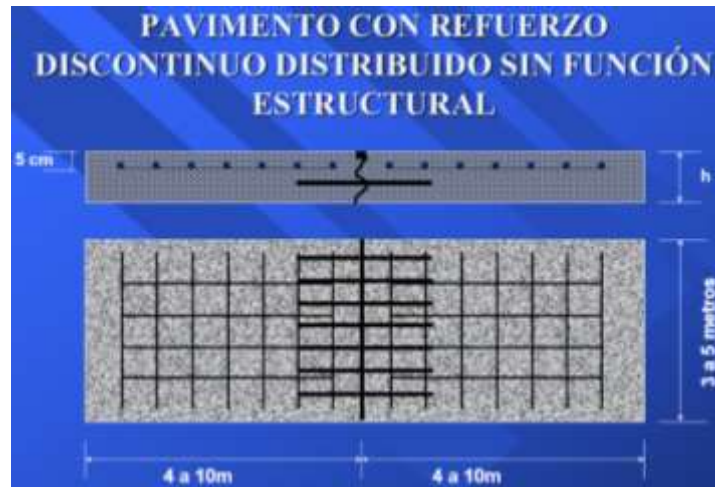


**Fuente:** diseño de pavimentos aashto 93-dipav 2 IBCH.

- Losas con refuerzo discontinuo distribuido sin función estructural (JRCP)

Las losas son reforzadas con barras de acero, que aunque no aumentan la capacidad portante de la losa, aumenta el espaciamiento de las juntas de 10 m a 30 m.

**FIGURA N° 6**, Pavimento con refuerzo discontinuo distribuido sin función estructural.

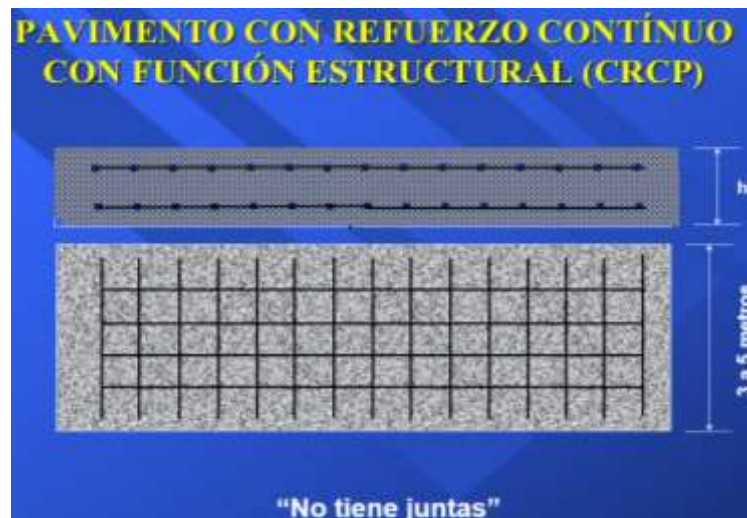


**Fuente:** diseño de pavimentos aashto 93-dipav 2 IBCH.

- Pavimento Continuamente Reforzado (con refuerzo estructural) (CRCP)

Proceso mecanizado en la cual se eliminan las juntas de contracción.

**FIGURA N° 7**, Pavimento con Refuerzo Continuo con Función Estructural.



**Fuente:** diseño de pavimentos aashto 93-dipav 2 IBCH.

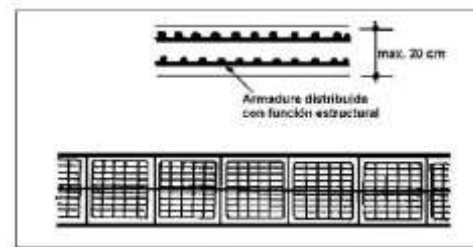


Con este tipo de pavimento, no tiene juntas, pero en este caso el refuerzo no está limitado a estas, sino que dicho refuerzo se coloca en forma longitudinal y transversal quedando una malla continua en el pavimento, con este tipo de armado se puede tener un control sobre las grietas que aparecen en el concreto, así como también tener un aumento en la capacidad de carga del pavimento, reduciéndose el espesor de la losa.

- Pretensado

La particularidad de este pavimento, está en que a la losa de concreto hidráulico se le puede aumentar su capacidad estructural, mediante la aplicación de un pre esfuerzo. Con esto se logra una reducción del espesor de la losa en forma notable y además las juntas van un poco más alejadas.

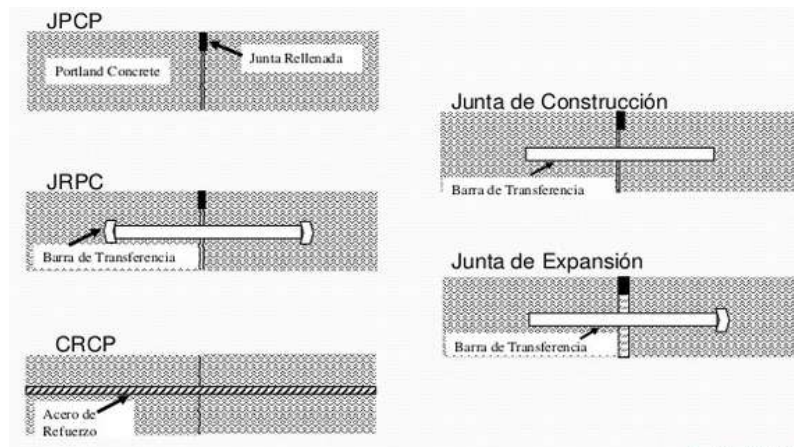
**FIGURA N° 8**, Gráfica de Pavimento Rígido Pretensado.



Pudiendo de esta manera evidenciar los tipos de pavimento rígido en la gráfica.

**Fuente:** *IBCH.*

**FIGURA N° 9**, Esquema Tipos de Pavimentos Rígidos.



**Fuente:** *“Pavimentos Rígidos” José Juan Garza Ruiz.*

## **2.3 ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS Y SUS CARACTERÍSTICAS**

### **2.3.1 SUBRASANTE.**

Es la capa de terreno de una carretera, que soporta la estructura del pavimento y que se extiende hasta una profundidad, en que no le afecte la carga de diseño que corresponde a la estructura prevista.

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.

Las funciones de la losa en el pavimento rígido son las mismas de la carpeta en el flexible, más la función estructural de soportar y transmitir en nivel adecuado los esfuerzos que le apliquen.

### **2.3.2 SUB BASE.**

Es la primera capa del pavimento rígido y está constituida por una capa de material selecto o estabilizado según el estudio de suelos, de un espesor compactado según las condiciones y características de los suelos existentes en la subrasante, pero en ningún caso menor de 10 centímetros ni mayor de 70 centímetros.

Esta capa de la estructura de pavimento está destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura del pavimento, de tal manera que la capa de subrasante la pueda soportar los esfuerzos. La capa sub base 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.

### **Especificaciones técnicas para la sub base:**

Esta actividad consistirá en el acarreo, colocación y compactación del material aprobado para la capa sub base, construida sobre la obra básica o terraplén de la carretera (subrasante), de acuerdo con las especificaciones, alineamiento, cotas, espesor y secciones típicas del diseño.

La sub base granular estará formada por suelos granulares, gravas naturales o agregados triturados o por mezclas de estos materiales procedentes de excedentes de excavaciones o canteras clasificadas y aprobados por la entidad consultora o ejecutora.

Los materiales a ser empleados en la sub base deberán consistir de partículas duras y durables de piedras o gravas seleccionadas o trituradas para obtener el tamaño y la gradación especificados.

Los áridos gruesos, retenidos sobre tamiz 4,75 mm (N°4), deben ser partículas resistentes, durables, constituidas de fragmentos de roca, grava o escorias. Materiales que se quiebran con los ciclos alternados de hielo - deshielo y humedad - sequedad, no deben ser usados. Los áridos finos, que pasan por tamiz 4,75 mm (N°4), deben estar constituidos por arenas naturales o trituradas y por partículas minerales que pasan por tamiz 0,075 mm (N° 200). Las fracciones que pasan por tamiz 0,075 mm (N° 200) no deberán ser mayores que los dos tercios de la fracción que pasa por tamiz 0,475 mm (N° 40). Los límites de consistencia de la fracción que pasa por tamiz 0,475 mm deberán tener un límite líquido no mayor a 35 según lo determinado en AASHTO T 89 y un índice de plasticidad no mayor a 8 según lo determinado en AASHTO T 90.

El equipo será el adecuado y apropiado para la carga, descarga, transporte, extendido, mezcla, homogeneización, humedecimiento y compactación del material, así como

herramientas menores; para la conformación de la sub base granular. Para alcanzar la productividad requerida, tomando en cuenta las particularidades de la zona en la que se desarrolla el proyecto, por lo que el equipo debe ser adecuado para las condiciones específicas de trabajo.

En ejecución cuando hubiera necesidad de ejecutar capas de sub base con espesor final superior a más 0.30 m, éstas serán subdivididas en capas parciales que no excedan de 0.20 m. El espesor mínimo de cualquier capa de sub-base será de 0.10 m después de su compactación.

Las densidades de la capa acabada deberán ser como mínimo de 97% de la densidad máxima determinada según el ensayo AASHTO T-180 y el contenido de humedad deberá variar como máximo entre  $\pm 2\%$  de la humedad óptima obtenida en el ensayo anterior.

Las principales funciones de la capa sub base de un pavimento rígido son las siguientes:

- La función más importante es impedir la acción del bombeo en las juntas, grietas y extremos del pavimento. Se entiende por bombeo a la fluencia de material fino con agua fuera de la estructura del pavimento, debido a la infiltración de agua por las juntas de las losas. El agua que penetra a través de las juntas licúa el suelo fino de la subrasante facilitando así su evacuación a la superficie bajo la presión ejercida por las cargas circulantes a través de las losas.
- Servir como capa de transición y suministrar un apoyo uniforme, estable y permanente del pavimento.
- Facilitar los trabajos de pavimentación.
- Mejorar el drenaje y reducir por tanto al mínimo la acumulación de agua bajo el pavimento.
- Ayudar a controlar los cambios volumétricos de la subrasante y disminuir al mínimo la acción superficial de tales cambios volumétricos sobre el pavimento.

- Mejorar en parte la capacidad de soporte del suelo de la subrasante.

Dada la rigidez comparativa de las losas de concreto y su resistencia, los esfuerzos que se transmiten a la capa sub base son pequeños, por lo que la resistencia no suele ser un requisito importante. En cambio, el correcto trabajo de las losas exige que estén uniformemente apoyadas y que ese apoyo se mantenga en buenas condiciones durante toda la vida del pavimento; un buen apoyo debe incluir transiciones graduales en donde haya cambios abruptos en la capacidad portante del terreno.

Los cambios volumétricos en el terreno de apoyo, causados por cambios en el contenido de agua, pueden ser causa importante para que la losa pierda su apoyo uniforme.

### **2.3.3 LOSA DE CONCRETO “CARPETA DE RODADURA”**

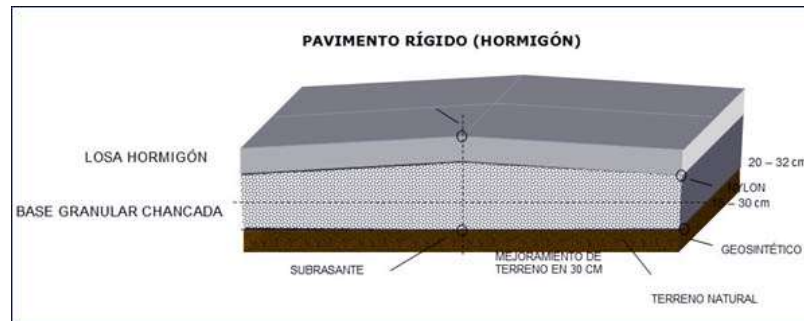
Es la capa superior de la estructura de pavimento, construida con concreto hidráulico, por lo que debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la losa, más que en la capacidad de la subrasante. En general, se puede indicar que el concreto hidráulico distribuye mejor las cargas hacia la estructura de pavimento.

En la construcción de la carpeta de rodadura la colocación del hormigón se la realiza sobre la sub base y mientras la misma mantenga sus condiciones de estabilidad y humedad se colocará el hormigón inmediatamente elaborado en la obra, en descargas sucesivas distribuyéndolo en todo el ancho de la calzada o franja a hormigonar y con un espesor tal que al compactarlo resulte el indicado para el firme en los planos de cierto proyecto.

El hormigón no debe presentar segregación de sus materiales componentes, y si lo hubiera se procede a su remezclado a pala hasta hacerla desaparecer.

Cuando el hormigón es elaborado fuera de la obra, durante su descarga será debidamente guiado para evitar su segregación y facilitar su distribución uniforme sobre la subrasante.

**FIGURA N° 10, Losa de Pavimento Rígido, Partes.**



**Fuente:** <http://esdocs.org/docs/index-37487.html?page=6>

El hormigón se coloca de manera que requiera el mínimo de manipuleo y su colocación se llevará a cabo avanzando en la dirección del eje de la calzada y en una única capa.

El hormigón se colocará firmemente contra los moldes, de manera que se logre un contacto total con los mismos, compactándolo adecuadamente, mediante el vibrado portátil de inmersión.

No es permitido el uso de rastrillos en la distribución del hormigón y la adición del material, en los sitios en que hiciera falta, sólo se hará mediante el uso de palas.

El hormigón debe presentar la consistencia requerida de acuerdo con el tipo de compactación, quedando **absolutamente prohibida** la adición de agua al mismo.

Toda mezcla que presenta signos evidentes de fragüe debe ser desechada y no se permitirá su ablandamiento mediante la adición de agua y cemento.

El hormigón para pavimento rígido estar libre de sustancias extrañas, especialmente de suelo. A este fin, los operarios que intervengan en el manipuleo del hormigón y sus operaciones posteriores, llevarán calzado adecuado que permanecerá limpio, libre de tierra u otras sustancias y que pueda ser limpiado en los casos que arrastren tales elementos.

Inmediatamente después de colocado el hormigón éste debe ser distribuido, enrasado, y consolidado. Para ello se emplearán los métodos mecánicos especificados.

Una vez compactado el hormigón, se procederá a la terminación del mismo, dando a la superficie del firme, características de lisura y textura tales que al mismo tiempo que faciliten el rodamiento la hagan antideslizante, y ajustada, en todos los casos, a los perfiles del proyecto, que correspondan en cada progresiva de la rasante en cierta obra.

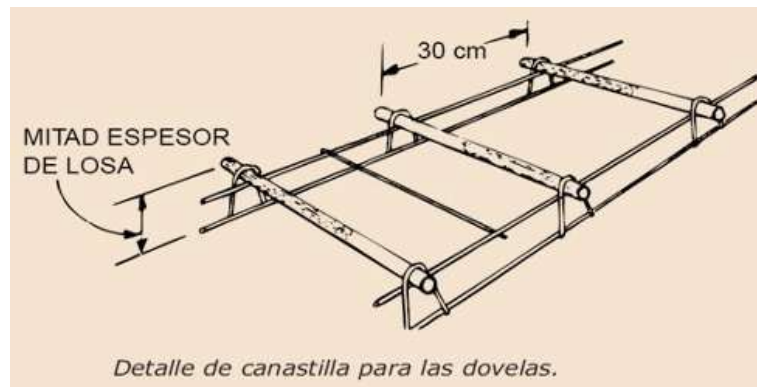
Una losa de concreto hidráulico está hecha de cemento Portland, esta capa protege a las capas inferiores de los efectos del sol, las lluvias y las heladas, además resiste con un desgaste mínimo los esfuerzos producidos por el tránsito.

### 2.3.4 DOVELAS

#### 2.3.4.1 Dovelas en losas.

Las losas que van a ser utilizadas para tránsito de vehículos muy pesados, pueden ser diseñadas con dispositivos de transferencia de carga llamadas dovelas o pasajuntas. Éstas son varillas lisas, colocadas al centro de la losa, las cuales deben ser engrasadas para evitar la adherencia con el concreto y estar cuidadosamente alineadas y apoyadas durante la operación del colado (paralelo entre sí y a la superficie y perpendicular a la junta).

**FIGURA N° 11,** Detalle de Canastilla para Dovelas.



**Fuente:** ACI 360R-10 diseño de losas sobre terrenos.

La mala alineación de las dovelas causa grietas. De no garantizarse que van a ser instaladas correctamente, con su correspondiente canastilla para el soporte y alineamiento, es mejor no utilizarlas.

Las Dovelas se diseñan para transferir carga de una losa a la siguiente, Deben permitir que la junta se abra o se cierre, pero sosteniendo los extremos de la losa a la misma elevación, su empleo reduce los riesgos de escalonamiento y de bombeo.

Diseño de Armadura Transversal.- Esta armadura se coloca tanto en pavimentos con juntas o en pavimentos continuos. Se la coloca en zonas donde son de esperar fisuras longitudinales que se mantienen cerradas permitiendo una buena transferencia de cargas minimizando la entrada de agua.

Las dovelas o pasajuntas reducen las deflexiones y los esfuerzos en las losas de concreto, así como el potencial de diferencias de elevación en las juntas, bombeo (expulsión de finos a través de las juntas) y rupturas en las esquinas. Por lo que toda esta reducción de deflexiones y esfuerzos en las losas al transmitir efectivamente la carga a lo largo de las juntas se traduce en un incremento en la vida de servicio del pavimento.

\*Recomendaciones en el diseño de pasajuntas:

El diámetro más usado de pasajuntas es de 25 mm (según AASHTO se calcula en  $1/8$  del espesor de la losa) y con una longitud típica de 45 cm, con espaciamiento típico de 30 cm.

**FOTO N° 1,** Forma de Disposición de Barras Pasajuntas sobre Canastillo de Acero



**Fuente:** *recomendaciones constructivas pavimento rígido, IBCH.*



- El canastillo sirve para sostener las barras durante el transporte, la manipulación y principalmente durante el colocado del hormigón.
- Una parte está soldada (la de la izquierda en la fotografía) y la otra simplemente amarrada con alambre (lado derecho).
- Para evitar que la barra se salga del soporte por el lado amarrado, se le da mayor holgura al borde (sobrante).
- Se debe procurar un ajuste lo más cabal posible entre la barra y la “U” invertida y la armadura horizontal de soporte.

Para el recubrimiento de pasajuntas se debe colocar dos capas de pintura anticorrosiva epoxica. Cuando se utiliza el insertador automático de barras (DBI) es necesaria la colocación de una mano de pintura parafínica para evitar la adherencia entre la barra pasajunta y el hormigón

- En este último caso ya no puede usarse aceite sucio o grasa
- Cuando éstas van dispuestas sobre canastillos el antiadherente puede ser aceite sucio o una película fina de grasa.

**FOTO N° 2,** Desalineamiento en Colocado de Barras Pasajuntas con Canastillos Deficientes.



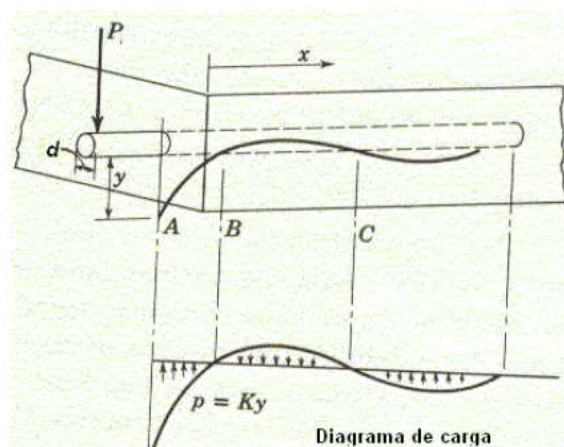
**Fuente:** *recomendaciones constructivas pavimento rígido, IBCH.*

- Barras desalineadas tanto en el sentido vertical como el horizontal pueden incidir en la aparición de fisuras transversales.
- En realidad la barra pasajunta al estar desalineada crea un amarre en la junta transversal, creándose en la fisura el nuevo lugar de trabajo por el efecto de contracción y dilatación.
- Se observa además que la barra más extrema está muy pegada al borde de la losa.
- Debería haber una separación mínima de por lo menos 15 cm.

Estos dispositivos se hacen de dos maneras, según el fin que con ello se persiga.

- a) Si su objeto es el de mantener con ello unidas las losas, soportaran nada más cargas axiales. En este caso el esfuerzo máximo de tensión a que las barras pasadores pueden estar sometidas será igual al esfuerzo necesario para la fricción entre el pavimento y la subrasante o la sub base, en la distancia comprendida entre una junta y el bordo libre, del pavimento en el caso de que los pasadores se coloquen en las juntas longitudinales; si los pasadores se colocan en las juntas transversales, la distancia a considerar será entonces aquella que separa a dichas juntas dividida entre dos.

**FIGURA N° 12,** Presión Ejercida sobre una Varilla Cargada.



**Fuente:** *esfuerzos en pavimentos rígidos* Ing. Fernando Sanchez Sabogal

- b) Si el objeto de las pasa-juntas es el de transmitir cargas de una losa a otra, permitiendo que las juntas puedan abrir y cerrar, pero manteniendo a las losas a la misma altura, ellas deben formarse con varillas lisas redondas en las que en un extremo de cada varilla debe estar engrasado o pintado para evitar su adherencia al concreto.

Cuando se usan, canastillos para barras pasa-juntas. Estos deben ser revisados antes del colocado del hormigón para asegurar que las barras estén alineadas de una forma apropiada (horizontal y verticalmente) Se recomienda que el canastillo esté asegurado con clavos de acero introducidos apropiadamente en la base, un mínimo de 4 clavos por canastillo es recomendado.

Las barras deben ser revestidas con una capa delgada de grasa u otra sustancia en toda su longitud para prevenir fricción entre barra y hormigón. La práctica tradicional de poner grasa sólo en la mitad de la barra frecuentemente ha dado problemas, causado por la insuficiente cantidad de grasa La barra debe estar libre para deslizarse en el hormigón para que las losas se muevan independientemente Se debe usar un revestimiento delgado, ya que uno más grueso puede resultar en vacíos en el hormigón alrededor de las barras El colocado de barras debe ser cuidadosamente verificado después que se inicia el pavimentado. Las barras deben ser paralelas a la base, paralelas al eje y paralelas entre sí.

#### **2.3.4.2 Norma para Valores externos en el diseño de dovelas**

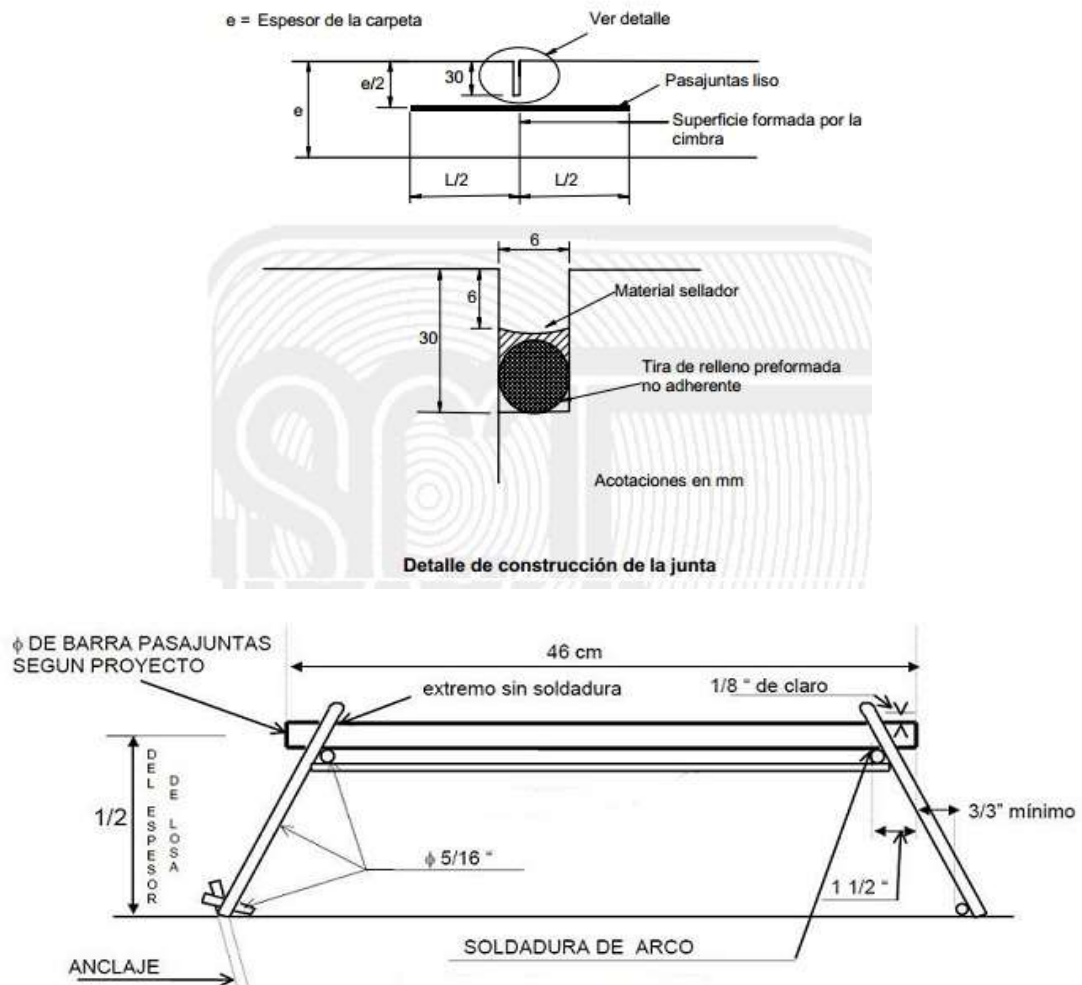
Son armazones prefabricados que se utilizan para sostener y alinear las dovelas o pasadores de transferencia de carga en las juntas de los pisos y pavimentos de concreto, manteniendo la alineación vertical entre las losas de concreto adyacentes.

Las canastillas pasajuntas se fabrican de acuerdo a las especificaciones de diseño y tomando en cuenta el tamaño, diámetro y espaciamiento de la pasajunta el peralte del pavimento de concreto.

**FIGURA N° 13,** armazones, dovelas, detalles y armado.



La norma STC de pavimentos N-CTR-CAR-1-04-009/00 contiene los aspectos a considerar para la construcción de pavimentos hidráulicos.



**Fuente:** *diseño de dovelas*; edición reciente de *diseño de juntas*, la PCA (1991)

## DISEÑO

- El diseño de pasajuntas se basa mucho en la experiencia, aunque algunos métodos teóricos sobre el diseño de pasajuntas están disponibles.
- El tamaño de las pasajuntas depende del espesor de la losa.
- El diámetro y longitud de las pasajuntas para diferentes espesores de losa como lo recomienda la PCA (1975).

**Tabla N° 1**, Medidas de dovelas, varillas para diferentes espesores de losas.

ESPESOR DE LOSA		BARRAS PASAJUNTAS					
		DIAMETRO		LONGITUD		SEPARACION	
cm.	Pulg.	mm.	Pulg.	cm.	Pulg.	cm.	Pulg.
13 a 15	5 a 6	19	3/4	41	16	30	12
15 a 20	6 a 8	25	1	46	18	30	12
20 a 30	8 a 12	32	1 1/4	46	18	30	12
30 a 43	12 a 17	38	1 1/2	51	20	38	15
43 a 50	17 a 20	45	1 3/4	56	22	46	18

TABLA DE MEDIDAS DE VARILLAS PASAJUNTAS PARA DIFERENTES ESPESORES DE LOSAS  
Según recomendaciones de la PCA (Portland Cement Association).

**Fuente**, según recomendaciones de la PCA (Portland Cement Association).

- En una edición reciente de diseño de juntas, la PCA (1991) recomienda:
    - El uso de pasajuntas de 1.25 pulgadas de diámetro para pavimentos de autopistas con espesores menores a 10 pulgadas.
    - Pasajuntas de diámetro de 1.5 pulg para pavimentos con espesores mayores a 10 pulg.
- Se necesitan pasajuntas con un diámetro mínimo de 1.25 a 1.5 pulgadas para controlar fallas mediante la reducción del esfuerzo de carga en el concreto.

## ESFUERZO DE CARGA PERMISIBLE

- El esfuerzo y la deflexión en la junta son mucho más pequeños cuando las cargas son soportadas por dos losas que cuando es por una sola.

- El uso de pasajuntas puede minimizar las fallas de bombeo y de diferencia de elevación de juntas, las cuales han sido considerados por la PCA como factores importantes en el diseño de espesor.

Debido a que el concreto es más débil que el acero, el tamaño y separación que se requiere de pasajuntas, se controla por el esfuerzo de carga entre el concreto y la pasajunta. El esfuerzo de carga permitido se determina de la siguiente manera:

**FORMULA N° 1**, Ecuación esfuerzo permisible de carga (psi).

$$f_b = \frac{(4-d)}{3} I f'_c$$

Dónde

$f_b$  = Esfuerzo permisible de carga (psi)

$d$  = Diámetro de las pasajuntas en pulgadas

$f'_c$  = Resistencia a la compresión del concreto.

### ESFUERZO DE CARGA EN LAS DOVELAS

- Si la carga que se aplica en la dovela se conoce, el esfuerzo máximo de carga se puede determinar teóricamente asumiendo que las dovelas sea una viga y que el concreto sea una cimentación Winkler. Basado en la solución original de Timoshenko, Friberg (1940) indica que la máxima deformación del concreto debajo de la dovela se puede expresar de la siguiente manera:
- La máxima deformación del concreto debajo de la pasajunta se puede expresar de la siguiente manera:

**FORMULA N° 2**, Deformación de la dovela en la cara de la junta.

$$y_0 = \frac{P_1 (2 + \beta z)}{4 \beta^3 E^d I^d}$$

Dónde:

$y_0$  = Deformación de la pasajunta en la cara de la junta

$P_1$  = Carga sobre la pasajunta,

$Z$  = Ancho de la junta

$E^d$  = Módulo de Young de la pasajunta

$I^d$  = Momento de inercia de la pasajunta

$B$  = Rigidez relativa de un pasajunta embebida en el concreto.

**FORMULA N° 3, Módulo de soporte de la dovela.**

Nótese que

$$I^d = 1/64 \pi d^4$$

$$B = \sqrt[4]{\frac{Kd}{4 E_d I_d}}$$

Dónde:  
 K= Módulo de soporte de la pasajunta, el cual varía de 300,000 a 1,500,000 pci  
 d= es el diámetro de la pasajunta.

El esfuerzo de carga  $\sigma_b$  es proporcional a la deformación:

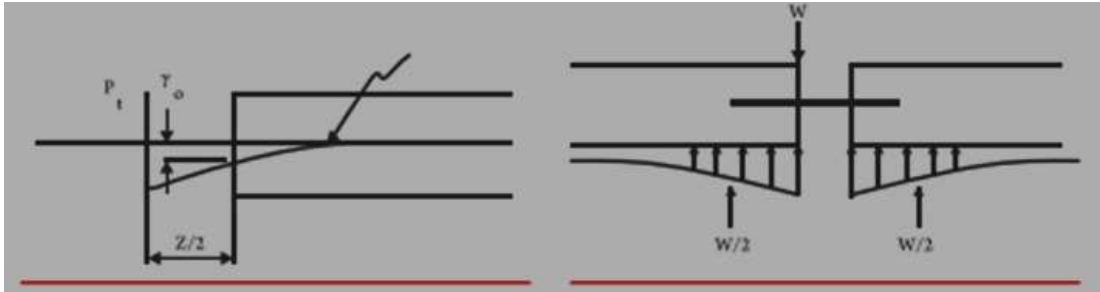
$$\frac{\sigma_b = k y_o = KP_t (2 + \beta z)}{4 \beta^3 E^d I^d}$$

El esfuerzo de carga se debe comparar con el esfuerzo de carga permisible. Si el esfuerzo de carga es mayor al permisible, entonces se deben de usar dovelas más grandes o separaciones más pequeñas. Estudios recientes han demostrado que el esfuerzo de carga se relaciona a la falla de la losa. Si se limita el esfuerzo de carga, el grado de la falla se puede reducir a un límite permisible.

Cuando una carga W se aplica en una losa cerca de la junta como se muestra en la figura 2.6.3 parte de la carga se transfiere a la losa adyacente a través de las dovelas. Si la eficiencia de las dovelas es del 100%, ambas losas se deflexionan la misma cantidad y las fuerzas debajo de las losas serán las mismas. Cada una siendo de 0.5w, la cual es también el total de la fuerza cortante que se transfiere mediante las dovelas. Si la eficiencia de las dovelas es menor de 100%, como en el caso para pavimentos viejos donde algunas dovelas se desprenden, las fuerzas que reaccionan bajo la losa serán menores a 0.5W. Como resultado, el total del esfuerzo cortante sobre las dovelas

es menor a  $0.5W$ . Por lo tanto, el uso de  $0.5W$  para el diseño de dovelas es más conservativo.

**FIGURA N° 14**, deformación de dovela y transferencia de carga de dovela.



Deformación de la dovela debido a una carga      Transferencia de carga de las dovelas

**Fuente:** *diseño de dovelas*; Basado en la solución de Westergard, Frierberg

Basado en la solución de Westergard, Frierberg (1940) encontró que el momento máximo negativo, tanto para cargas internas o externas ocurre a una distancia de  $1.8L$  desde la carga donde  $L$  es el radio de rigidez relativa. Cuando el momento es máximo, la fuerza cortante es igual a cero. Por lo tanto, es razonable asumir que el cortante en cada dovela se reduce inversamente con la distancia de la dovela desde el punto de carga, siendo el máximo para la Dovelita debajo o cerca al punto de la carga y cero a una distancia de  $1.8L$ .



En las siguientes tablas se presentan resúmenes de las especificaciones para la colocación de juntas y dovelas.

**Tabla N° 2,** Resumen de especificaciones para la colocación de juntas.

Espesor de losa (cm)	1	2	3	4
	Espaciamiento entre juntas (cm)	Profundidad de corte de juntas (cm)	Profundidad del material de sellado (cm)	Ancho del corte para la junta (cm)
15	360	5.00	1.00	0.50
16	384	5.33	1.07	0.53
17	408	5.67	1.13	0.57
18	432	6.00	1.20	0.60
19	456	6.33	1.27	0.63
20	480	6.67	1.33	0.67
21	504	7.00	1.40	0.70
22	528	7.33	1.47	0.73
23	552	7.67	1.53	0.77
24	576	8.00	1.60	0.80
25	600	8.33	1.67	0.83
26	624	8.67	1.73	0.87
27	648	9.00	1.80	0.90
28	672	9.33	1.87	0.93
29	696	9.67	1.93	0.97
30	720	10.00	2.00	1.00
31	744	10.33	2.07	1.03
32	768	10.67	2.13	1.07
33	792	11.00	2.20	1.10
34	816	11.33	2.27	1.13
35	840	11.67	2.33	1.17

Columna 1: El espaciamiento entre juntas, es 24 veces el espesor de la losa, en centímetros

Columna 2: La profundidad del corte de la junta, es 1/3 del espesor de la losa, en centímetros.

Columna 3: La profundidad del material de sellado, es 1/5 de la profundidad de la junta, en centímetros

Columna 4: Al ancho del corte de la junta es 1/10 de la profundidad de la junta, en centímetros

**Fuente,** manual centroamericano para diseño de pavimentos.

**Tabla N° 3,** Resumen de especificaciones para la colocación de dovelas.

Resumen de especificaciones para colocación de dovelas					
Espesor de losa (cm)	1	2	3	4	5
	Diámetro de Dovelas cm (plg)	Largo de Dovelas (cm)	Diámetro comercial de dovela (plg)	Profundidad de dovelas (cm)	Separación entre dovelas (cm)
15	1.88 (0.74)	28	3/4	7.50	30.00
16	2.01 (0.79)	29	3/4	8.00	30.00
17	2.13 (0.84)	31	7/8	8.50	30.00
18	2.26 (0.89)	32	7/8	9.00	30.00
19	2.39 (0.94)	34	1	9.50	30.00
20	2.49 (0.98)	35	1	10.00	30.00
21	2.62 (1.03)	37	1	10.50	30.00
22	2.74(1.08)	38	1 1/8	11.00	30.00
23	2.87 (1.13)	40	1 1/8	11.50	30.00
24	3.00 (1.18)	41	1 1/8	12.00	30.00
25	3.12 (1.23)	43	1 1/4	12.50	30.00
26	3.25 (1.28)	44	1 1/4	13.00	30.00
27	3.38 (1.33)	46	1 3/8	13.50	30.00
28	3.51(1.38)	47	1 3/8	14.00	30.00
29	3.63 (1.43)	49	1 3/8	14.50	30.00
30	3.76 (1.48)	50	1 1/2	15.00	30.00
31	3.89 (1.53)	52	1 1/2	15.50	30.00
32	3.99 (1.57)	53	1 1/2	16.00	30.00
33	4.11 (1.62)	55	1 5/8	16.50	30.00
34	4.24 (1.67)	56	1 5/8	17.00	30.00
35	4.37 (1.72)	58	1 3/4	17.50	30.00

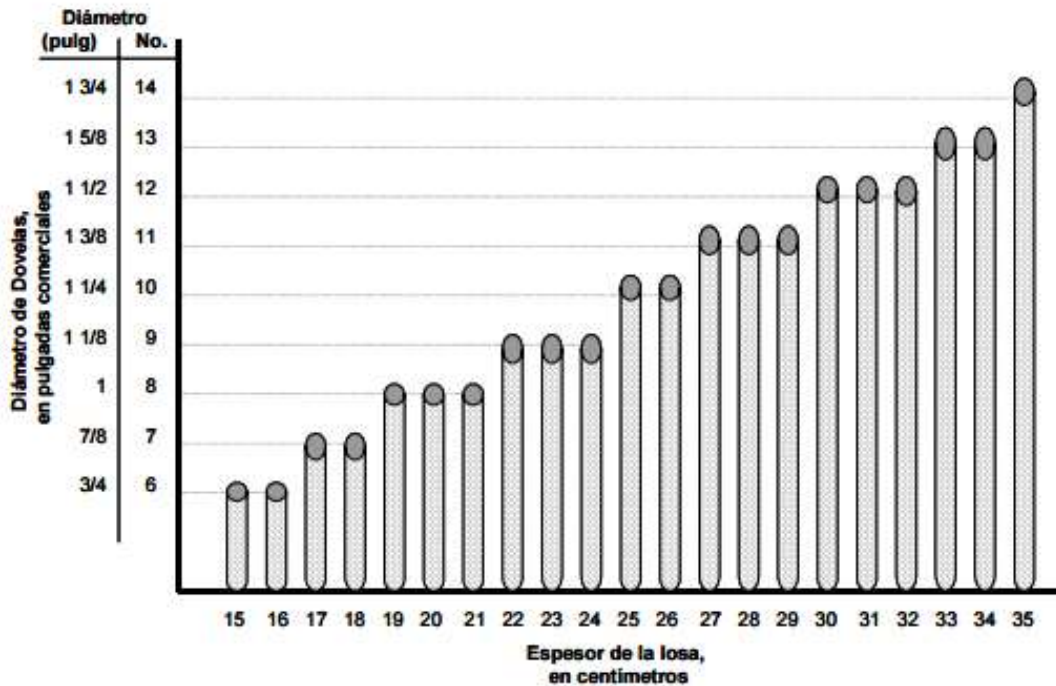
- Columna 1: El diámetro de la dovela , es de 1/8 del espesor de la losa, en pulgadas  
 Columna 2: Largo de dovelas es igual a 12 veces su diámetro más 5 centímetros  
 Columna 3: Diámetro de la dovela convertido a Diámetro comercial, en pulgadas  
 Columna 4: La profundidad de instalación de la dovela es 1/2 del espesor de la losa, en centímetros  
 Columna 5: La separación recomendable entre dovelas, en centímetros

**Fuente,** manual centroamericano para diseño de pavimentos.

En la Tabla Nro.3 se relacionan los datos obtenidos en la Tabla Nro. 4, respecto al diámetro comercial de la dovela (columna 3) con el espesor de la losa.

**Tabla N° 4, Detalle de diámetros comerciales de dovelas, respecto al espesor de losa.**

**Detalle de diámetros comerciales de dovelas, respecto al espesor de losa**



**Fuente,** manual centroamericano para diseño de pavimentos.

### 2.3.4.3 Armadura longitudinal para pavimento con juntas

En un pavimento de hormigón armado con juntas, las armaduras se calculan con la teoría de la fuerza de roce. Los datos de entrada son:

\*Longitud de losa, (L). Es la distancia de separación entre las juntas transversales. El valor numérico de esta longitud afecta el comportamiento de los pavimentos de hormigón armado, en mayor grado mientras mayor sea la longitud.

\*Tensión de trabajo de acero, (fs). La tensión de trabajo recomendada para las barras de acero [fs] es el 75% de la tensión de fluencia, por ejemplo para un acero grado 40, la tensión admisible es de 207 MPa (30000 psi) y para un acero de grado 60 es de 307 MPa (45000 psi).

\*Factor de fricción, (F). Representa la resistencia friccional entre la base inferior de la losa y la superficie superior de la sub base o subrasante (si no tiene sub-base). Esta resistencia se valora a través del factor de fricción “F”, que fue obtenido considerando la teoría de fricción de un cuerpo sobre otro y se utiliza para determinar el porcentaje de acero requerido, mediante la ecuación siguiente:

**FORMULA N° 4**, Ecuación teoría de la fuerza de roce.

$$P_s = \left[ \frac{L \cdot F}{2 \cdot f_s} \right] \cdot 100$$

Donde:

$P_s$  = % de armadura requerida

L = Longitud de losa

F = Factor de fricción

$f_s$  = Tensión de trabajo del acero (psi)

Para unidades métricas la ecuación se transforma en:

**FORMULA N° 5**, Teoría de la fuerza de roce-unidades métricas.

$$P_s = \left[ \frac{\gamma_H \cdot L \cdot F}{2 \cdot f_s} \right] \cdot 100$$

Donde:

$P_s$  = Porcentaje de armadura de acero requerida.

$\gamma_H$  = Peso específico del hormigón  $\approx 22,5 \text{ kN/m}^3$

L = Longitud de losa en metros

$f_s$  = Tensión de trabajo del acero en kPa.

El factor de fricción representa la fuerza requerida, con relación al peso de la losa, para hacer deslizar la losa sobre la sub base. Por ejemplo,  $F = 1,5$  significa que se requiere una fuerza de 1,5 veces de peso de la losa, para deslizar la misma sobre la sub base.

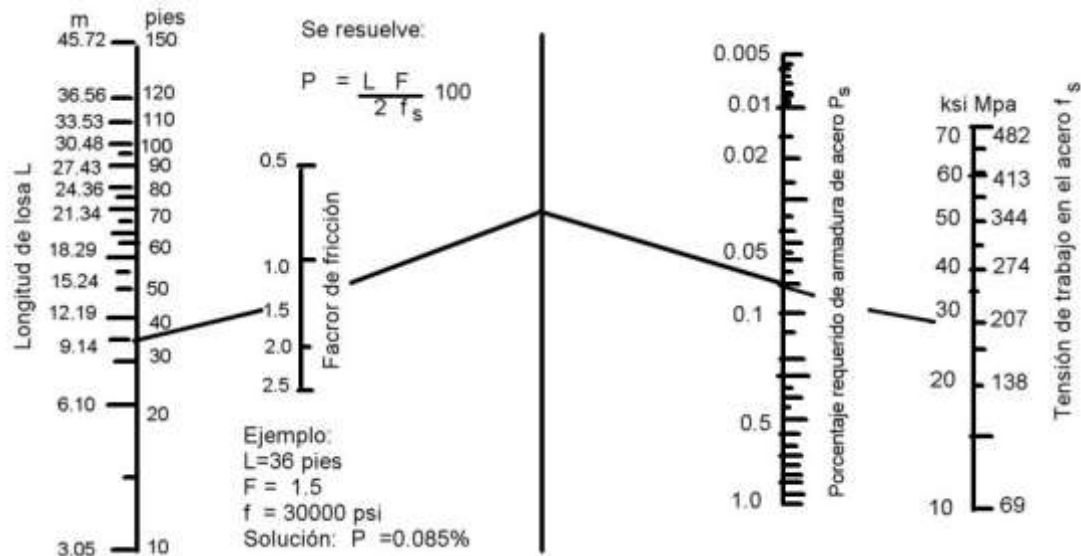
En la Tabla Número 1 se indican algunos valores de factor de fricción F.

**Tabla N° 5, Valores del factor de fricción.**

Tipo de Material bajo la Losa	Factor de Fricción "F"
Tratamiento superficial	2,2
Estabilización con cal	1,8
Estabilización con asfalto	1,8
Estabilización con cemento	1,8
Grava de río	1,5
Piedra triturada	1,5
Arenisca	1,2
Subrasante natural	0,9

**Fuente,** diseño de pavimentos aashto 93, IBCH.

En la Figura 15, se presenta un ábaco aunque la fórmula es muy sencilla. Sirve tanto para el cálculo de armadura longitudinal como para armadura transversal en pavimentos de hormigón armado con juntas y también para el cálculo de la armadura transversal en pavimentos de hormigón armado continuos. Este criterio no tiene en cuenta el efecto de deflexiones repetidas debidas a tránsito pesado, un factor que debe ser considerado en el diseño de armaduras. Otros modelos indican cuantías superiores de armadura.

**FIGURA N° 15, Ábaco de Diseño para Pavimento de Hormigón Armado con Juntas.**

**Fuente:** <http://libro-pavimentos.blogspot.com/2012/10/armadura-longitudinal-para-pavimento.html>

### 2.3.5 JUNTAS EN LOSAS

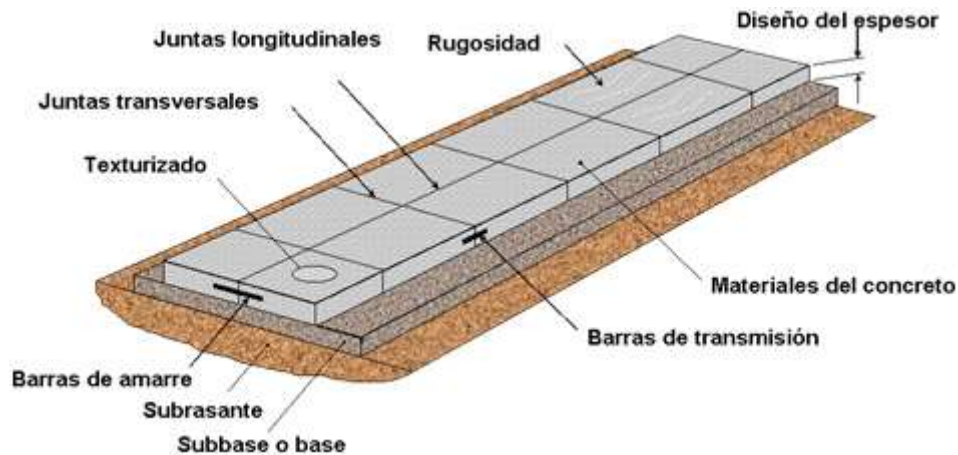
Las juntas permiten la contracción y expansión del pavimento, lo cual libera de tensiones a la losa; son generalmente, puntos débiles de la superficie de rodamiento en los cuales pueden presentarse desperfectos al aumentar el peso de los vehículos; pueden también, desportillarse por el efecto de elementos extraños en las mismas, tales como piedras o cualquier otro elemento desconocido, provocando, además, un aumento en los gastos de conservación.

#### 2.3.5.1 Juntas longitudinales

Son aquellas que van paralelas al eje central de la vía, controlan la fisuración y en algunos casos delimitan las líneas de tráfico. Cuando se realiza el vaciado en una sola pasada de dos o más carriles, la transferencia de carga generalmente se produce por la trabazón mecánica de los agregados que se origina en la junta después del corte, sin embargo, se recomienda además el colocados de barras corrugadas.

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

**FIGURA N° 16, Detalle de Juntas Longitudinales.**



**Fuente:** <http://eadic.com/blog/pavimentos-hormigon/>

## Tipos de Juntas

Básicamente existen tres tipos de juntas:

**2.3.5.2 Juntas de contracción (transversales).**- Son las que se construyen para controlar las fisuras por liberación de tensiones debidas a temperatura, humedad y fricción. Construidas transversalmente al eje central de la vía y espaciadas para controlar la fisuración transversal de la losa. Se han realizado estudios que han demostrado que el espesor del pavimento, rigidez de la base y el clima afectan la máxima separación esperada entre juntas transversales. Otras investigaciones que indican también que hay una relación general entre la longitud de la losa (L) con el radio de rigidez relativa ( $\rho$ ) y la fisuración transversal. El radio de rigidez relativa es un término definido por Westergaard que cuantifica la relación entre la rigidez de la fundación y la rigidez de la losa. El radio de rigidez relativa tiene una dimensión lineal y es determinado por la siguiente ecuación:

**FORMULA N° 6, Radio de rigidez relativa por Westergaard.**

$$\rho = \left[ \frac{Eh^3}{12k(1-\mu^2)} \right]^{0.26}$$

Donde:

$\rho$  = radio de rigidez relativa (pulgadas)

E = módulo de elasticidad del hormigón (psi)

h = espesor del pavimento (pulgadas)

$\mu$  = relación de Poisson del pavimento

k = módulo de reacción de la subrasante (pci)

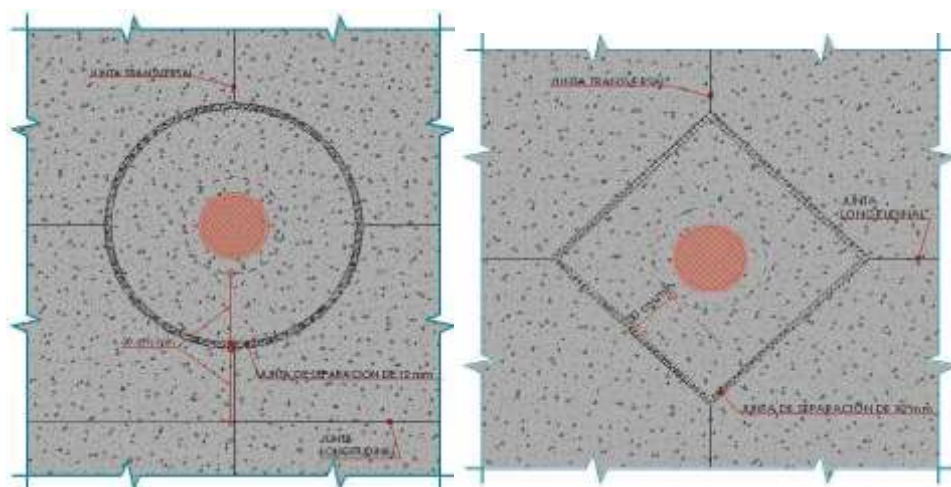
Datos de estas investigaciones indican que hay un incremento en la fisuración transversal cuando el radio  $L/\rho$  excede 5.0. Usando el criterio de que el máximo radio  $L/\rho$  es de 5.0, el espacio de juntas disponible se incrementaría con el espesor de la losa, pero disminuiría con el incremento de las condiciones de soporte de la fundación.

El intervalo de juntas se diseña para evitar fisuras transversales intermedias. Usualmente, el espacio entre juntas no debe ser mayor a 24 veces el espesor de la losa. Es importante también mantener las losas lo más cuadradas posibles. El espaciamiento entre juntas transversales tampoco debe exceder en 1.25 al ancho de la losa. Cuando se diseñan barras pasa-juntas, AASHTO recomienda usar barras de diámetro igual o mayor a 1/8 del espesor de la losa. La longitud de estas barras varía entre 40 a 45 cm.

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

**2.3.5.3 Juntas de expansión (separación).**- Son las que permiten el movimiento de las losas del pavimento sin dañar pavimentos adyacentes, intersección de calles, estructuras de drenaje, puentes, alcantarillas y otras estructuras fijas.

**FIGURA N°17, Aislamiento y Protección de una Cámara de Inspección con una Junta de Separación.**



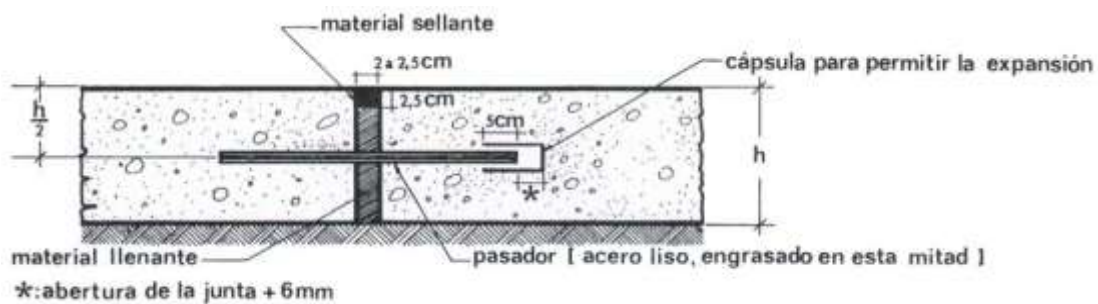
**Fuente, lineamientos generales para el diseño geométrico de juntas, IBCH.**



Existen dos tipos de juntas de expansión, dependiendo su necesidad de empleo. Estas son descritas como se describe a continuación:

El primer tipo es la junta con barras lisas para transferencia de cargas, cada una de las cuales está provista en uno de sus extremos de un capuchón, que permite que las barras se muevan libremente por expansión y contracción, tal como se muestra en la figura 18. Debido a que estas juntas tienen una separación de 2 cm o más, requieren la presencia de un material de relleno preformado, constituido por un material flexible, no extraíble y no absorbente, cubriendo todo el ancho y espesor de la losa, por debajo de 2.5 cm debajo de la superficie, finalmente se colocará el sello que deberá ser compatible con el relleno preformado.

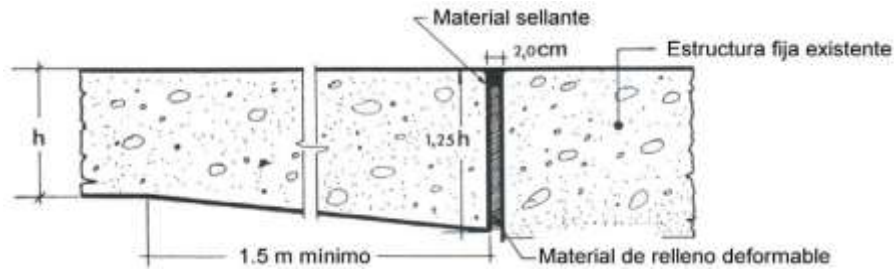
**FIGURA N° 18, Junta de Expansión Tipo 1.**



**Fuente,** *lineamientos generales para el diseño geométrico de juntas, IBCH.*

El otro tipo de junta de expansión es aquella que no tiene dispositivos de transferencia de cargas, el espesor de la losa se incrementa gradualmente en un 25 % en el último metro y medio, para reducir los esfuerzos en la junta como se muestra en la figura 19. En lo que respecta al sello, se siguen las mismas recomendaciones descritas para el primer tipo de junta de expansión. Generalmente este tipo de juntas se construye cuando se tiene una estructura fija rígida tal como un puente en el que no se ha previsto el colocado de barras pasa-juntas con anterioridad.

**FIGURA N° 19, Junta de Expansión Tipo 2**



**Fuente,** *lineamientos generales para el diseño geométrico de juntas, IBCH.*

#### **2.3.5.4 Juntas de construcción (transversales)**

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

Estas juntas, al igual que las transversales de contracción, requieren pasa-juntas lisas para proporcionar la transferencia de carga necesaria, siguiendo todas las recomendaciones ya mencionadas. Sólo en el caso de que la junta se localice en el tercio central de la losa y ya existan losas adyacentes se deberán colocar barras de acero corrugado, para evitar que esta junta se refleje en las losas adyacentes. Se recomienda que estas barras sean del mismo diámetro de las barras lisas.

**FOTO N° 3, Junta de Construcción en Pavimento Rígido.**



**Fuente,** *lineamientos generales para el diseño geométrico de juntas, IBCH.*

### **2.3.5.5 Otros lineamientos para el diseño de juntas:**

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

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

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

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

***Bases estabilizadas.*** Han sido también usadas para aumentar la transferencia de carga.

### **2.3.5.6 Consideraciones para el diseño de juntas.**

La necesidad del sistema de juntas es el resultado del deseo de controlar el agrietamiento transversal y longitudinal. Este agrietamiento se presenta por la combinación de varios efectos, entre los que podemos mencionar la contracción por secado del concreto, los cambios de humedad y de temperatura, la aplicación de las

cargas del tráfico, las restricciones de la subrasante o terreno de apoyo y también por ciertas características de los materiales empleados.

En orden para diseñar un adecuado sistema de juntas se recomienda evaluar las siguientes recomendaciones:

Consideraciones Ambientales: Los cambios en la temperatura y en la humedad inducen movimientos de la losa, resultando en concentraciones de esfuerzos y en alabeos.

Espesor de losa: El espesor del pavimento afecta los esfuerzos de alabeo y las deflexiones para la transferencia de carga.

Transferencia de carga: La transferencia de carga es necesaria a lo largo de cualquier junta del pavimento, sin embargo la cantidad requerida de transferencia de carga varía para cada tipo de junta. Cuando se empleen barras de amarre o Pasa-juntas, el tipo y el tamaño de las barras influyen en el diseño de juntas.

#### ➤ **Tráfico**

Tráfico. Es un factor extremadamente importante para el diseño de juntas. Su clasificación, canalización y la predominancia de cargas en el borde influyen en los requerimientos de transferencia de carga para el comportamiento a largo plazo.

Características del concreto: Los componentes de los materiales afectan la resistencia del concreto y los requerimientos de juntas. Los materiales seleccionados para el concreto determinan las contracciones de la losa, por ejemplo del agregado grueso influye en el coeficiente térmico del concreto, en adición a esto los agregados finos tienen una influencia perjudicial en el comportamiento de las juntas. En muchas ocasiones el desportillamiento es resultado de concentraciones de materiales malos a lo largo de las juntas.

Características del sellador: El espaciamiento de las juntas influye en la selección del tipo de sellador. Otras consideraciones, tales como adecuados factores de forma y costos ciclos de vida también afectan la selección del sellador.

Apoyo lateral: El tipo de acotamiento (de concreto y amarrado, de asfalto, de material granular) afecta el soporte de la orilla del pavimento y la habilidad de las juntas centrales para realizar la transferencia de carga.

➤ **Agrietamiento.**

Un adecuado sistema de juntas está basado en controlar el agrietamiento que ocurre de manera natural en el pavimento de concreto y las juntas son colocadas en el pavimento precisamente para controlar su ubicación y su geometría.

➤ **Contracción.**

La mayor parte de la contracción anticipada del concreto ocurre a muy temprana edad en la vida del pavimento provocado principalmente por cambios de temperatura.

➤ **Temperatura.**

El calor de hidratación y temperatura del pavimento normalmente alcanza su valor máximo muy poco tiempo después de su colocación y una vez alcanzado su valor máximo, la temperatura del concreto baja debido a la reducción de la actividad de hidratación y también debido al efecto de la baja temperatura ambiente durante la primera noche del pavimento.

#### **2.3.5.7 Sellado de juntas.**

El sellado de juntas se usa para minimizar la infiltración del agua superficial y de materiales incompresibles al interior de la junta del pavimento y por ende al interior del pavimento y de su estructura.

Otra de las características que deben satisfacer las juntas selladas es la capacidad de resistir las repeticiones de contracción y expansión, al contraer y expandirse el pavimento debido a los cambios de temperatura y humedad.

El propósito del sello de juntas es detener la entrada de agua y de los materiales incompresibles dentro de la junta. Es imposible mantener una junta aislada del agua. Sin embargo, el sello debe ser capaz de minimizar la cantidad de agua que entra por la junta, con lo cual se reducirán las fisuras causadas por la humedad.

#### **2.3.5.8 Material sellante**

El tipo de sello tiene una gran influencia en el desempeño de la junta. Sellos de silicona o materiales preformados, son los más recomendados. Aunque estos son más caros,

proveen el mejor desempeño y una mayor vida útil. En todo caso, se deben seguir las recomendaciones proporcionadas por el fabricante del producto.

Cuando se usan senadores de silicona, el mínimo factor de forma (relación entre la profundidad y el ancho) es de 1:2. Para mejores resultados, el mínimo ancho del sello debe ser 6mm. Es necesario el uso de una tira de respaldo para proveer un adecuado factor de forma y prevenir que el sello penetre hasta la parte inferior del reservorio.

Cuando se usan sellos preformados, la junta debe ser diseñada de tal forma que el sello este entre un 20 a 50 % comprimido todo el tiempo.

#### **2.3.5.9 Problemas frecuentes en juntas de dilatación**

El problema que puede presentarse con la infiltración de agua al interior del pavimento es el efecto conocido como “bombeo”. El bombeo es la expulsión de material por agua a través de las juntas. Mientras el agua es expulsada, se lleva partículas de grava, arena, arcilla, resultando una progresiva pérdida de apoyo del pavimento.

Los materiales contaminantes incompresibles causan presiones de apoyo puntuales, que pueden llevar a desportillamiento y desprendimientos. Además al no permitir la expansión de las losas de concreto se pueden presentar levantamientos de las losas de concreto en la zona de la junta.

Previo al sellado, la abertura de la junta deberá ser limpiada a fondo de compuestos de curado, residuos, natas y cualquier otro material ajeno. La limpieza de las caras de la junta afecta directamente la adherencia del sellante al concreto. Una limpieza pobre reduce la adherencia del sellador a la interface con la junta, lo que reduce significativamente la efectividad del sellador. Por lo tanto, la correcta limpieza es esencial para obtener una superficie de junta que no perjudicará el lazo o adhesión con el sellador.

Para el sellado de las juntas se debe utilizar sellante líquido con base en Silicona; se colocará un cordón de respaldo para evitar que el sellante en el momento de su colocación fluya hacia el fondo con el fin de optimizar la cantidad de sellante empleado.

## 2.4 FENÓMENO DE ALABEO TÉRMICO

Los principales problemas que se presentan en proyectos de pavimentos rígidos se deben al efecto de la contracción por secado de la superficie de las losas. Este cambio volumétrico del hormigón produce un alabeo cóncavo permanente de las losas que origina la pérdida de soporte en las esquinas y bordes. En general se producen mayores magnitudes de alabeo en tramos construidos en las zonas con climas más secos (altiplano, con elevaciones mayores a los 2500 m.s.n.m.), no se elimina este fenómeno en climas más cálidos y secos, pero se dan menores deformaciones en tramos del oriente de Bolivia (zonas con elevaciones menores a los 500 ms.n.m.).

Al perder el apoyo en las esquinas y bordes, las tensiones se concentran en la cara superior de las losas, y se produce fisuración por fatiga que inicia de arriba hacia abajo. Este tipo de falla es totalmente distinto al considerado por los métodos de diseño AASHTO 93, PCA, ecuaciones de Westergaard, o el software HDM-4, todos los cuales suponen que el principal tipo de falla será la fisuración transversal iniciada en la cara inferior de las losas.

Al efecto de los bajos índices de humedad se suman los elevados diferenciales de temperatura que se generan en zonas con elevaciones importantes sobre el nivel del mar. Existen mediciones de gradientes térmicos en varias zonas de Bolivia, y se verifica que las mayores amplitudes diarias se presentan en zonas altas (mayores a 2500 m.s.n.m.) comparadas a las regiones orientales que no pasan los 500 m.s.n.m.

Al momento el único método que considera el alabeo permanente es el MEPDG, en la forma matemática de un diferencial de temperatura equivalente que produzca la misma deflexión en una placa. Sin embargo, existen algunos cuestionamientos importantes sobre la calibración de sus funciones de transferencia de fatiga, además del algoritmo para el mecanismo de fisuración de arriba hacia abajo (Top-down cracking). El problema principal para el uso de este programa es que solamente se ofrecen datos climáticos para los EE.UU.

**El fenómeno del alabeo térmico**, al plantearse el problema del alabeo de las losas se refiere a la deformación total permanente que sufren las mismas después del fraguado. El fenómeno del alabeo térmico produce expansiones y contracciones en las fibras del hormigón que varían con cada hora, pero en el caso de las mediciones dadas en Bolivia entre el 2006 al presente, las deflexiones que producen el alabeo térmico eran de menor magnitud a las deformaciones permanentes por secado.

En ningún caso las esquinas de las losas recuperan un total apoyo sobre la capa inferior. Los diferenciales de temperatura equivalentes a las deformaciones medidas varían entre  $-17^{\circ}\text{C}$  a  $-39^{\circ}\text{C}$  en el peor caso, con estas magnitudes de alabeo el efecto térmico solamente reduce la flexión cóncava de las losas, pero nunca logra un alabeo convexo (con esquinas hacia abajo).

Para mediciones de los movimientos de las esquinas de las losas en el altiplano se observaron movimientos verticales máximos diarios de entre 0.8 a 1.2 mm (entre horarios de máximos picos térmicos). Las mismas mediciones se realizaron en un clima cálido (oriente), obteniéndose variaciones de 1.0 mm entre picos, sin embargo las diferencias verticales entre esquinas y centro de las losas causado por la contracción de la superficie llegan a ser mayores a los 3 mm (para losas con longitudes mayores a los 4m.).

Si se proyecta un pavimento de hormigón considerando estos efectos ambientales se logrará una capacidad estructural mucho mayor a la de otras soluciones, por lo tanto, se evita una cantidad importante de trabajos de mantenimiento. Estas innovaciones ya se comprueban con varias experiencias (tramos de prueba y proyectos).

La limitación de la relación ancho/largo algunas publicaciones norteamericanas, recomiendan un máximo de 1.25. Estudiosos latinoamericanos mencionan que no deba existir un valor especificado, porque cada proyectista podría analizar los niveles de tensiones en cada diseño y ver el más conveniente para cada tipo de mecanismo de falla (fisuración longitudinal, transversal, de esquina, o incluso escalonamientos de juntas).



La contracción por secado o por fraguado, situación que ocurre en la superficie de las losas de hormigón es un fenómeno que no tiene mucha relación con el fenómeno de alabeo que sucede por el diferencial térmico a que se exponen las losas, se explica con lo siguiente: durante el día las losas están expuestas al efecto térmico del sol y la cara superior se calienta, mientras que la cara que está en contacto con la sub base se mantiene con una temperatura menor, siendo esta circunstancia la responsable de que se produzca el fenómeno de alabeo en las losas... al existir esa diferencia de temperaturas, las caras superiores se expanden mientras que las inferiores se contraen, causando una concavidad hacia abajo. En la noche sucede el efecto contrario, el calor se almacena en la losa y deja caliente la cara interior, mientras que la cara libre se enfría rápidamente por efecto de la baja temperatura nocturna, causando que se produzca una expansión esta vez en la cara inferior y por lo tanto una concavidad hacia arriba. La repetición de este fenómeno puede causar que las losas se fisuren y se agrieten causando fallas que deben ser intervenidas inmediatamente.

Para reducir el efecto de este fenómeno (fisuras por alabeo) se puede reducir el largo de las losas, es decir reducir la relación espesor largo que hablan los métodos de diseño ya que estas fallas son definitivamente estructurales, al contrario de las fisuras por retracción por fraguado que por lo general no son estructurales.

A veces la retracción por fraguado se causa también por el exceso de pasta de cemento en la mezcla, mezclas con alta relación A/C. Es común que este fenómeno no se presente en mezclas de bajo revenimiento cuya superficie se protege cuidadosamente luego del colado mediante la aplicación de curadores químicos o utilizando lonas, arena, etc. Todo lo que ayude a evitar la rápida evaporación del agua superficial.

## **2.5 ARMADURA LONGITUDINAL PARA PAVIMENTOS CONTINUOS**

Para realizar este cálculo se recomienda hacer una planilla como la de la tabla 6 la cual nos presenta los parámetros de entrada y variables para el diseño de la armadura.

**Tabla N° 6**, Planilla de Cálculo de Armadura Longitudinal de pavimentos continuos.

Datos de entrada			
Variables de entrada	Valor	Variables de entrada	Valor
Barra, diámetro $\Phi$		Relación $a_s/a_c$	
Contracción del hormigón Z (pulg/pulg ó cm/cm)		Diferencia de temperatura De diseño $DT_D$ ( $^{\circ}F$ ó $^{\circ}C$ )	
Resistencia a la tracción del Hormigón $f_t$ (psi o MPa)		Tensión transmitida por rueda $s_w$ (psi o MPa)	

**Fuente:** *diseño de pavimentos aashto 93 – dipav 2 IBCH.*

**Tabla N° 7**, Criterio de Diseño y Porcentaje Requerido de Acero.

	Espaciamiento de fisuras (pies)	Ancho de fisura Admisible $W_{m\acute{a}x}$ (pulg)	Tensión admisible en Acero $s_s$ ksi
Valor de criterio Limitante	Máx 8.0 Min 3.5		
Porcentaje mínimo requerido de acero			$P_{m\acute{i}n}$
Porcentaje máximo requerido de acero			$P_{m\acute{a}x}$

**Fuente:** *diseño de pavimentos aashto 93 – dipav 2 IBCH.*

Los datos de entrada son:

- Resistencia a la tracción directa del hormigón  $f_t$ .

Se utiliza la resistencia a la tracción a los 28 días. Para el método AASHTO su valor es igual al 86% del módulo de rotura del hormigón.

- Contracción del hormigón a los 28 días Z

La contracción del hormigón se produce por pérdida de agua, durante el proceso de fraguado, lo que ocasiona la disminución de las dimensiones de la pieza de Hormigón.

Los valores recomendados por AASHTO son los siguientes:

**Tabla N° 8**, Tabla de Contracción del Hormigón.

Resistencia a la tracción indirecta $f'_i$ kPa (psi)	Contracción en mm/mm (pulg/pulg)
2070 (300)	0,0008
2760 (400)	0,0006
3450 (500)	0,00045
4140 (600)	0,0003
4830 (700)	0,0002

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO, 1993.

**Fuente:** *diseño de pavimentos aashto 93 – dipav 2 IBCH.*

- Coeficiente térmico del hormigón  $\alpha_c$ .

El coeficiente de dilatación térmica depende de la relación A/C, de la edad del hormigón, del contenido de cemento, de la humedad relativa y del tipo de agregado.

Los valores recomendados por AASHTO se muestran en la tabla siguiente:

**Tabla N° 9**, Tabla Coeficiente de Dilatación.

Tipo de Agregado Grueso	Coeficiente de Dilatación	
	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$
Cuarzo	11,9	(6,6)
Arenisca	11,7	(6,5)
Grava	10,8	(6,0)
Granito	9,5	(5,3)
Basalto	8,6	(4,8)
Caliza	6,8	(3,8)

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO, 1993.

**Fuente:** *“Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO, 1993.IBCH.*

- Diámetro de armaduras  $d$ .

El diámetro de barras tiene influencia en las tensiones que se producen en el pavimento del hormigón. Los nomogramas de diseño de la AASHTO consideran barras No. 4 a No.7. El diámetro de las barras en pulgadas es igual a su número dividido entre 8.

**Tabla N° 10, Diámetro de Barras para Armadura.**

No. 4	Diámetro	$\frac{4}{8} = 0,5$ pulg.	= 12 mm.
No. 5	Diámetro	$\frac{5}{8} = 0,625$ pulg.	= 16 mm.
No. 6	Diámetro	$\frac{6}{8} = 0,75$ pulg.	= 20 mm.
No. 7	Diámetro	$\frac{7}{8} = 0,875$ pulg.	= 22 mm.

**Fuente:** *diseño de pavimentos aashto 93 – dipav 2 IBCH.*

- Coeficiente térmico del acero  $\alpha_s$

El método recomienda un valor de:

$9 \cdot 10^{-6}$  mm/mm/°C ó  $5 \cdot 10^{-6}$  pulg/pulg/°F

- Diferencia de temperatura de diseño  $DT_D$

Es la diferencia entre la temperatura media de curado del hormigón y la temperatura mínima. Para la temperatura media de curado se toma la temperatura media máxima del mes en que será fabricado el hormigón. La temperatura mínima es la temperatura media mensual mínima de la zona donde se encuentra la obra.

$$DT_D = TH - TL$$

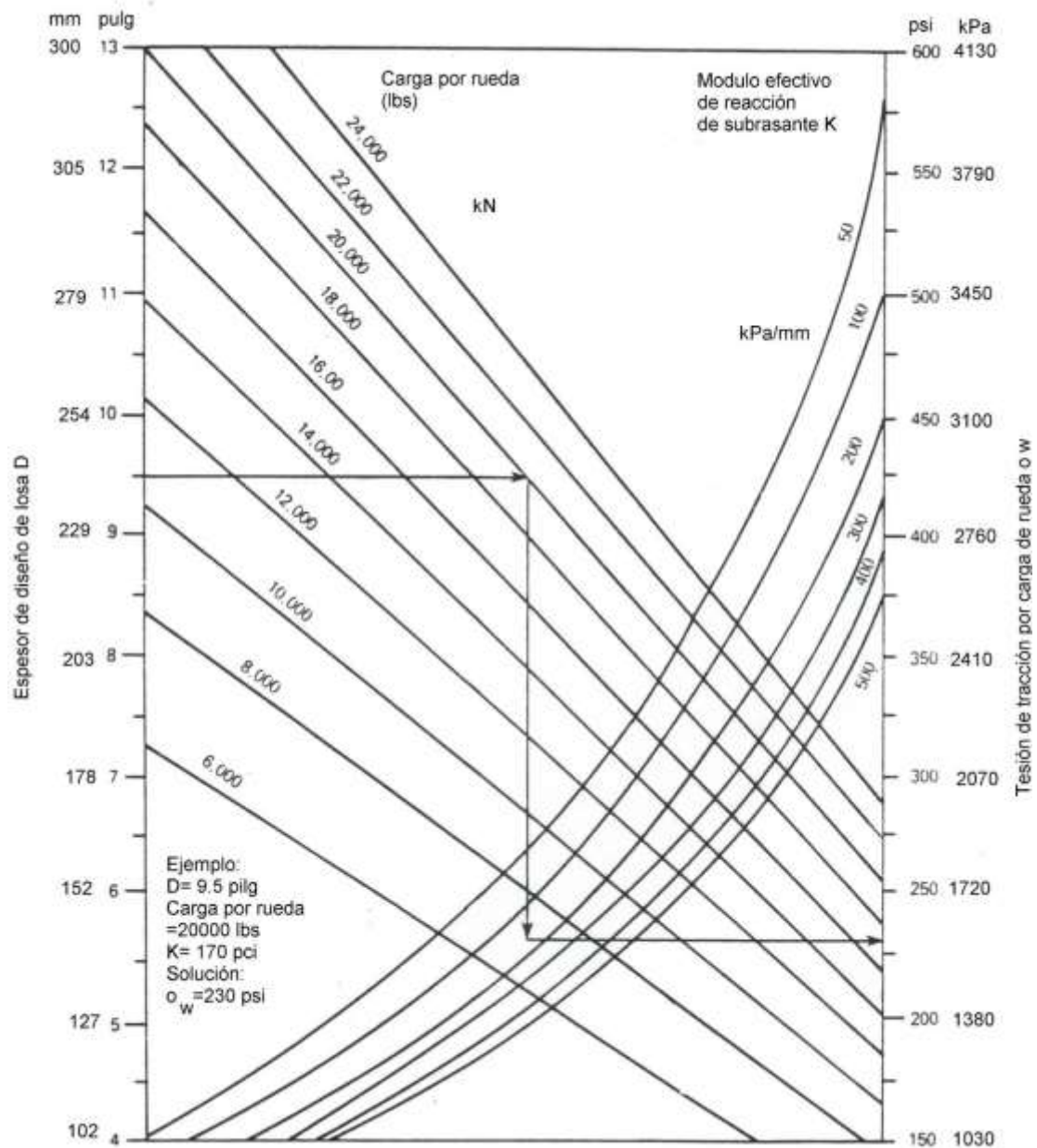
$DT_D$  = Diferencia de temperatura de diseño en °C ó °F.

$TH$  = Temperatura máxima media en el mes de construcción °C ó °F.

$TL$  = Temperatura mínima media en el mes más frío del año en °C ó °F.

- Tensión transmitida por la rueda al pavimento  $\sigma_w$  (psi). Obtenida a partir del ábaco de la Figura 20.

**FIGURA N° 20,** Ábaco para estimar tensiones de tracción debidas a carga de rueda.



**Fuente:** diseño de pavimentos aashto 93 – dipav 2 IBCH.

## 2.6 DISEÑO DE ARMADURA TRANSVERSAL

Esta armadura se coloca tanto en pavimentos con juntas (JRCP) o en pavimentos continuos (CRCP). Se la coloca en zonas donde son de esperar fisuras longitudinales que se mantienen erradas permitiendo una buena transferencia de cargas minimizando la entrada de agua.

De esta manera contrarrestar cambios en el volumen de suelos por humedad y temperatura. Para el cálculo puede usarse el grafico de la Figura 13 donde la longitud de losa es reemplazada por la distancia entre bordes (ancho) longitudinales libres. Si en una junta longitudinal hay barras de unión, esta junta no es un borde libre. La fórmula del ábaco de la Figura 15 puede transformarse en separación entre barras:

**FORMULA N° 7**, Cuantía de Acero - en separación entre barras.

$$Y = \frac{A_s}{P_t \times D} \times 100$$

Donde:

Y = Separación entre barras

A<sub>s</sub>= Sección transversal de acero

P<sub>t</sub>= Porcentaje de acero

D= Espesor de losa

Se recomienda que la separación entre barras, este entre 36 y 60 pulgadas (914 a 1524 mm).

**FOTO N° 4**, Armadura Transversal.

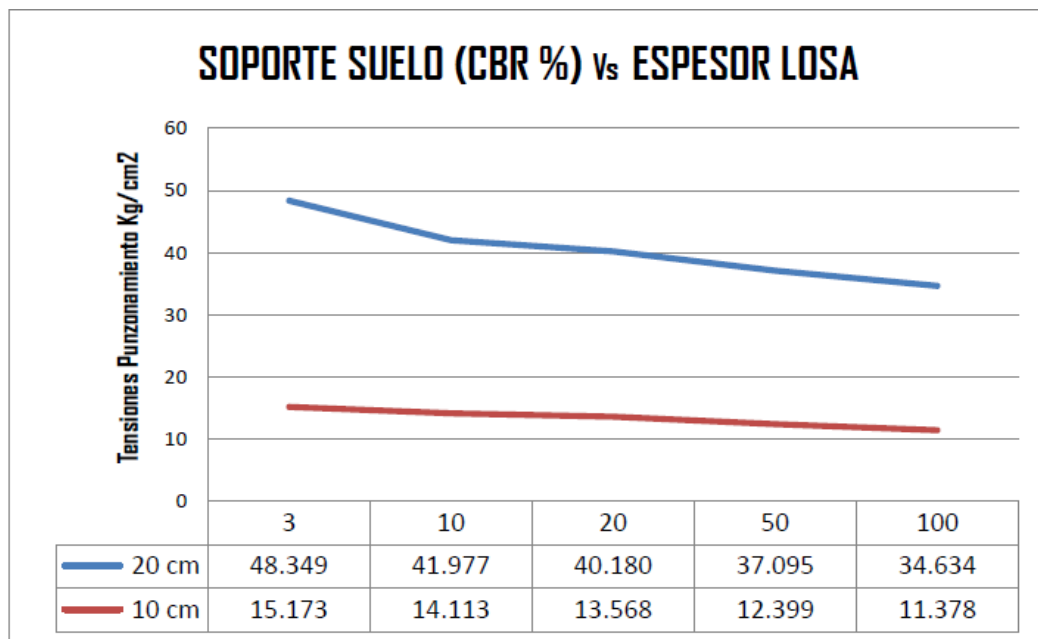


**Fuente:** *diseño de pavimentos aashto 93 – dipav 2 IBCH.*

## 2.7 MODELACIÓN SUELO

Otro aspecto importante en el diseño \* TCP es la modelación del suelo. Siempre se ha considerado que la losa de concreto son suficientemente resistentes para soportar la cargas de los vehículos y no tener tensiones por punzonamiento, en este caso de losas gruesas, es preferible utilizar bases blandas (CBR 20%-50%) para mejorar el apoyo de ésta en el suelo.

**FIGURA N° 21, Soporte de Suelo vs. Espesor de Losa**



**Fuente:** tesis; *aplicación de la tecnología de pavimento TCP en las calles 56 y 78.*

Como se aprecia en el gráfico anterior, las losas con espesores menores a 12 cm, requieren que la base sea más rígida y que colabore con las cargas bajo las ruedas, que producen tensiones de punzonamiento. Es por esto que para estos espesores la base debe tener una rigidez suficiente para tomar estas cargas (CBR > 80%).

\*Nueva tecnología de aplicación de pavimentación de calles denominado TCP (Thin Concrete Pavements).

## **2.8 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MODELADO EN PROGRAMA)**

### **2.8.1 PREÁMBULO**

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.

El método es altamente utilizado ya que permite obtener una solución numérica aproximada sobre el comportamiento de una estructura, sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales que se encargan de definir el comportamiento físico del problema dividiéndolo en un número elevado de subdominios no intersectantes entre sí, esto se denomina elementos finitos.

Dentro de cada elemento se encuentran una serie de puntos que permiten el movimiento de cada elemento, estos puntos son denominados nodos y son adyacentes entre ellos si pertenecen al mismo elemento, también un nodo sobre la frontera puede pertenecer a varios elementos, el conjunto de nodos y las relaciones que existen entre ellos constituyen una malla, esta malla es de gran importancia ya que a partir de esta se realiza la discretización del dominio en elementos finitos, y a su vez permite realizar los cálculos sobre cada uno de los nodos. La construcción de la malla generalmente se realiza a partir de programas especializados.

El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable y los nodos se puede expresar como un sistema de ecuaciones donde el número de ecuaciones es proporcional al número de nodos, este sistema también puede ser escrito como una matriz llamada matriz de rigidez global. 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.

### **2.8.2 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 los esfuerzos críticos en las losas del pavimento.

### **2.8.3 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 debe cumplir los siguientes requisitos:

- El modelo debe describir adecuadamente la estructura del pavimento (capas construidas y subrasante).
- El modelo debe tener en cuenta las discontinuidades en las estructuras de pavimento (juntas).
- El modelo debe ser capaz de analizar múltiples carga de ruedas.
- 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 existe una variedad de programas de elementos finitos, para la utilización en el modelado de los pavimentos.

Estos programas se pueden dividir en programas de elementos finitos de propósito general y de elementos finitos de códigos desarrollados específicamente para el análisis de sistemas de pavimentos. Los programas del primer grupo, como ABAQUS, ANSYS y DYNA3D, son más potentes y capaces, ya que pueden llevar a cabo análisis dinámico no lineal en tres dimensiones. Estos programas han sido utilizados con éxito para el análisis de pavimento en varios estudios de investigación, y una diversidad de modelos fueron construidos en la actualidad con estos productos. Sin embargo, estos programas suelen exigir considerable recursos computacionales, así como el tiempo para el desarrollo de un modelo estructural para cada problema.

Los programas desarrollados especialmente para el análisis de los sistemas de pavimentación de concreto incluyen:

- ILLI-SLAB (Tabatabaie y Barenberg 1980)
- WESLIQID (Chou 1981)
- J-LOSA (Tayabji y Colley, 1983)
- FEACONS-IV (Choubane y Tia 1995)
- KENSLAB (Huang 1993)
- KOLA (Kok 1990)
- **EVERFE (Davids, Turkiyyah y Mahoney 1998)**

La mayoría de estos programas pueden analizar múltiples ruedas de carga, de una o más capas que descansa sobre una fundación Winkler (Fundación sólida elástica). Para la realización de nuestra investigación ocuparemos el programa **EverFE 2.25**.

## 2.8.4 ANÁLISIS DE ECUACIONES QUE GOBIERNAN LA MODELACIÓN NUMÉRICA

### 2.8.4.1 LEY DE HOOKE GENERALIZADA

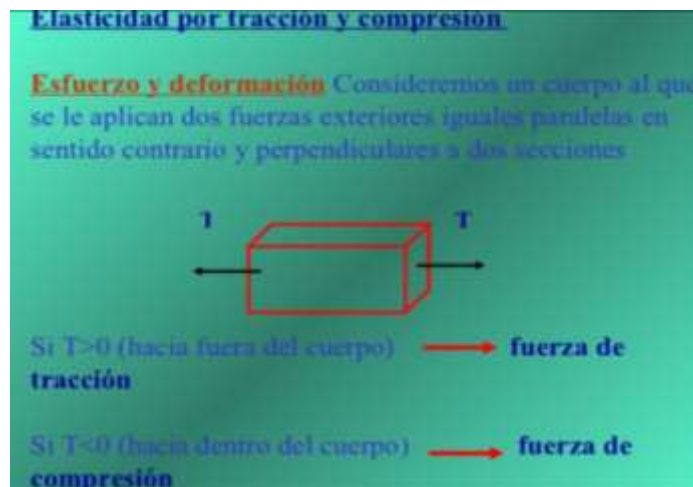
Los esfuerzos aplicados son directamente proporcionales a las deformaciones producidas, esta afirmación se conoce como la Ley de Hooke. Para hacer que esta Ley sea más de aplicabilidad en general, se hace conveniente definir los términos “esfuerzo” y “deformación”. Los tipos de esfuerzos más comunes y sus correspondientes deformaciones serían, esfuerzo de: tensión, compresión, corte, flexión y torsión.

**Elasticidad.** - Parte de la Física que estudia las Leyes que gobiernan las deformaciones sufridas por un cuerpo cuando se le aplica una fuerza externa.

Todo cuerpo sobre el que actúan fuerzas externas sufre una deformación que depende de la naturaleza del sólido y de las fuerzas que sobre él actúan.

Si al suprimir las fuerzas que actúan sobre el sólido éste vuelve a recobrar su estado original se dice que es **elástico**; si el cuerpo queda permanentemente deformado al dejar de aplicarle la fuerza se dice que es **plástico**.

**FIGURA N° 22**, elasticidad por tracción y compresión.



**Fuente:** <http://es.slideshare.net/JhoanUrdaneta/esfuerzo-y-deformacion>

**Esfuerzo.-** Se define ( $\sigma$ ) como el cociente entre la tensión aplicada y el área de la sección transversal sobre la que se aplica.

**FORMULA N° 8, esfuerzo.**

$$\sigma = T/A \text{ (N/m}^2\text{)}$$

el resultado será un cambio en la longitud del mismo. **La deformación** producida dependerá de la tensión por unidad de área transversal sobre la que se aplica la fuerza.

$$\varepsilon = \Delta L/L_0 \text{ sin unidades}$$

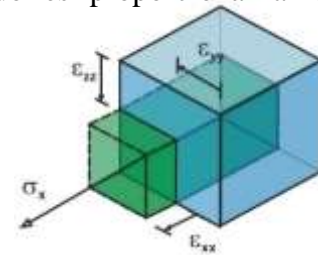
Si el **esfuerzo** aplicado sobre el cuerpo no es demasiado grande (reversible), experimentalmente se encuentra que el esfuerzo aplicado es proporcional a la **deformación** producida.

**FORMULA N° 9, Ley de Hooke.**

**Ley de Hooke**  $\sigma = E * \varepsilon$

E= módulo de Young (N/m<sup>2</sup>) característico del material

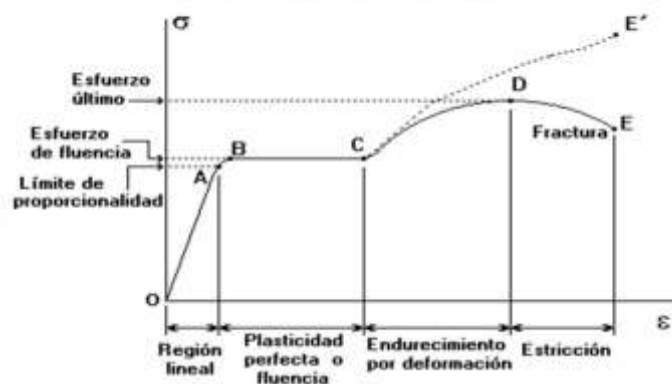
La ley de Hooke generalizada permite obtener el campo de esfuerzo, a partir del campo deformaciones presentes en el cuerpo.



**FIGURA N° 23, Diagrama esfuerzo – deformación.**

### DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN

materiales dúctiles en tensión



**Fuente:** <http://slideplayer.es/slide/1867522/>.

Muchos de los problemas de la ingeniería y de las ciencias aplicadas están gobernados por ecuaciones diferenciales o integrales. La complejidad de geometría o de las condiciones de frontera halladas en muchos de los problemas del mundo real impide obtener una solución exacta del análisis considerado, por lo que se recurre a técnicas numéricas de solución de las ecuaciones que gobiernan los fenómenos físicos. El Método de los Elementos Finitos es una de estas técnicas numéricas, muy apropiada para su implementación en computadores (dada su facilidad para el manejo de algoritmos numéricos, rapidez en los cálculos y precisión en la respuesta). Esta técnica puede ser aplicada para resolución de problemas de diversa índole: mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, transferencia de calor, vibraciones, etc. Los procedimientos para la resolución de los problemas en cada uno de estos campos son similares.

En todos los modelos de elementos finitos el dominio o continuo (el sólido en problemas de mecánica de sólidos) se divide en un número finito de formas simples denominadas elementos. Las propiedades y las relaciones gobernantes del fenómeno estudiado se asumen sobre estos elementos, y se expresan matemáticamente en términos de valores desconocidos en puntos específicos de los elementos denominados nodos. Estos nodos sirven de conexión entre los elementos. En los modelos sólidos, los desplazamientos en cada elemento están directamente relacionados con los desplazamientos nodales, y los desplazamientos nodales se relacionan a su vez con las deformaciones y los esfuerzos en los elementos. El método de Elementos Finitos trata de seleccionar los desplazamientos nodales de forma que los esfuerzos estén en equilibrio (de forma aproximada) con las cargas aplicadas. Los desplazamientos nodales también deben ser consistentes con cualquier restricción de movimiento de la estructura.

El Método de los Elementos Finitos convierte las condiciones de equilibrio en un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales (o no lineales) en función de los desplazamientos nodales. Después de obtener la solución de las ecuaciones se pueden hallar las deformaciones y los esfuerzos en los elementos. A medida que se utiliza un

mayor número de elementos para representar la estructura, los esfuerzos se acercan más al estado de equilibrio con las cargas aplicadas. Por tanto, un concepto importante en el uso del método de los Elementos Finitos es que, en general, un modelo de Elementos Finitos se aproxima a la solución real del problema a medida que se incrementa la densidad de elementos, lo cual conduce a la realización de un análisis de convergencia de la solución.

#### **2.8.4.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL MÉTODO**

El método de Elementos Finitos es muy versátil y poderoso y permite a los ingenieros obtener información del comportamiento de objetos de forma complicada bajo casi cualquier carga imaginable (cargas puntuales, de presión, térmicas, fuerzas inerciales, cargas dependientes del tiempo). Permite resolver problemas en estado estable o dependiente del tiempo, lineal o no lineal. Se pueden manejar materiales especiales: no homogéneos, ortotrópicos, anisotrópicos. Se pueden además considerar efectos especiales sobre los materiales: plasticidad, propiedades dependientes de la temperatura. Las ramas de aplicación son variadísimas: mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, electromagnetismo, biomecánica, transferencia de calor y acústica, entre muchas otras. La principal limitación de los métodos de Elementos Finitos radica en que la precisión de los resultados depende de la densidad de elementos utilizada. En análisis estructurales, cualquier región con alta concentración de esfuerzos debe ser cuidadosamente analizada mediante un enmallado suficientemente fino para obtener resultados confiables. Ya que los paquetes actuales de Elementos Finitos parecen resolver tan amplia gama de problemas, existe una marcada tendencia a resolver problemas mecánicamente sin tomarse el trabajo de entender la física y matemática subyacentes en el problema. Los paquetes de Elementos Finitos se han vuelto casi indispensables en el diseño y análisis mecánico, pero han acercado a los usuarios la posibilidad de cometer grandes errores. La versatilidad del método no salva la necesidad de realizar un detallado análisis de los resultados obtenidos antes de ser aplicados en la solución de un problema real.

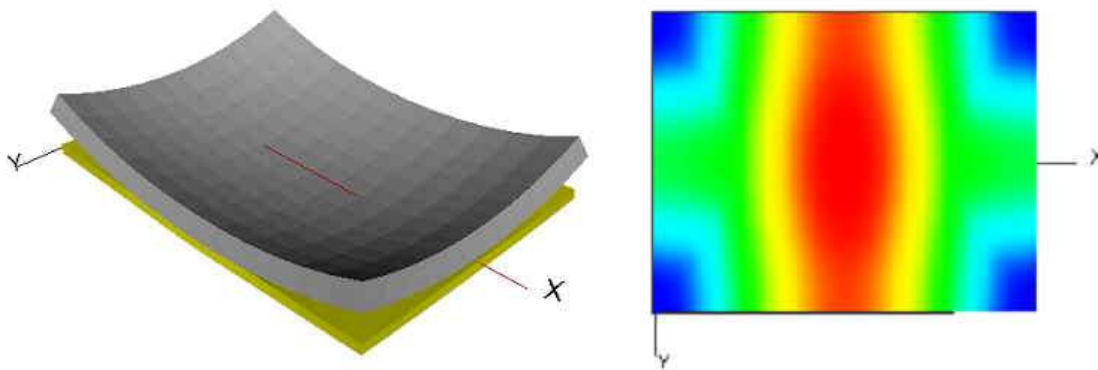
### 2.8.5 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA EVERFE 2.25

**EVERFE** es una herramienta de análisis de elementos finitos 3D para pavimentos rígidos, desarrollado en la Universidad Maine y 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 ventanas emergentes.

Los esfuerzos en la Losa pueden ser analizados por EVER FE ó ISLAB- Modelo de elementos finitos para calcular los esfuerzos en el hormigón por cargas y temperatura.

La construcción del modelo se desarrollará con las herramientas que proporciona la Versión 2.25 del programa de elementos finitos EverFE2.25, el cual permite tanto la realización de la geometría del problema (número de losas de pavimento, peso eje vehículo, etc) como la realización del propio cálculo numérico y el posterior tratamiento final de los resultados y análisis de los mismos. (Representación gráfica de las deformaciones, desplazamientos, tensiones, etc.).

**FIGURA N° 24**, Modelado de Losa por Elementos Finitos, Everfe.



**Fuente:** [www.civil.umaine.edu/everfe/](http://www.civil.umaine.edu/everfe/) EverFE Theory Manual

EVERFE incorpora una novedosa técnica para el modelado de trabazón de agregado que puede ser lineal y no lineal en la junta, así como un nuevo método para el modelado

de barras para la transferencia carga en las juntas transversales. Una estrategia de solución avanzada empleada por EVERFE que permite modelos realistas 3D que pueden ser simulados, sin la necesidad de tener computadoras de gran capacidad. Sin embargo, EVERFE tiene limitaciones como cualquier software en mejora.

El método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método de cálculo utilizado en diversos problemas de ingeniería, que se basa en considerar al cuerpo o estructura dividido en elementos discretos, con determinadas condiciones de vínculo entre sí, generándose un sistema de ecuaciones que se resuelve numéricamente y proporciona el estado de tensiones y deformaciones.

La base del método de los elementos finitos es la representación de un cuerpo por un ensamble de subdivisiones llamadas elementos. Estos elementos se interconectan a través de puntos llamados nodos.

Para esto se simplifica toda la representación de las losas, cargas y deformaciones con EverFe, colocando los parámetros o datos posteriormente en el modelo.

## **2.9 DEFINICIÓN Y NORMAS PARA ENSAYOS EN LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES**

### **2.9.1 ARENA**

Se entiende por “árido fino”, el árido o fracción del mismo que pasa por el tamiz de 5 mm de malla. La arena será limpia, de buena calidad y sin materiales extraños como pizarras, arcilla, barros, hojas, yesos u otras materias deletéreas. El módulo de fineza debe estar comprendido entre 2.50 y 3.00

**Granulometría**, es la medición y graduación que se lleva a cabo de los [granos](#) de una [formación sedimentaria](#), así como de los [suelos](#), con fines de análisis, tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas, y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una *escala granulométrica*.

La arena deberá cumplir con el siguiente cuadro de granulometría:



### Características de la arena:

**Tabla N° 11,** Tamaño de los Agregados Finos según Norma CBH 87.

Tamiz N°	% que pasa Mínimo	% que pasa Máximo
100	3	7
50	5	26
30	30	62
16	55	85
8	75	95
4	95	100

**Fuente:** *elaboración propia.*

En cuanto a la granulometría y demás pruebas de laboratorio que se realizan para la arena, se lo hará de modo consecutivo y siguiendo las guías técnicas ya establecidas según las normas vigentes en este caso se trabajó con la ASTM.

#### **2.9.1.1 Ensayo de granulometría para la arena**

Dentro del análisis de los suelos, se encuentra el de la granulometría, que no es más que obtener la distribución porcentual de los tamaños de partículas que conforman el suelo. Esto se realiza con la ayuda de un juego de mallas, que tienen un tamaño graduado establecido por las normas ASTM y AASHTO, donde se obtienen los pesos que se retienen en la malla, referido al peso total que se utiliza en el ensayo.

El factor fundamental del ensayo es la curva granulométrica, que se dibuja en una escala logarítmica, ya que de no ser así, la representación gráfica tendría que usar una escala demasiado grande.

#### **2.9.1.2 Peso específico de la arena**

El ensayo que se describe a continuación tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua que absorbe el agregado fino cuando se sumerge en agua por el periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso.

### **2.9.1.3 Peso unitario de la arena**

Este ensayo tiene como objeto describir cómo se puede obtener el peso unitario de los agregados y de las mezclas de agregados a la temperatura ambiente.

Los moldes con los que se trabajará, deben estar calibrados con exactitud, el volumen de cada molde se determina dividiendo el peso del agua requerido para llenar el respectivo molde por el peso unitario del agua a la misma temperatura 16,7 °C.

Se trabajó con una muestra de 500 gr, que puede ser obtenida por cuarteo luego se coloca la muestra dentro de un recipiente lleno de agua y se deja allí por un periodo de 24 horas.

### **2.9.1.4 Equivalente de arena**

Porcentaje de arena propiamente tal con respecto al total de la arena y de impurezas coloidales floculadas, particularmente arcillosas, húmicas y eventualmente ferruginosas. Este método establece un procedimiento rápido para determinar las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por tamiz de 4.75 mm (N 4).

## **2.9.2 GRAVA**

El agregado grueso o grava, estará formado por canto rodado o canto rodado triturado; deberá ser muy limpia. Sin la presencia de limo recubriendo su superficie y/o que contenga material pétreo descompuesto. Las partículas individuales de grava serán sólidas y resistentes de un peso específico igual o mayor a 2.600 Kg/m<sup>3</sup>, evitando el uso de formas laminares.

El tamaño de la grava deberá tener una buena graduación desde el tamaño máximo especificado, hasta el tamiz N° 4 donde deberá quedar retenido el 100%.

Los límites aceptables de sustancias perjudiciales en los agregados gruesos, serán en peso: Terrones de arcilla 0.25 %

Partículas blandas 5.00 %

Finos que pasen el tamiz N° 200 5.00 %

Sales solubles, partículas cubiertas por partículas superficiales 5.00 %

### Características de la grava

**Tabla N° 12,** Tamaño del Agregado Grueso para el Hormigón según CBH 87

Tamiz N°	% que pasa Mínimo	% que pasa Máximo
2½"	100	100
2"	95	100
1½"	-	-
1"	35	100
¾"	-	-
½"	10	30
3/8"	-	-
N° 4	3	5

*Fuente: tabla de elaboración propia*

El material no deberá contener sustancias que puedan actuar desfavorablemente con los álcalis del cemento en presencia del agua.

#### 2.9.2.1 Ensayo de granulometría para la grava

Dentro del análisis de los suelos, se encuentra el de la granulometría, que no es más que obtener la distribución porcentual de los tamaños de partículas que conforman el suelo. Esto se realiza con la ayuda de un juego de mallas, que tienen un tamaño graduado establecido por las normas ASTM y AASHTO, donde se obtienen los pesos que se retienen en la malla, referido al peso total que se utiliza en el ensayo.

#### 2.9.2.2 Peso específico de la grava

Es la relación a una temperatura estable de la masa en el aire de un volumen unitario de material, a la masa en el aire de igual densidad de un volumen igual de agua destilada libre de gas.

**2.9.2.3 Peso unitario de la grava** Este ensayo tiene como objeto describir cómo se puede obtener el peso unitario de los agregados y de las mezclas de agregados a la temperatura ambiente.

Los moldes con los que se trabajará, deben estar calibrados con exactitud, el volumen de cada molde se determina dividiendo el peso del agua requerido para llenar el respectivo molde por el peso unitario del agua a la misma temperatura 16,7 °C.

#### **2.9.2.4 Desgaste de los ángeles astm c-131**

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los áridos mayores a 2.5 mm, mediante la máquina de Los Ángeles

### **2.9.3 AGUA**

Su función es permitir la hidratación del cemento y hacer manejable la mezcla

- Debe ser limpia y libre de cualquier sustancia perjudicial al pavimento terminado
- En general, se considera adecuada el agua que sea apta para el consumo humano

#### ***Algunas especificaciones y/o características del agua***

Características Límite:

- pH  $\geq 5$
- Sustancias disueltas  $\leq 15$  g/l
- Contenido de sulfatos (SO<sub>4</sub>)  $\leq 1$  g/l
- Sustancias orgánicas solubles en éter  $\leq 15$  g/l
- Contenido de ion cloro  $\leq 6$  g/l
- Hidratos de carbono (azúcares) 0

### **2.9.4 CEMENTO**

Para las muestras de hormigón preparadas con cemento, serán convenientemente especificadas, fraguadas y almacenadas para su posterior ensayo, con el objeto de conseguir información de la resistencia. Los ensayos del hormigón estarán en función a la clase de hormigón que se debe preparar y a la resistencia y características que se requiere, de igual manera para los agregados y agua.

**-Transporte y almacenamiento del cemento:** El cemento se transportará a un lugar de almacenamiento en seco y protegido contra la humedad. Como el transporte del cemento es en bolsas, éstas tendrán que estar perfectamente cerradas

El cemento deberá emplearse, dentro de lo posible, en los 20 días siguientes a su llegada. Si el almacenaje se extendiera por un período superior a 30 días, el cemento deberá someterse a las pruebas requeridas que confirmen la aptitud para su empleo.

### **-Cemento empleado**

El cemento con el que se trabajó en las prácticas del laboratorio para el hormigón de los moldes (vigas de 15x15x60) fue portland IP 30.

El cual presenta las siguientes características:

- **Tipo IP:** componentes Portland mínimo 70%, puzolana máximo 30% Categoría 30, Resistencia mín. 30 MPa. 28 días en mortero normalizado.
- **Propiedades:** sus principales propiedades son: resistencia mecánica media, bajo calor de hidratación, menor retracción y endurecimiento algo más lento.
- **Usos y Aplicaciones:** utilizado en hormigón armado, pavimentos, prefabricados, hormigones en masa, cimentaciones, obras hidráulicas y en general por su versatilidad para todo tipo de construcciones.
- **Características:** resistencia mecánica media, bajo calor de hidratación, menor fisuración y retracción química, mejor trabajabilidad, mayor resistencia a ataques químicos, mayor impermeabilidad, mayor durabilidad.
- **Presentación:** bolsas de 50 Kg.

Además buscando garantizar un buen trabajo se realizaron las pruebas de laboratorio, como ser, peso específico del cemento y finura del cemento.

## **2.9.5 ACERO**

**Acero de refuerzo para transmisión de cargas:** Este refuerzo tiene la función de hacer trabajar en conjunto, a las losas de hormigón cuando alguna de ellas se somete a cargas. La transmisión de cargas se hace por medio de varillas lisas de acero, total o

parcialmente engrasadas para evitar la adherencia. Un primer paso representa la resistencia a flexión que estas ofrezcan como elementos estructurales sometidos a una carga puntual. Estas barras denominadas “pasa-juntas” - “pasadores” o “dovelas” deben cumplir con las especificaciones ASTM A 15, 16 y 160, además de lo especificado las Normas Bolivianas de Hormigón Armado CBH -87.

Barra lisa de 1” de diámetro, esta es la que normalmente se emplea como pasador en el pavimento rígido.

### **2.9.6 Dosificación para mezcla de hormigón de pavimento**

El hormigón se preparará de acuerdo a las normas del Código Boliviano del Hormigón y cemento Portland o Puzzolánico, empleando agregados graduados y la composición de la mezcla de hormigón será de manera que demuestre una buena consistencia plástica. **Resistencia mecánica de hormigón:** la resistencia del hormigón para pavimentos rígidos, se mide por su resistencia a la flexión sobre la base de una propiedad llamada módulo de rotura, que se determina por medio de los ensayos de resistencia al flexo tracción del hormigón.

La dosificación es el empleo de las proporciones adecuadas de los elementos para un trabajo determinado.

Esta dosificación puede hacerse por:

- 1.- *Peso:* pesando los elementos que entran en la mezcla. Su empleo se da en los laboratorios de ensayo.
- 2.- *Por volúmenes conocidos:* es decir por bolsas de cemento y metros cúbicos de los agregados, esta es la forma más aceptada en obra.
- 3.- *Por volúmenes establecidos:* cajas que representan unidad de mezcla pero con las desventajas de que el cemento al ser vaciado en la medida, dependerá de la altura que cae para tener mayor o menor esponjamiento, tomando distinto grado de compacidad, variando por lo tanto la cantidad de cemento por revoltura.

## CAPÍTULO III

### “INVESTIGACIÓN SOBRE LA MODELACIÓN DE LAS DOVELAS EN LOSAS”

#### 3.1 INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

*El avance científico y tecnológico asociado a la construcción de carreteras con pavimento rígido muestran un avance significativo en los últimos años, con el desarrollo de nuevas tipologías de pavimentación. El desarrollo de nuevos aditivos, fibras de refuerzo y el creciente uso de adiciones que acompañan estos nuevos desarrollos permiten obtener nuevas alternativas, capaces de satisfacer los requerimientos que se solicitan.*

*Sin embargo, aún existen dificultades para mejorar las prácticas constructivas en condiciones reales de obra. Las condiciones de costo y desempeño de las estructuras de concreto pueden afectar negativamente a la calidad del producto final, con resultados que pueden conducir a un deterioro prematuro.*

*Las condiciones exteriores y la composición de hormigones con pasadores, influyen de manera directa en las características del concreto para cualquier etapa del mismo. Ello constituye una preocupación tanto para los fabricantes como para los usuarios de dichos hormigones por las evidentes consecuencias técnicas y económicas que se generan.*

Es en este entendido, es que buscamos indagar en el área vial, analizando uno de sus campos que son los pavimentos, adentrándonos en lo que es el tema modelación numérica de la inclinación de las dovelas en losas de pavimento rígido, se busca resolver inquietudes a través de pruebas de laboratorio y una simulación tridimensional en el paquete computacional EVERFE que sostenga la idea que se desarrolla con esta investigación.

### 3.2 MUESTREO DE MATERIALES

Los materiales para los ensayos en esta investigación fueron obtenidos en el banco de acopio de la Empresa Erika, la cual se encuentra ubicada en la carretera Tomatitas -San Lorenzo ruta al Norte; se puede identificar en la siguiente imagen referencial obtenida por Google Earth.

**FIGURA N° 25,** *Ubicación Banco de Materiales.*



**Fuente:** *fuentes propia google earth v7.2*

Previo a las gestiones realizadas se pudo trasladar los volúmenes requeridos para la arena y grava con la cual se desarrollaron todas las prácticas y las probetas para su posterior ensayo a flexión referente para pavimentos rígidos.

La empresa únicamente disponía grava chancada de 3/4" y 3/8", el agregado que se recolectó fue de 3/4" el cual se usará para esta investigación con pavimentos rígidos.

Al estar el material seleccionado, tamizado y semilavado se llenaron bolsas plásticas resistentes de 50 kilos las cuales fueron trasladadas hasta el lugar de los ensayos en Laboratorios de Suelos y Hormigones de la U.A.J.M.S



No hubo ningún problema en la recolección para este material, como se puede apreciar en la fotografía obtenida al momento de llenado.

**FOTO N° 5**, Recolección de Agregado Grueso, Banco Acopio Erika.



**Fuente:** *fuentes propia.*

De la misma manera se llenan las bolsas de arena, obteniendo una arena chancada semilavada la cual es transportada en bolsas de 50 kilos a los lugares de ensayo dentro del campus universitario.

Ambos materiales fueron lavados nuevamente para obtener mejores resultados.

**FOTO N° 6**, Recolección de Arena, Banco Acopio Erika.



**Fuente:** *fuentes propia.*

El cemento se obtuvo de cualquier casa comercial en bolsas de 50 Kg de la marca El Puente del tipo Especial IP – 30 que es conocido y utilizado en el medio. Éste se lo trasladó con más cuidado porque la bolsa puede romperse accidentalmente y se lo dejó en un lugar cuidando la humedad del lugar.

**FOTO N° 7, Bolsa Arena El Puente.**



**Fuente:** *fuentes propia.*

Para las barras lisas (dovelas) de 1" se tuvo que cortar las barras de 12 m en tamaños de 30 cm con bastante precisión, éstas se compraron en distribuidora de fierros en la ciudad de Tarija, obteniendo las mismas gracias al corte de máquinas industriales.

**FOTO N° 8, Cortado de Barras (Dovelas)**



**Fuente:** *fuentes propia.*

### 3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES



**AGUA**

**ARENA**



**GRAVA**

**CEMENTO**



**ACERO**

**HORMIGÓN**

### 3.3.1 ENSAYOS REALIZADOS A LA ARENA

#### 3.3.1.1 GRANULOMETRÍA PARA LA ARENA

**Procedencia:** El Rancho

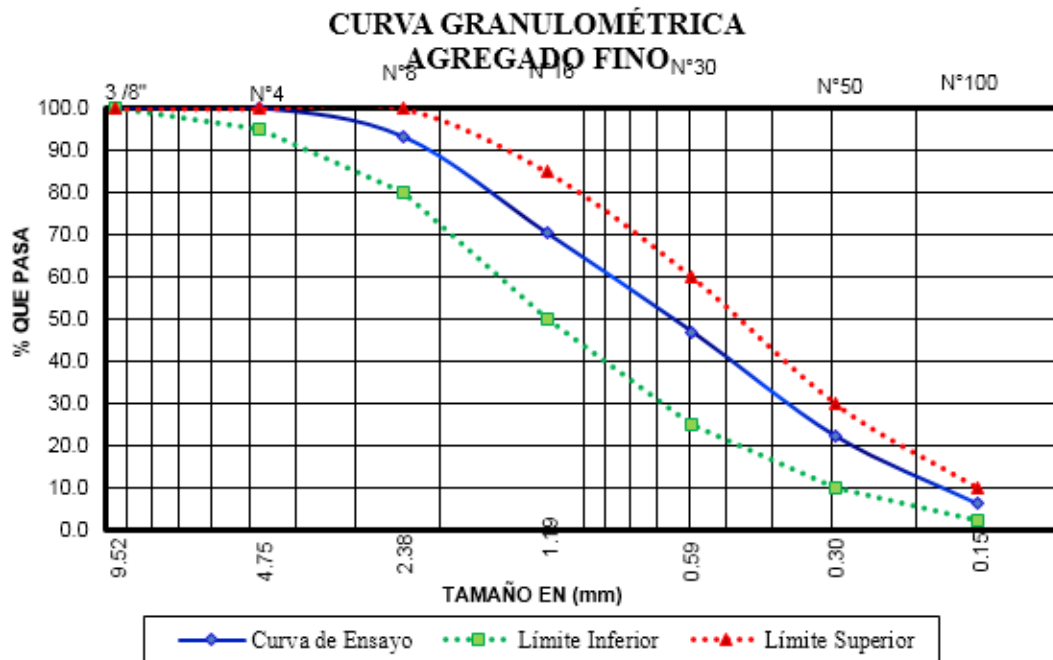
**Tamaño máx. del agregado:** Tamiz N° 4

Arena - Muestra única

*Los porcentajes que pasaron los tamices correspondientes son:*

**Tabla N° 13, Granulometría del Agregado Fino.**

Peso Total (gr.)						500	
Tamices (Plg.)	Tamaño (mm)	Peso Retenido.	Retenido. Acumulado	% Retenido	% que pasa del total	Especificación	
						ASTM C-33	
3/8	9.52	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
N°4	4.75	0.00	0.00	0.00	100.0	95	100
N°8	2.38	34.10	34.10	6.82	93.2	80	100
N°16	1.19	114.50	148.60	29.72	70.3	50	80
N°30	0.59	117.10	265.70	53.14	46.9	25	100
N°50	0.30	123.10	388.80	77.76	22.2	10	30
N°100	0.15	80.80	469.60	93.92	6.1	2	10
BASE		29.90	499.50	99.90	0.1		
SUMA		499.50					
PÉRDIDAS		055					
MF		2.61					



**Fuente:** fuente propia-procesamiento en gabinete.

**FIGURA N° 26,** Curva Granulométrica Agregado Fino.

**Tabla N° 14,** Porcentaje de Humedad y Absorción

HUMEDAD (%)	
DATO	gr
Peso Muestra Húmeda	1130,00
Peso Muestra seca	1118,10
Peso Agua	11,90
% de Humedad	1,1

ABSORCION (%)	
DATO	gr
Peso Muestra Húmeda (SSS)	500
Peso Muestra seca	493,9
Peso Agua	6,1
% de Absorción	1,2

**Fuente:** fuente propia-procesamiento en gabinete.

### 3.3.1.2 PESO ESPECÍFICO DE LA ARENA

Tabla N° 15, Tabla de Resultados *Peso Específico de la Arena*.

MUESTRA N°	PESO MUESTRA (gr)	PESO DE MATRÁZ (gr)	MUESTRA +MATRÁZ + AGUA (gr)	PESO DEL AGUA AGREGADO AL MATRÁZ "W" (ml) ó (gr)	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	VOLUMEN DEL MATRÁZ "V" (ml)	P. E. A GRANEL (gr/cm <sup>3</sup> )	P. E. SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm <sup>3</sup> )	P. E. APARENTE (gr/cm <sup>3</sup> )	% DE ABSORCIÓN
1	500	200.8	1001.5	300.70	488.4	500.0	2.45	2.51	2.60	2.32
2	500	200.8	1001.5	300.70	488.4	500.0	2.45	2.51	2.60	2.32
3	500	200.8	1001.5	300.70	488.4	500.0	2.45	2.51	2.60	2.32
PROMEDIO							2.45	2.51	2.60	2.3

Fuente: *fuelle propia-procesamiento en gabinete.*

### 3.3.1.3 PESO UNITARIO DE LA ARENA

Peso unitario suelto:

Tabla N° 16, Tabla de Resultados *Peso Unitario Suelto de la Arena*

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm <sup>3</sup> )	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm <sup>3</sup> )
1	2605.0	3000.0	7342.2	4737.2	1.579
2	2605.0	3000.0	7342.2	4737.2	1.579
3	2605.0	3000.0	7342.2	4737.2	1.579
PROMEDIO					1.579

Fuente: *fuelle propia-procesamiento en gabinete.*

**Peso unitario compacto:**

**Tabla N° 17, Peso Unitario Compacto de la Arena.**

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm <sup>3</sup> )	PESO RECIP. + MUESTRA APISIONADA (gr)	PESO MUESTRA APISIONADA (gr)	PESO UNITARIO APISIONADO (gr/cm <sup>3</sup> )
1	2605.0	3000.0	7567.0	4962.0	1.654
2	2605.0	3000.0	7567.0	4962.0	1.654
3	2605.0	3000.0	7567.0	4962.0	1.654
<b>PROMEDIO</b>					<b>1.654</b>

**Fuente:** fuente propia-procesamiento en gabinete.

### 3.3.1.4 EQUIVALENTE DE LA ARENA

**Tabla N° 18, Promedio de Equivalente de Arena.**

N° de Muestra	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	9.9	10.60	93.40
2	11.3	12.15	93.00
3	10.8	11.70	92.31
		<b>Promedio</b>	<b>92.90</b>

$$E.A. = \frac{H_1}{H_2} * 100$$

Equivalente de Arena (%)	NORMA
<b>92.90</b>	> 50%

**Fuente:** fuente propia-procesamiento en gabinete.

### 3.3.2 ENSAYOS REALIZADOS A LA GRAVA

#### 3.3.2.1 GRANULOMETRÍA PARA LA GRAVA

**Procedencia:** El Rancho

**Tamaño máx. del agregado:** 3/4"

Grava- Muestra única

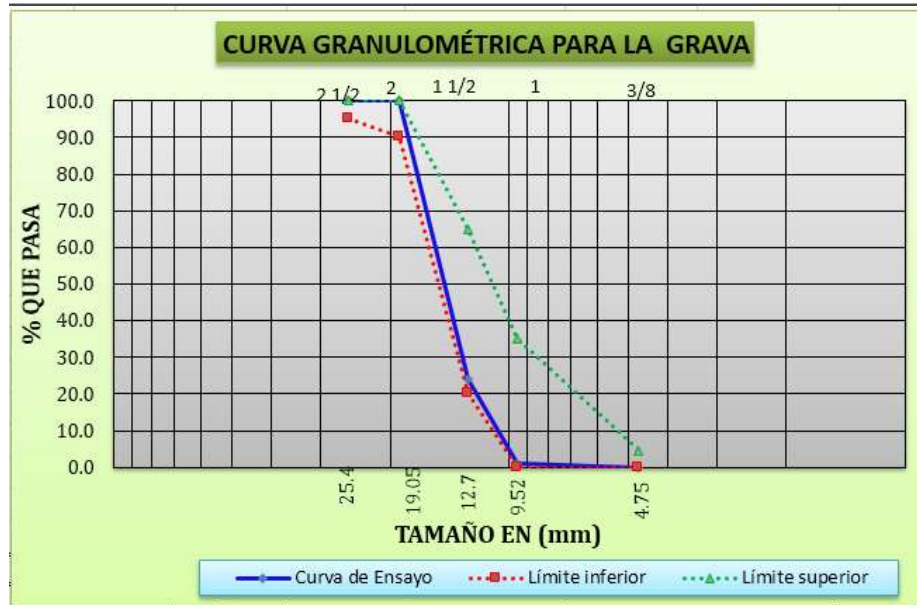
**Tabla N° 19, Granulometría del Agregado Grueso.**

Peso Total (gr.)							5000	
Tamices (Plg.)	Tamaño (mm)	Peso Retenido.	Retenido Acumulado		% Que pasa del total	% Que pasa s/g		
			(gr)	(%)		Especiaciones. ASTM		
2 1/2"	63	0,00	0,00	0,00	100,0	100	100	
2	50,8	0,00	0,00	0,00	100,0	95	100	
1 1/2	38,1	0,00	0,00	0,00	100,0	95	100	
1	25,4	0,00	0,00	0,00	100,0			
3/4	19,05	0,00	0,00	0,00	100,0	35	70	
1/2	12,7	3810.50	3810.50	76.21	23.8			
3/8	9,52	1130.50	4941.00	98.82	1.2	10	30	
N°4	4,75	57.00	4998.00	99.96	0.0	0	5	
N°8	2,38	0.30	4998.30					
BASE	0	1.7	5000.00	100.00	0.0			
SUMA =		4998.2						
PÉRDIDAS =		0.80						
MF =		6,99						
TAMAÑO MAX =		1,00						

**Fuente:** fuente propia-procesamiento en gabinete.



**Figura N° 27,** Curva Granulométrica para el Agregado Grueso.



**Fuente:** fuente propia-procesamiento en gabinete.

**Tabla N° 20,** Porcentaje de Absorción y Humedad del Agregado Grueso.

HUMEDAD	
DATO	Gr
Peso Muestra Húmeda	5744,00
Peso Muestra seca	5719,00
Peso Agua	25,00
% de Humedad	<b>0,44</b>

ABSORCION	
DATO	Gr
Peso Muestra Húmeda (SSS)	4000
Peso Muestra seca	3936
Peso Agua	64
% de Absorción	<b>1,63</b>

**Fuente:** fuente propia-procesamiento en gabinete.

### 3.3.2.2 PESO ESPECÍFICO DE LA GRAVA

**Procedencia:** El Rancho - Erika

**Tamaño máx. del agregado:** 3/4"

**Tabla N° 21,** *Peso Específico del Agregado Grueso.*

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm3)	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm3)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm3)	% DE ABSORCIÓN
1	5904.9	6003.2	3700.0	2.56	2.61	2.68	1.66
2	5905.8	6002.1	3701.0	2.57	2.61	2.68	1.63
3	5906.0	6004.3	3699.0	2.56	2.60	2.68	1.66
<b>PROMEDIO</b>				<b>2.56</b>	<b>2.61</b>	<b>2.68</b>	<b>1.65</b>

**Fuente:** *fuelle propia-procesamiento en gabinete.*

### 3.3.2.3 PESO UNITARIO DE LA GRAVA

#### ■ Peso unitario suelto

**Procedencia:** El Rancho - Erika

**Tamaño máx. del agregado:** 3/4"

**Tabla N° 22,** *peso unitario suelto del agregado grueso.*

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	2613.8	3000.0	6658.4	4044.60	1.348
2	2613.8	3000.0	6659.4	4045.60	1.349
3	2613.8	3000.0	6657.4	4043.60	1.348
<b>PROMEDIO</b>					<b>1.348</b>

#### ■ Peso unitario compacto

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm <sup>3</sup> )	PESO RECIPI. + MUESTRA APISONADA (gr)	PESO MUESTRA APISONADA (gr)	PESO UNITARIO APISONADO (gr/cm <sup>3</sup> )
1	2613.8	3000.0	7014.5	4400.70	1.467
2	2613.8	3000.0	7015.5	4400.00	1.467
3	2613.8	3000.0	7015.0	4400.00	1.467
<b>PROMEDIO</b>					<b>1.467</b>

**Tabla N° 23, Peso Unitario Compacto del Agregado Grueso.**

### 3.3.2.4 DESGASTE DE LOS ANDES ASTM C-131

**Tabla N° 24, Tabla Astm c-131 Según el Tamaño de Material que se tenga.**

METODO		A	B	C	D
DIAMETRO		CANTIDAD DE MATERIAL AEMPLEAR (gr)			
PASA	RETENIDO				
1 1/2"	1"	0			
1"	3/4"	0			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
<b>PESO TOTAL</b>		<b>5000±10</b>	<b>5000±10</b>	<b>5000±10</b>	<b>5000±10</b>
NUMERO DE ESFERAS		12	11	8	6
N°DE REVOLUCIONES		500	500	500	500
TIEMPO DE ROTACION		30	15	15	15

**Fuente:** fuente propia-procesamiento en gabinete.

**DATOS DE LABORATORIO**

METODO A		METODO B		METODO C		METODO D	
TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO
1"	1250	1/2"	2500	1/4"	2500	N°8	5000
3/4"	1250	3/8"	2500	N°	2500		
1/2"	1250						
3/8"	1250						

**Tabla N° 25, Resultado en Porcentaje Desgaste de Los Ángeles.**

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACION ASTM
A	5000	5000	0.00	35% MAX
B	5000	4016.5	19.67	35% MAX
C	5000	5000	0.00	35% MAX
D	5000	5000	0.00	35% MAX

OK!!!

**Fuente:** fuente propia-procesamiento en gabinete.

El porcentaje de desgaste no deberá exceder el 35 por ciento] cuando se ensaya de acuerdo con la norma ASTM C 131 o ASTM C 535.

### 3.3.3 AGUA

#### 3.3.3.1 Agua para la práctica

El agua con la que se trabajó para el hormigón y para el proceso de curado es agua potable limpia y libre de aceites, sales, ácidos, álcalis, azúcar, vegetales u otras sustancias perjudiciales para el producto terminado El agua se someterá a ensayos de acuerdo con los requisitos de la norma. Se podrá utilizar agua con calidad de potable sin necesidad de realizar ensayos.

El agua en uso cuenta con las siguientes características:

- PH  $\geq$  5
- Material soluble 15 gr/ltr.
- Material en suspensión 5gr. /ltr.

### 3.3.4 CEMENTO

#### 3.3.4.1 PESO ESPECÍFICO DEL CEMENTO

Tabla N° 26, *Peso Específico del Cemento.*

ENSAYO N°:	TIPO DE CEMENTO:	PESO DE LA MUESTRA [gr]	VOL. INICIAL: [ml]	TEMP. INICIAL: [°C]	VOL. FINAL [ml]	TEMP. FINAL: [°C]
1	IP 30	64	0.4	24	21.4	23.5
2	IP 40	64	0.6	25	21.85	24

Fuente: *fuentes propia-procesamiento en gabinete.*

#### 3.3.4.2 FINURA DEL CEMENTO

Tabla N° 27, *Resultados Obtenidos en Laboratorio para Finura de Cemento.*

DATOS OBTENIDOS EN LABORATORIO					
PARAMETRO	UNID.	OBSERVACIONES			Promedio de la finura del Cemento
Peso retenido en Tamiz N°40 + Peso de la Hoja (WN°40)	g	0.17	0.14	0.15	
Peso retenido en Tamiz N°200 + Peso de la Hoja (WN°200)	g	6.13	6.5	7.2	
Peso retenido en la Base + Peso de la hoja (Wb)	g	43.25	43.1	41.76	
Finura del Cemento (F)	%	12.6	13.28	14.7	

Fuente: *fuentes propia-procesamiento en gabinete.*

### 3.3.5 ACERO

#### Acero de refuerzo para transmisión de cargas:

Estas barras denominadas “pasa-juntas” - “pasadores” o “dovelas” deben cumplir con las especificaciones ASTM A 15, 16 y 160, además de lo especificado las Normas Bolivianas de Hormigón Armado CBH 17-87.

Barra lisa de 1” de diámetro, ésta es la que normalmente se emplea como pasador en el pavimento rígido. En el medio para la realización de la investigación se procedió al corte con máquinas industriales con bastante precisión  $\pm 2\text{mm}$  en barras de 30cm. Pues la mencionada llega en barras de 12 m de longitud.

**Foto N° 9, Dovelas Lisas de 1 Pulgada.**



**Fuente:** *fuentes propia*

### 3.4 DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA DE HORMIGÓN DE PAVIMENTO

#### 3.4.1 Dosificación ACI-211.1

El método del American Concrete Institute se basa en tablas empíricas mediante las cuales se determinan las condiciones de partida y la dosificación.

En esta investigación se tomó la dosificación ACI 211, dado que está basada en la investigación experimental, se empieza por valores dados en tablas, al dosificar se da un porcentaje más por pérdidas, sus tablas son fáciles de manejar y entender, su procedimiento es rápido, confiable, en el tema de aditivos tiene los valores para adoptar.

##### a) Determinación de la razón Agua/Cemento

La Tabla 1 define la razón agua/cemento en función de la resistencia media y especificada para el hormigón, respectivamente, en probetas cilíndricas.

<b>Tabla # 1 Relación entre la razón Agua /cemento y la resistencia promedio a compresión del hormigón (ACI 211,1-Rev.85)</b>			
<b>Resistencia promedio a compresión a 28 días</b>		<b>Razón agua/cemento (en masa)</b>	
<b>Mpa</b>	<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>Sin aire incorporado</b>	<b>Con aire incorporado</b>
<b>45</b>	450	0,38	-
<b>42</b>	420	0,41	-
<b>40</b>	400	0,43	-
<b>35</b>	350	0,48	0,4
<b>30</b>	300	0,55	0,46
<b>28</b>	280	0,57	0,48
<b>25</b>	250	0,62	0,53
<b>21</b>	210	0,68	0,59
<b>20</b>	200	0,7	0,61
<b>15</b>	150	0,8	0,71
<b>14</b>	140	0,82	0,74

**Tabla N° 28, Determinación de la Razón Agua / Cemento**

Se escogió la resistencia a la compresión de 35 Mpa o 350 Kg/cm<sup>2</sup> para llegar a la resistencia a flexión de 4 Mpa o 40 Kg/cm<sup>2</sup>, establecidos por norma y que están dados por la ABC para pavimentos rígidos, ya que a mayor rango a estos son para de arte de mayor envergadura como puentes, etc. y menores a estos para estructuras de viviendas, en esta investigación se tomó un dato entre estos rangos establecidos para pavimentos rígidos. Se busca tener la menor relación agua/cemento posible, aspecto que influye en la trabajabilidad.

#### b) Determinación de la fluidez

La fluidez que se desea otorgar al hormigón queda definida en este método en base al asentamiento de cono, el que se puede establecer usando como referencia la Tabla 2. Esta Tabla define un rango aceptable de asentamientos para diversos tipos de elementos estructurales. Debe señalarse que esta definición es relativamente imprecisa, pues, por una parte, el rango señalado es bastante amplio y, por otra, la gama de elementos estructurales considerados es restringida y delimitada en forma poco precisa. Se establece para este estudio **4cm.** de revenimiento

<b>Tabla # 2 Asentamientos de cono recomendado para diferentes tipos de construcción (ACI 211,1-Rev.85)</b>	
<b>Tipo de construcción</b>	<b>Rango de asentamiento de cono (cm)</b>
<b>Fundaciones armadas y bases</b>	2 – 8
<b>Fundaciones y muros de sub-estructura simple</b>	2 – 8
<b>Vigas y muros armados</b>	2 – 10
<b>Columnas de edificios</b>	2 – 10
<b>Pavimentos y losas</b>	2 – 8
<b>Hormigón masivo</b>	2 – 8

**Tabla N° 29, Determinación del Tipo de Asentamiento**



### c) Determinación de la dosis de agua

Se emplea la Tabla # 3, que establece la cantidad de agua expresada en l/m<sup>3</sup> de hormigón colocado y compactado, en función del asentamiento de cono definido y del tamaño máximo nominal determinados anteriormente.

Se debe distinguir el caso del empleo de aire incorporado, ya que éste permite una reducción de la dosis de agua por su efecto plastificador. Esta misma parte de la tabla puede emplearse en el caso de haber previsto el uso de un aditivo plastificador.

<b>Tabla # 3 Requerimientos aproximados para dosis de agua (l/m<sup>3</sup>) y contenido de aire (%) para diferentes trabajabilidades y tamaños máximos nominales de áridos (ACI 211,1-Rev.85)</b>								
<b>Trabajabilidad (cm)</b>	<b>Tamaño máximo nominal del árido (mm)</b>							
	10	12,5	20	25	40	50	70	150
<b>Hormigón sin aire incorporado</b>								
<b>3 – 5</b>	205	200	185	180	160	155	145	125
<b>8 – 10</b>	225	215	200	195	175	170	160	140
<b>15 – 18</b>	240	230	210	205	185	180	170	-
<b>Cantidad de aire atrapado aproximado (%)</b>	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
<b>Hormigón con aire incorporado</b>								
<b>3 – 5</b>	180	175	165	160	145	140	135	120
<b>8 – 10</b>	200	190	180	175	160	155	150	135
<b>15 – 18</b>	215	205	190	185	170	165	160	-
<b>Cantidad de aire total promedio recomendada (%)</b>								
<b>Exposición suave</b>	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1
<b>Exposición moderada</b>	6	5,5	5	4,5	4,5	4	3,5	3
<b>Exposición extrema</b>	7,5	7	6	6	5,5	5	4,5	4

**Tabla N° 30, Determinación Aproximada para Dosis de Agua y Contenido de Aire**

#### d) Determinación de la dosis de cemento

La dosis de cemento se determina en base al cociente entre la dosis de agua determinada y la razón agua/cemento definida.

En el caso de haberse previsto el empleo de un incorporador de aire, la cantidad de aire incorporado debe sumarse a la dosis de agua para el efecto del cálculo de la dosis de cemento.

$$C = \frac{(W + a)}{W/C} \quad (\text{kg}/\text{m}^3)$$

#### e) Determinación de la dosis de grava

Se determina a partir de la Tabla # 4, en función del módulo de finura de la arena y al tamaño máximo nominal.

<b>Tabla # 4 Volumen aparente de árido grueso seco por metro cubico de hormigón (ACI 211,1-Rev.85)</b>				
<b>Tamaño máximo nominal del árido (mm)</b>	<b>Volumen aparente seco compactado de árido grueso para distintos Módulos de finura de la arena.</b>			
	2,4	2,6	2,8	3
<b>10</b>	0,50	0,48	0,46	0,44
<b>12,5</b>	0,59	0,57	0,55	0,53
<b>20</b>	0,66	0,64	0,62	0,60
<b>25</b>	0,71	0,69	0,67	0,65
<b>40</b>	0,75	0,73	0,71	0,69
<b>50</b>	0,78	0,76	0,74	0,72
<b>75</b>	0,82	0,80	0,78	0,76
<b>150</b>	0,87	0,85	0,83	0,81

**Tabla N° 31, Determinación de la Dosis de Grava**

## f) Determinación de la dosis de arena

### Método Volumétrico:

Se determina partiendo del hecho que la suma de los volúmenes absolutos de agua, cemento, aire incorporado (o atrapado), grava y arena debe ser igual a un metro cúbico. Ello permite definir el volumen absoluto de arena, el cual, multiplicado por la densidad real (peso específico) de la arena, conduce al valor de la dosis de arena, expresada en kilos por metro cúbico.

La masa de árido fino o arena,  $A_f$ , está dada por:

$$A_f \quad [\text{kg/m}^3] = \gamma_f \left[ 1000 - \left( W + \frac{C}{\gamma} + \frac{A_g}{\gamma_g} + 10a \right) \right]$$

Que:

$\gamma_f$  = densidad real sss o peso específico del árido fino (arena).

$\gamma$  = peso específico del cemento

$A_g$  = dosis de árido grueso o grava

$a$  = dosis de aire (%)

$\gamma_g$  = densidad real sss o peso específico del árido grueso (grava).

$C$  = dosis de cemento (kg/m<sup>3</sup>)

$W$  = dosis de agua (kg/m<sup>3</sup>)

## g) Ajuste de la Dosificación

<b>DOSIFICACIÓN MÉTODO ACI.</b>			
Resistencia a compresión a los 28 días del hormigón (kg/cm <sup>2</sup> )		350	
DATOS DE LABORATORIO			
Peso específico del cemento			
Cemento Portland El Puente		3.14	
(gr/cm <sup>3</sup> )=		3.05	
Peso específico aparente			
Arena (gr/cm <sup>3</sup> ) =	2.60	TM (mm) =	20
Grava (gr/cm <sup>3</sup> ) =	2.68	TMN (mm) =	20
Peso Unitario compactado		Porcentaje de Absorción	
Arena (gr/cm <sup>3</sup> ) =	1.654	% Absorción de Arena =	2.20
Grava (gr/cm <sup>3</sup> ) =	1.754	% Absorción de Grava =	1.66
Peso Unitario suelto		Contenido de Humedad de los agregados	
Arena (gr/cm <sup>3</sup> ) =	1.579	% Humedad de Arena =	1.1
Grava (gr/cm <sup>3</sup> ) =	1.265	% Humedad de Grava =	0.44
Modulo de Finura			
Arena =	2.61		
Grava =	6.99		

Tabla N° 32, Dosificación Método ACI.

<b>CÁLCULO DE LA DOSIFICACIÓN</b>			
Asentamiento (cm) =	4	Tabla # 2	
Tamaño máximo nominal (mm) =	20		
Contenido de aire (%) =	2	Tabla # 3	
Agua de mezclado (lt/m <sup>3</sup> ) =	185	Tabla # 3	
<b>Resistencia de diseño</b>			
Debido a que se tiene un control en los materiales se puede asumir una desviación estándar de (30)			
Se adopta la mayor resistencia.			
f''c ≤ 350 kg/cm <sup>2</sup>	f''cr = f''c + 1,34 * Ss	390.2	kg/cm <sup>2</sup>
	f''cr = f''c + 2,33 Ss - 35	384.9	kg/cm <sup>2</sup>
La norma ACI recomienda también lo siguiente			
No se tomará en cuenta por esto no es económico y es cuando no se tiene el control adecuado en los materiales.			
f''c < 210 kg/cm <sup>2</sup>	f''cr = f''c + 70 =	420	
	Razón agua/cemento	0.48	(Tabla # 1)
<b>Contenido de cemento</b>			
Cemento (kg/m <sup>3</sup> ) =	385.42		
Volumen de agregado grueso por volumen unitario de hormigón			
Volumen de agregado grueso (m <sup>3</sup> ) =	0.64	De Tabla # 4	
Peso de agregado grueso (kg/m <sup>3</sup> ) =	1122.56		
<b>Volumen de materiales si considerar agregado fino (m<sup>3</sup>)</b>			
Material	Peso seco	P. Específico	Volumen
Agua (kg/m <sup>3</sup> ) =	185	1000	0.185
Cemento (kg/m <sup>3</sup> ) =	385.42	3050	0.126
Grava (kg/m <sup>3</sup> ) =	1122.56	2680	0.419
Aire (%) =	1.5	-	0.015
		V. total (m <sup>3</sup> )	0.745
<b>Determinación del Volumen de agregado fino</b>			
Vol. agregado fino (m <sup>3</sup> ) =	0.255		
Peso agregado fino (kg/m <sup>3</sup> ) =	663		

**Tabla N° 33, Cálculo de la Dosificación Método ACI.**

<b>DISEÑO EN ESTADO SECO</b>				
<b>Material</b>	<b>Peso seco</b>	<b>Relación de mezcla</b>		
Agua (kg/m <sup>3</sup> ) =	<b>185</b>			
Cemento (kg/m <sup>3</sup> ) =	<b>385.42</b>	Cemento	Arena	Grava
Grava (kg/m <sup>3</sup> ) =	<b>1122.56</b>	1	1.72	2.91
Arena (kg/m <sup>3</sup> ) =	<b>663</b>			
Aire (%) =	<b>1.5</b>			

**Tabla N° 34, Diseño en Estado Seco**

<b>CORRECCIÓN POR HUMEDAD</b>	
Para agregado fino (kg/m <sup>3</sup> ) =	702.78
Para agregado grueso (kg/m <sup>3</sup> ) =	1145.01
Agua en el agregado fino (lt/m <sup>3</sup> ) =	3.8
Agua en el agregado grueso (lt/m <sup>3</sup> ) =	-7.8

**Tabla N° 35, Corrección por Humedad**

<b>DISEÑO EN ESTADO HÚMEDO</b>	
<b>Material</b>	<b>Peso Húmedo</b>
Agua (kg/m <sup>3</sup> ) =	<b>181</b>
Cemento (kg/m <sup>3</sup> ) =	<b>385.42</b>
Grava (kg/m <sup>3</sup> ) =	<b>1145.01</b>
Arena (kg/m <sup>3</sup> ) =	<b>702.78</b>
Aire (%) =	<b>1.5</b>

**Tabla N° 36, Diseño en Estado Húmedo**

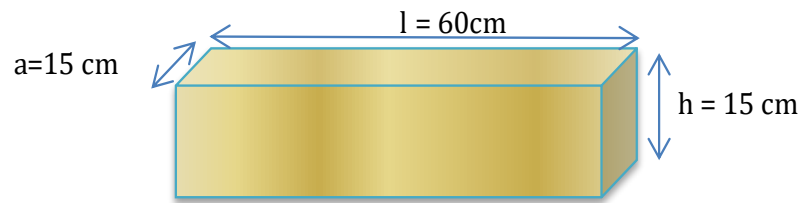
**PARA 3 VIGAS (L=60cm) PROBETAS DE PRUEBA**

**DISEÑO DE LA DOSIFICACIÓN EN ESTADO HÚMEDO**

<b>Material</b>	<b>Peso Húmedo</b>
Agua (kg/m <sup>3</sup> ) =	7.33
Cemento (kg/m <sup>3</sup> ) =	15.61
Grava (kg/m <sup>3</sup> ) =	46.37
Arena (kg/m <sup>3</sup> ) =	28.46

**Tabla N° 37, Diseño de la Dosificación en Estado Húmedo 3 vigas**

## DIMENSIONES DEL MOLDE UTILIZADO PARA PROBETAS DE PRUEBA



$$V = h * l * a$$

Volumen del molde =  $13500\text{ cm}^3 \cong 1,35\text{E-}02\text{ m}^3$

### PARA 18 VIGAS (L=60cm) FINAL

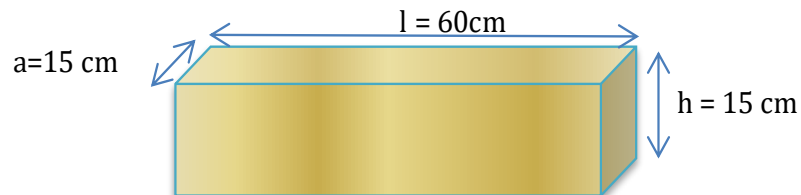
#### DISEÑO DE LA DOSIFICACIÓN EN ESTADO HÚMEDO

Material	Peso Seco
Agua (kg/m <sup>3</sup> ) =	44
Cemento (kg/m <sup>3</sup> ) =	93.66
Grava (kg/m <sup>3</sup> ) =	278.24
Arena (kg/m <sup>3</sup> ) =	170.76

**Tabla N° 38,** Diseño de la Dosificación en Estado Húmedo 18 vigas

## DIMENSIONES DEL MOLDE UTILIZADO PARA EL TOTAL DE PROBETAS

### Dosificación Aconsejada por molde



$$V = h * l * a$$

Volumen del molde =  $13500\text{ cm}^3 \cong 1,35\text{E-}02\text{ m}^3$

### 3.4.3 RESULTADOS DE DOSIFICACIÓN PARA TODOS LOS MOLDES

**Tabla N° 39, Dosificación para 18 Moldes Tipo Viga.**

Dosificación Aconsejada por molde		
Material	Por molde	total moldes
Cemento (Kg)	2.50	44
Agua (lts)	5.20	94
Arena (kg)	9.50	171
Gravilla (kg)	0	0
Grava (Kg)	15.5	278

**Fuente:** *fuentes propia*

### 3.5 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES PARA LA INVESTIGACIÓN

- **Toma de muestras del hormigón fresco.**

Como ya se ha dicho, vamos a fabricar probetas rectangulares de dimensiones 15\*15\*60 cm, de hormigón, compuestas por una parte del mismo y además de la barra lisa que normalmente se usa como pasador (dovela) en el pavimento rígido.

- **Ensayos de consistencia.**

**Cono de Abrams:** se utiliza un molde sin fondo de forma troncocónica, provisto de dos asas para manipularlo, con unas dimensiones interiores específicas, se coloca el molde sobre una superficie plana, rígida e impermeable. Se humedece el interior del molde y la superficie. Se introduce el hormigón y enrasa la superficie. Se desmolda inmediatamente, levantando el cono despacio y en dirección vertical sin sacudidas y medimos el punto más alto de la masa asentada.

La medida de la consistencia de un hormigón fresco por medio del cono de Abrams es un ensayo sencillo de realizar en obra, no requiere equipo costoso ni personal especializado. Según el descenso de la superficie superior del hormigón,



denominado ‘asiento’ se puede clasificar la consistencia del hormigón de acuerdo con los valores indicados en la planilla N° 36.

**Tabla N° 40, Clasificación de la Consistencia del Hormigón en Función del Asentamiento.**

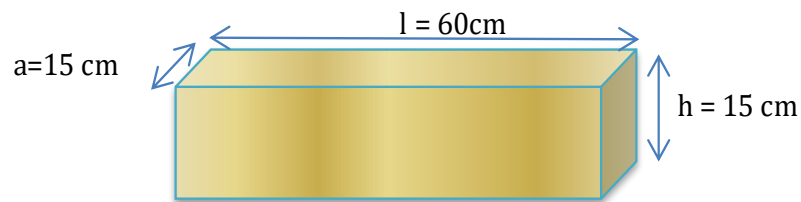
Asiento (cm)	Consistencia
0 – 2	Seca
3 – 5	Plástica
6 – 9	Blanda
10 – 15	Fluida

**Fuente:** *fuentes tablas aci 211*

### 3.5.1 PROBETAS DE PRUEBA

Previo al vaciado de las vigas con dovelas se procedió al vaciado de probetas de prueba para comprobar la dosificación y consistencia de la misma.

Estas fueron realizadas en laboratorio de suelos y hormigones de la U.A.J.M.S. con dimensiones de 15cm x 15cm x 60 cm.



En estos tres especímenes realizados se pudo evidenciar la baja trabajabilidad por el menor contenido de agua que se usó en base a dosificación ACI-211. Las vigas moldeadas fueron dejadas en reposo por 24 horas; para luego proceder al desmoldado y curado de las mismas, para este caso por siete días para luego realizar el ensayo a flexión en estas probetas.

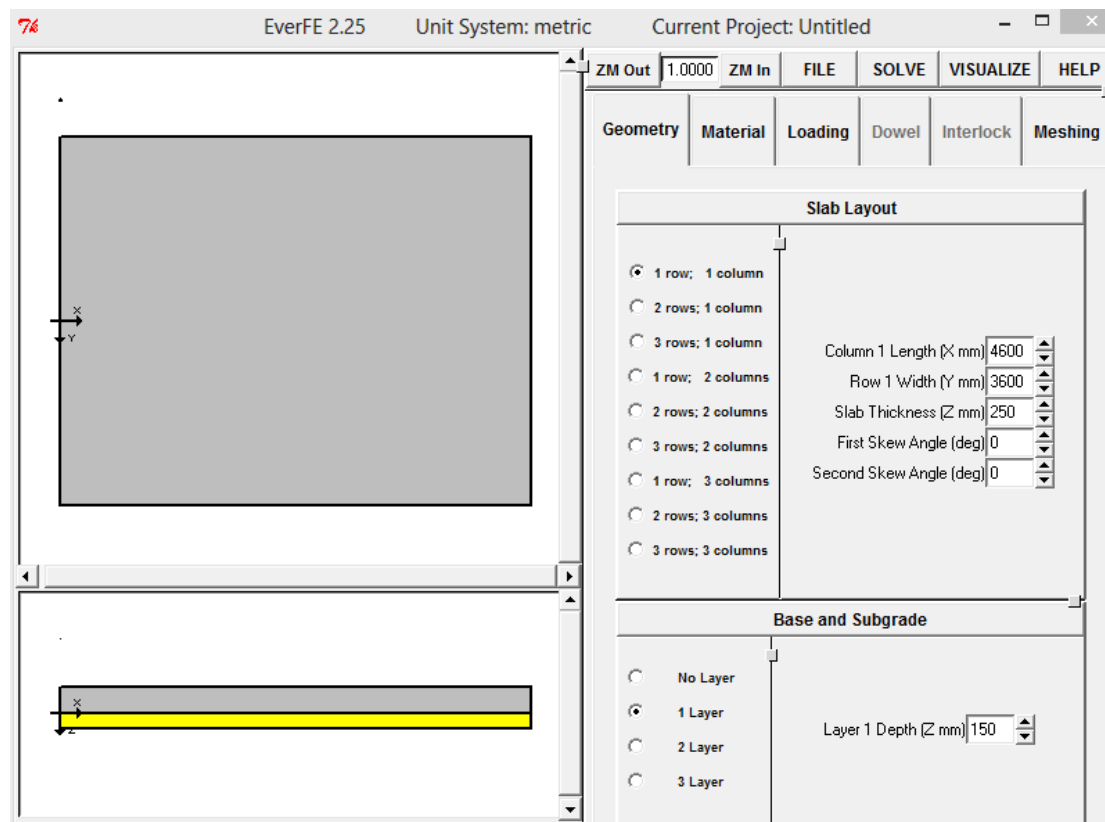
Al ensayar estas probetas pudimos obtener valores referenciales en resistencia y carga para nuestra investigación a realizar.

### 3.5.2 LOSA DE PAVIMENTO RÍGIDO MODELADA EN EVERFE 2.25

#### 3.5.2.1 DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS EN LOSAS DE PAVIMENTO RÍGIDO

A continuación, se presentará la creación de los modelos de prueba, en estos se realizó una configuración de 1 losa (3.5m X 4m) que están en dos capas base y subrasante que se somete a una combinación de carga de eje de rueda y térmica, generando la solución e interpretando los resultados de la simulación.

FIGURA N° 28, Inicio del Programa EverFe.



*Fuente, elaboración propia en software EverFe 2.25.*

##### 3.5.2.1.1 CREAR UN NUEVO PROYECTO

Para crear un nuevo proyecto, seleccione **Nuevo (New)** en el menú **Archivo (File)**. Esto abrirá un submenú que contiene las opciones de **Métricas e Inglés**. Al seleccionar cualquiera de estas opciones se iniciará un nuevo proyecto sin título en el sistema de la unidad apropiada.

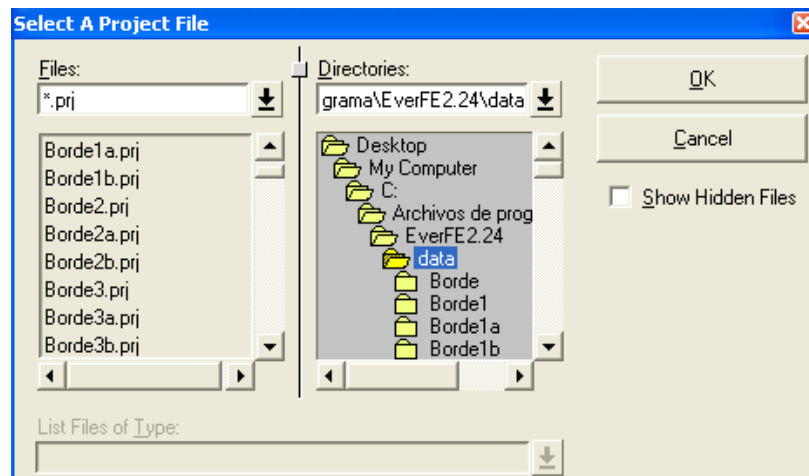
### 3.5.2.1.2 GUARDAR UN PROYECTO

Hay dos opciones para guardar un proyecto: **Guardar (Save)** y **Guardar como (Save as)**.

La opción **Guardar Como** debe utilizarse para guardar un proyecto sin título que se inició con el comando de menú **Nuevo (New)**, y también se puede utilizar para guardar el proyecto actual con un nuevo nombre. Cuando se selecciona en el menú **Guardar Como**, aparecerá el cuadro de diálogo de archivos que se muestra a continuación en la Figura 25. En la parte izquierda del panel de diálogo de Files (archivos) muestra los archivos con la extensión .prj que corresponden a cada proyecto guardado. La lista de directorios en el centro del cuadro de diálogo muestra que los resultados de todos los análisis se escriben en un sub directorio separado con el mismo nombre que el proyecto; nunca hay necesidad de utilizar la lista de directorios.

Para **guardar** el proyecto con un nuevo nombre, se escribe el nombre del proyecto (con o sin la extensión prj.) En el cuadro **Files** en la parte superior izquierda del cuadro de diálogo y se da clic en **Aceptar (OK)**.

**FIGURA N° 29**, Cuadro de Dialogo de Archivos.



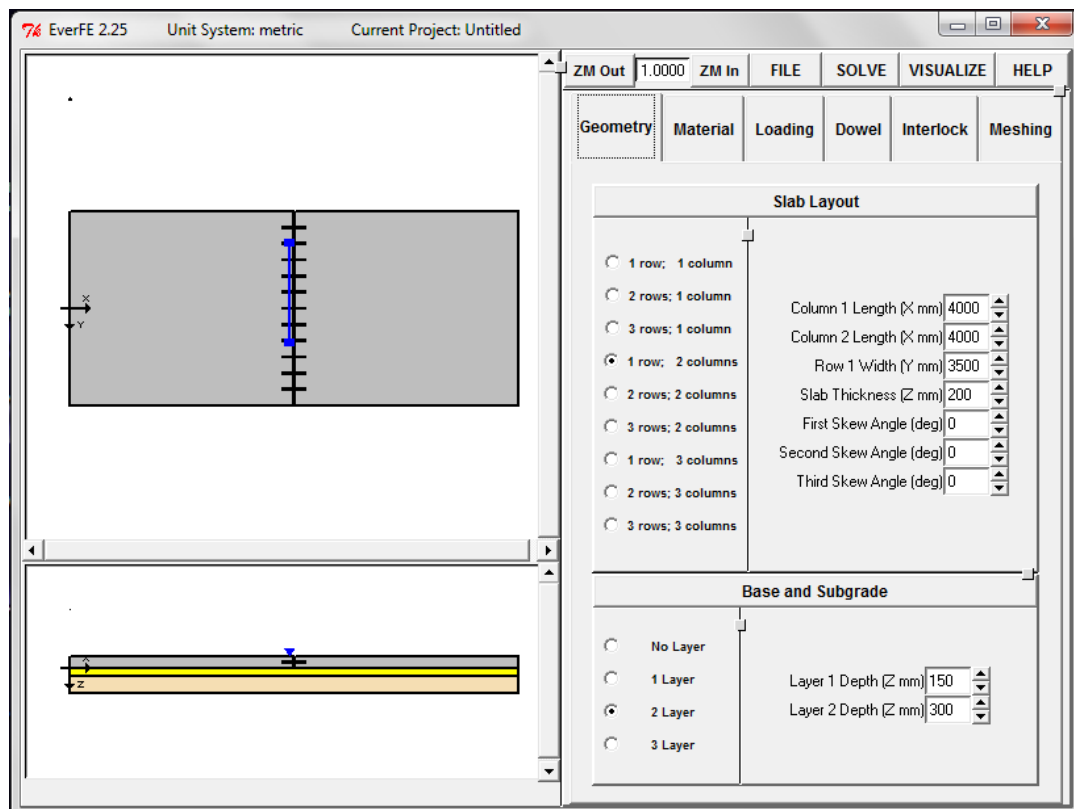
*Fuente, elaboración propia en Software EverFe 2.25.*

En estas pruebas nombraremos a los archivos según sea la posición crítica a evaluar, Losa con dovelas rectas, inclinada horizontal e inclinada vertical.

La segunda opción en el menú de Archivo es **Guardar (Save)**, que le permite guardar rápidamente el proyecto actual con su nombre actual. Si no existe una solución para el proyecto actual, seleccione **Guardar** y se guardará los parámetros del proyecto actual, tal como aparecen en los paneles entrada. Sin embargo, si la opción **Guardar** se utiliza cuando existe una solución, aparecerá un pequeño cuadro de diálogo que le advierte al salvar el modelo actual se eliminará la solución actual. Esto es necesario para asegurar que la solución siempre corresponde a los parámetros del modelo guardados.

### 3.5.2.1.3 GEOMETRÍA

**FIGURA N° 30**, Panel de Geometría para la Creación de Modelos.



*Fuente, elaboración propia en Software EverFe 2.25.*

El panel de la geometría permite la especificación de la dimensión básica del sistema de pavimento rígido, y se divide en dos sub paneles: en las losas de diseño y en las capas de base/subrasante.

Cualquier cambio en la geometría del sistema se refleja inmediatamente en la planta y en elevación que se muestra en la parte izquierda del panel de entrada de EverFE. Las vistas en planta y elevación se pueden ampliar haciendo clic en los botones **ZM Out** y **ZM In** que están en la parte superior central del panel de entrada, o la introducción manual de un factor de escala. El factor de escala por defecto es 1,00.

#### **a) DISEÑO DE LOSA**

Las casillas de control a la izquierda del cuadro secundario (**Slab Layout**) se utilizan para seleccionar el número de filas y columnas en cada modelo. Los cuadros de entrada a la derecha del sub panel permiten la especificación detallada de la dimensiones de las losas (longitud, ancho, espesor y ángulo de inclinación). La anchura (dimensión y) de cada fila de losas se supone constante, como es la longitud (dimensión x) de cada columna de las losas.

El origen del sistema de coordenadas empleado por EverFE siempre se muestra en la vista en planta y elevación, y está situado en el borde izquierdo de la losa y en la parte inferior de la losa. En el eje y es positivo hacia abajo, y en las coordenada del eje z la parte superior del espesor de las losas es negativo.

Realizaremos pruebas para **3 losas de 350cm x 400cm**, la que tendrá una superficie geométrica rectangular y tendrán una **posición de las dovelas rectas, con dovelas inclinadas horizontales y dovelas inclinadas verticales con un espesor constante de 20 cm.**

#### **b) GEOMETRÍA DE LA CAPA DE BASE Y SUBRASANTE**

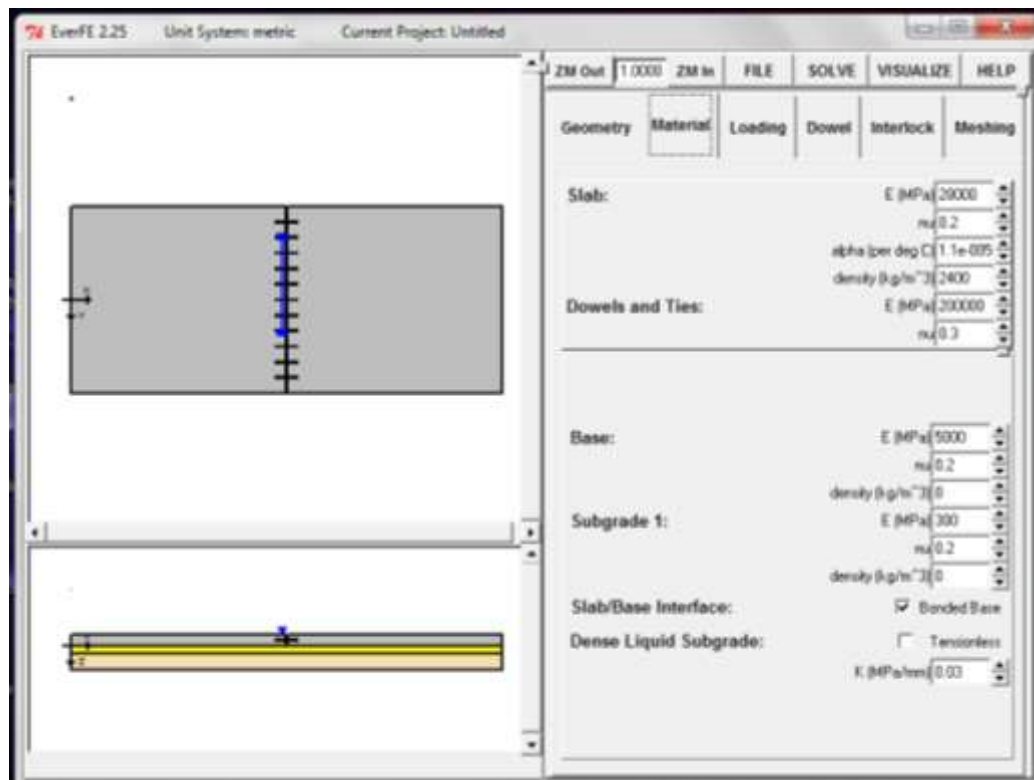
En el sub panel de base/subrasante, el usuario especifica el número de capas para ser consideradas (0-3) a través de casillas de control a la izquierda, y el espesor de cada capa de la derecha. La mayor parte de la capa superior se considera la capa de base, y

las segunda y tercera capas se designan subrasante 1 y 2. Siempre hay una fundación líquida (winkler) por debajo de la capa más inferior, y si no se especifican capas sólidas, las losas serán compatibles directamente con la fundación líquida. Para la realización de estas pruebas ocuparemos **una base de 20 cm de espesor**.

### 3.5.2.1.4 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Para visualizar el **panel de material** se hace clic en la pestaña **Material**. La ventana EverFE ahora aparecerá como se muestra en la Figura 27.

**FIGURA N° 31**, Panel de Material Durante la Creación de Modelos.



*Fuente, elaboración propia en Software EverFe 2.25.*

El panel material controla la especificación de las propiedades de los materiales para las losas de concreto, dovelas, las capas de base, la fundación líquida densa, y la interfaz de losa-base.

### a) PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE LA LOSA DE CONCRETO

El programa trata a las losas como sólidos linealmente elásticos, en él se debe especificar el módulo de elasticidad (E), la relación de Poisson ( $\nu$ ), el coeficiente de expansión térmica ( $\alpha$ ), y la densidad de la losa.

#### Parámetros utilizados

**Módulo de elasticidad (E)\*:** 28000 MPa

**Coefficiente de poisson ( $\nu$ ):** 0.20

**Coefficiente de expansión térmica ( $\alpha$ ):**  $1.1 \times 10^{-5}$

**Densidad de la losa:** 2400 kg/m<sup>3</sup>

\*En el programa no se puede introducir directamente el módulo de ruptura; el programa realiza la siguiente relación entre el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura. **Se utilizará un módulo de ruptura de 4.5 MPa.**

$$E = 9500 * MR$$

### b) PROPIEDADES DEL MATERIAL DE LAS DOVELAS (PASADORES)

Las barras pasajuntas son tratadas como vigas redondas, linealmente elásticas, y donde se debe especificar el módulo de elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Las barras no se someten a expansión o contracción térmica, y por lo tanto su coeficiente de expansión térmica se supone que es cero; usaremos los parámetros que el programa asigna por defecto presentado a continuación:

**Módulo de elasticidad (E):** 200000 MPa

**Coefficiente de Poisson ( $\nu$ ):** 0.3

### c) PROPIEDADES DEL MATERIAL DE LA CAPA DE BASE Y SUBRASANTE ELÁSTICAS

Cada capa de base y sub base se trata como un sólido elástico lineal. Cada capa tiene su propio módulo de elasticidad (E), relación de Poisson ( $\nu$ ) y densidad. La expansión y contracción térmica de cada capa base y sub base se supone que es cero. Por defecto, la densidad de cada capa se supone que es cero, aunque el usuario tiene la opción de especificar una densidad distinta de cero. Cada capa individual se supone que es perfectamente unida a la capa adyacente. Los parámetros que a continuación presentaremos pertenecen a una **Base Granular** y parámetros para la subrasante.

#### Parámetros utilizados para Base

**Módulo de elasticidad (E)** 5000 MPa

**Coefficiente de poisson ( $\nu$ )** 0.20

**Densidad de la base\*** 0 kg/m<sup>3</sup>

\*La densidad de cada capa el programa establece de forma predeterminada que es cero por no tener influencia en el resultado.

#### Parámetros utilizados para Subrasante

**Módulo de elasticidad (E)** 900 MPa

**Coefficiente de poisson ( $\nu$ )** 0.20

**Densidad de la base\*** 0 kg/m<sup>3</sup>

### d) Fundación líquida (subrasante)

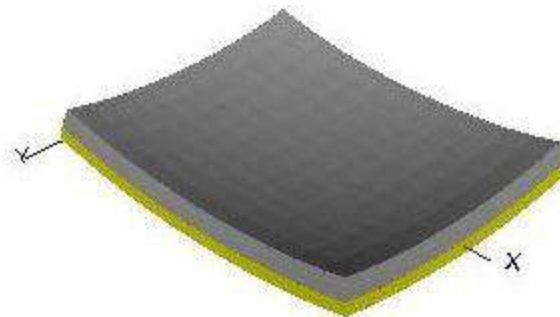
Esta capa se utiliza el usual “valor k” usado en el diseño de pavimento rígido, y tiene unidades de MPa/mm o kips/in<sup>3</sup>. **Utilizaremos un valor de 83 Mpa/m.**



### e) Interfaz Base/Losa

Si se incluyen una o más capas de base por debajo de la losa, el programa permite definir la interacción entre la losa y la base, lo que puede afectar en gran medida los resultados del modelo. Por defecto, la interfaz está unida, es decir, un contacto perfecto se mantiene en la interfaz entre la parte inferior de la losa y la parte superior de la base y es lo que utilizaremos en nuestro diseño.

**FIGURA N° 32**, Demostración de Capas de Losa y Bases Unidas.



*Fuente, elaboración propia en Software EverFe 2.25.*

### 3.5.2.1.5 CARGAS DE EJE DE RUEDA

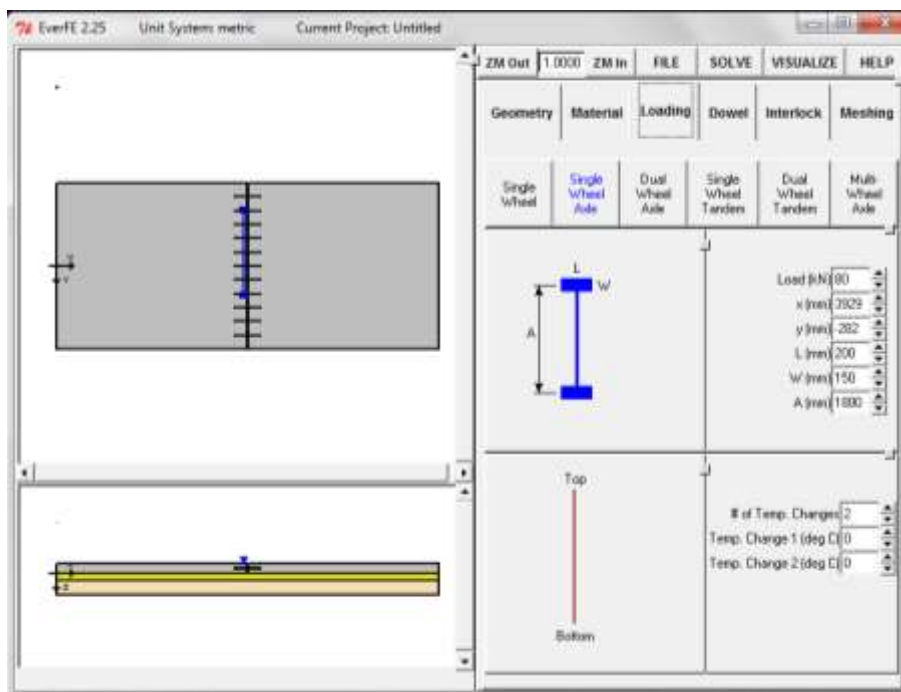
Se debe hacer clic en la pestaña **Loading** para que aparezca el **panel de carga**. En EverFE, ambas cargas de eje de rueda y por efectos térmicos pueden ser especificados similarmente a la **propiedad de los materiales**, la carga debido al peso propio de la losa se incluye por la especificación de una densidad de la losa diferente de cero. Las cargas de ejes de ruedas incluyen una sola rueda, eje de una sola rueda, eje de doble rueda, en tándem de una sola rueda, tándem de doble rueda y eje genérico de varias ruedas.

Todas las áreas de contacto de los neumáticos se tratan como rectangulares. En tanto el gradiente térmicos puede ser simuladas Lineal, bilineal y trilineal.

### a) Especificación de las cargas de las ruedas y los ejes

La cargas de eje de rueda se crean haciendo clic en cualquiera de los seis botones en la parte superior del panel de carga. La carga aparecerá automáticamente en azul en  $(x, y) = (0,0)$  en la vista en planta del sistema, y ahora se puede mover a cualquier posición deseada con el mouse. Cualquier rueda o eje de carga existente se puede destacar haciendo clic en él, lo que cambia su color de negro a azul. Para eliminar una carga existente, primero selecciónelo con un clic izquierdo del ratón y a continuación, haga clic de eliminar. Cuando se crea una carga, un gráfico aparece en el panel de carga que muestra la magnitud de la carga y de la geometría del eje de rueda, como se ilustra en la Figura 29. Aquí se da las opciones de introducir los valores deseados para todos los parámetros geométricos en las unidades apropiadas. Los parámetros geométricos **A**, **B**, **L**, **W** y **S** se detallan en el gráfico EverFE. Los **X** y **Y**. Los valores son las distancias desde el modelo de origen de coordenadas hasta el centro de gravedad del eje.

**FIGURA N° 33**, Definición de Carga de Eje de Rueda.



*Fuente, elaboración propia en Software EverFe 2.25.*

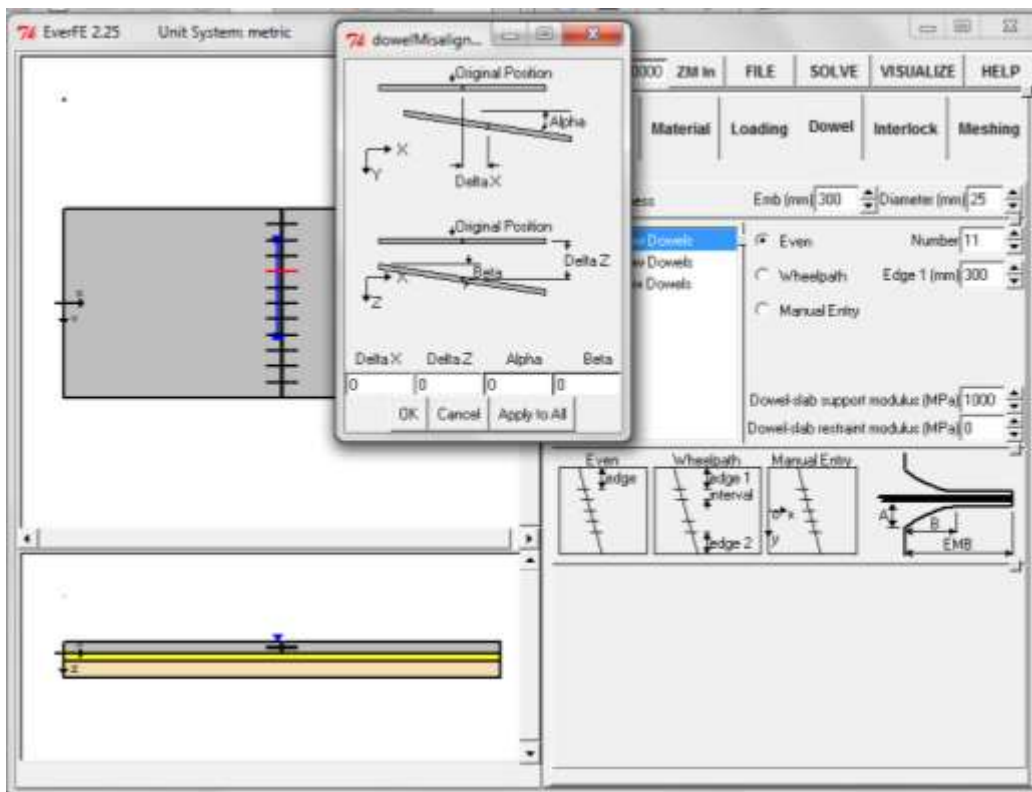
### 3.5.2.1.6 PROPIEDADES DE DOVELAS

Para Introducir los parámetros de Barras pasajuntas se debe hacer clic en la pestaña *Dowel*. Para este modelo ocuparemos los valores que por defecto ocupa el programa, en estas pruebas no ocuparemos dovelas, solamente las barras de amarre.

#### ■ Colocación manual del acero en el modelo

La ubicación del acero se puede especificar mediante la selección de la casilla de verificación *Entrada Manual (Manual Entry)*, en esta casilla quitaremos las dovelas de todas las filas del modelo.

**FIGURA N° 34**, Panel de Dovelas durante la Modelación.



*Fuente, elaboración propia en Software EverFe 2.25.*

### ■ Propiedades de rigidez de barras de amarre

*El programa nos pide colocar el módulo de soporte de losa-dovela; la cual es una rigidez de resorte distribuido, y puede ser considerado como el producto de la "módulo de soporte de dovelas" comúnmente utilizado y el diámetro de la dovela, de ahí sus unidades de MPa o kips/in<sup>2</sup>. En EverFE el valor predeterminado es de 1,000 Mpa. Mientras que el módulo de retención del sistema **módulo Losa-Dovela** es también una rigidez de resorte distribuido y controla el grado de deslizamiento horizontal relativo entre las barras y las losas. El valor predeterminado es 10,000 MPa.*

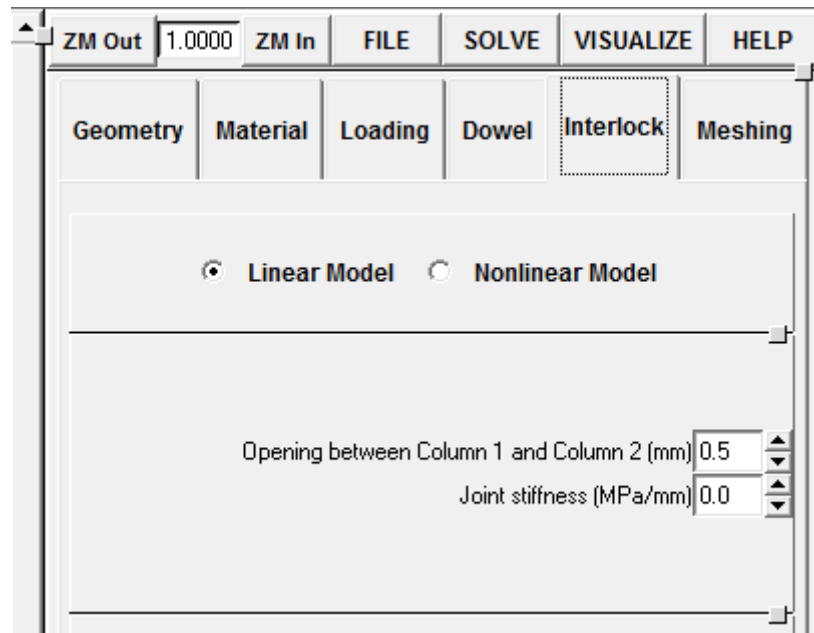
#### 3.5.2.1.7 TRABAZÓN DE AGREGADO

*EverFE tiene dos opciones básicas para especificar el comportamiento de trabazón de agregado en las juntas transversales: un modelo lineal, y un modelo no lineal. Cualquiera de estas opciones se selecciona con la casilla correspondiente en la parte superior del panel; el modelo por defecto es lineal.*

### ■ Modelo lineal de trabazón de agregados

*Seleccionar el modelo de trabazón de agregados lineal requiere que se especifique un valor único para la rigidez de juntas, parámetro que se aplica para cada junta transversal en el modelo de elementos finitos. Las unidades **de rigidez en las juntas** son rigidez/área (MPa/mm o kips/in<sup>3</sup>) similar a una rigidez de fundación líquida (valor  $k$ ). Además, se debe especificar una abertura de la junta independiente para cada junta transversal en el modelo (**apertura entre la Columna 1 y Columna 2; Apertura entre la Columna 2 y columna 3**). Los valores que ocuparemos para rigidez en la junta es el valor predeterminado de cero y la apertura de las juntas será de 0.5 mm.*

**FIGURA N° 35,** Opción de Entrada de Datos de Trabazón de Agregados.



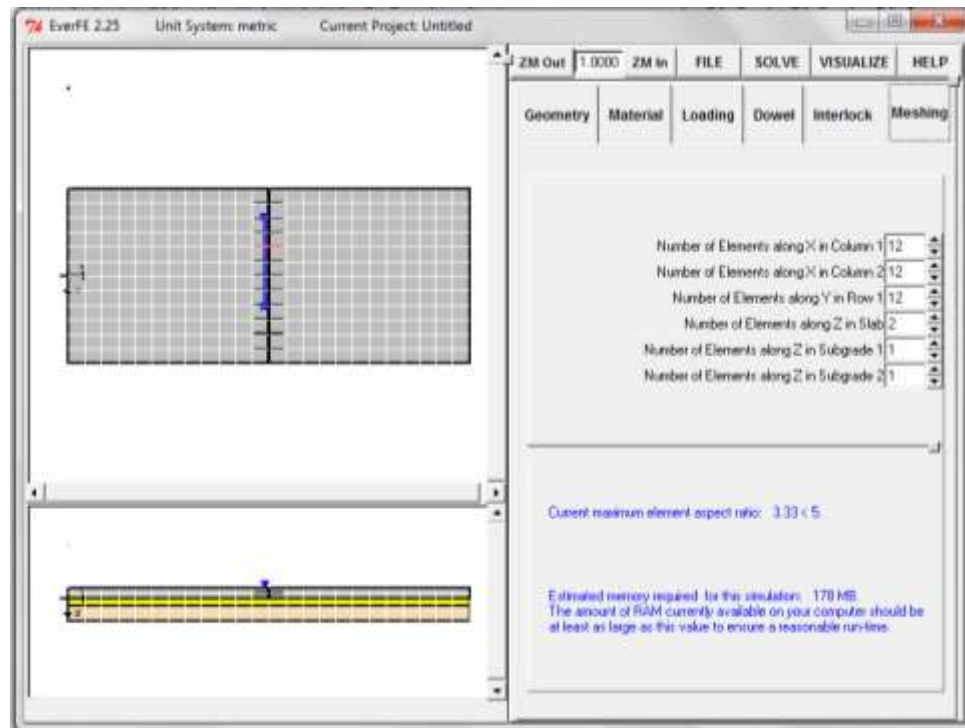
*Fuente, elaboración propia en Software EverFe 2.25.*

### 3.5.2.1.8 MALLADO

*La capacidad de especificar de forma independiente el número de divisiones de elementos en cada fila y columna puede ser muy útil cuando se modelan losas que no sean de interés primordial, ya que con menos elementos para estas partes del modelo pueden ahorrar tiempo de cálculo significativo. El mallado estará en función de que tan detallado se requiere el análisis.*

*También se proporciona una estimación de la cantidad de memoria necesaria para una simulación dada, y debe ser menor que la memoria RAM disponible de su equipo durante toda la simulación.*

**FIGURA N° 36,** Panel de Mallado Durante la Creación de Modelos.



*Fuente, elaboración propia en Software EverFe 2.25.*

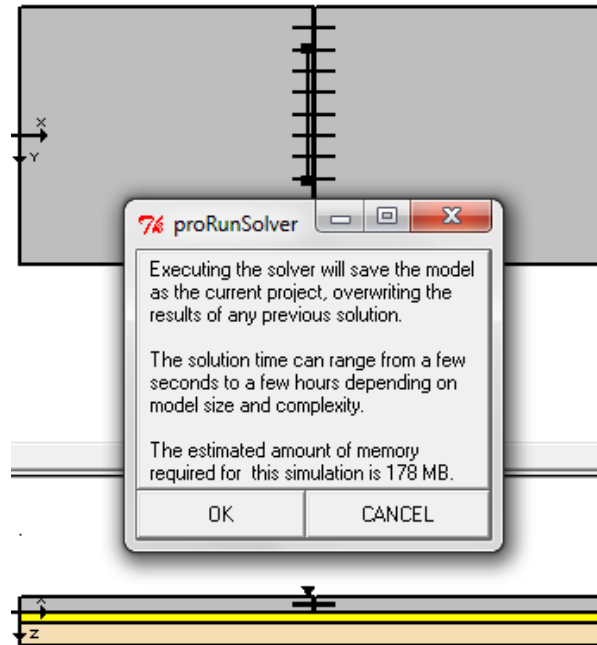
### 3.5.2.1.9 RESOLVER (SOLVE)

#### a) Ejecute el análisis de muestra (Run the Shown Analysis)

*Esta opción permite ejecutar el solucionador de EverFE para el modelo que se muestra en la configuración actual. Al ejecutar el análisis de muestra se selecciona a través del menú **Solver**, aparecerá un cuadro de diálogo como se muestra a continuación en la Figura 33. El cuadro de diálogo advierte que cualquier solución actual que existe para este proyecto se sobrescribe, y también da una estimación de la cantidad de memoria que se requiere para la simulación. En este punto, la iteración se puede cancelar o iniciar haciendo clic en **Aceptar (OK)**.*

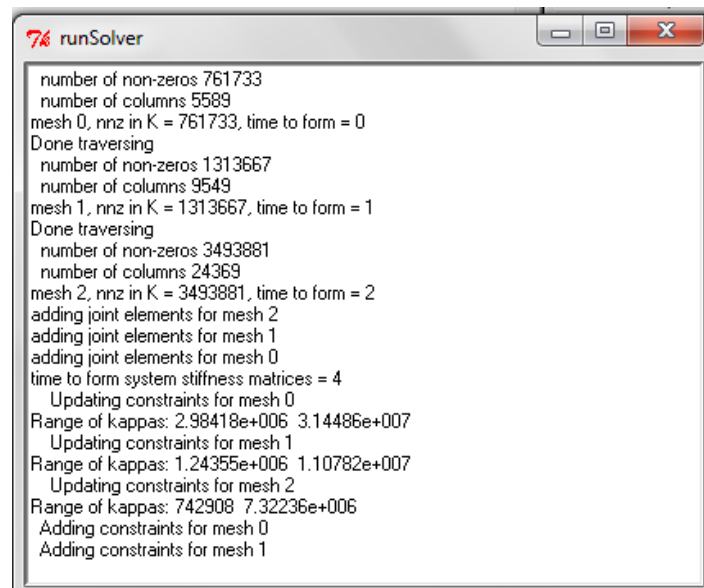
*Al iniciar el análisis, aparecerá un pequeño cuadro con un fondo blanco (ver Figura 34) que muestra información sobre el progreso del programa de solución de elementos finitos; este marco va a desaparecer una vez que se haya completado el análisis.*

**FIGURA N° 37,** Cuadro de Dialogo Ejecutar.



*Fuente, elaboración propia en Software EverFe 2.25.*

**FIGURA N° 38,** Progreso de la Solución de Elementos Finitos.

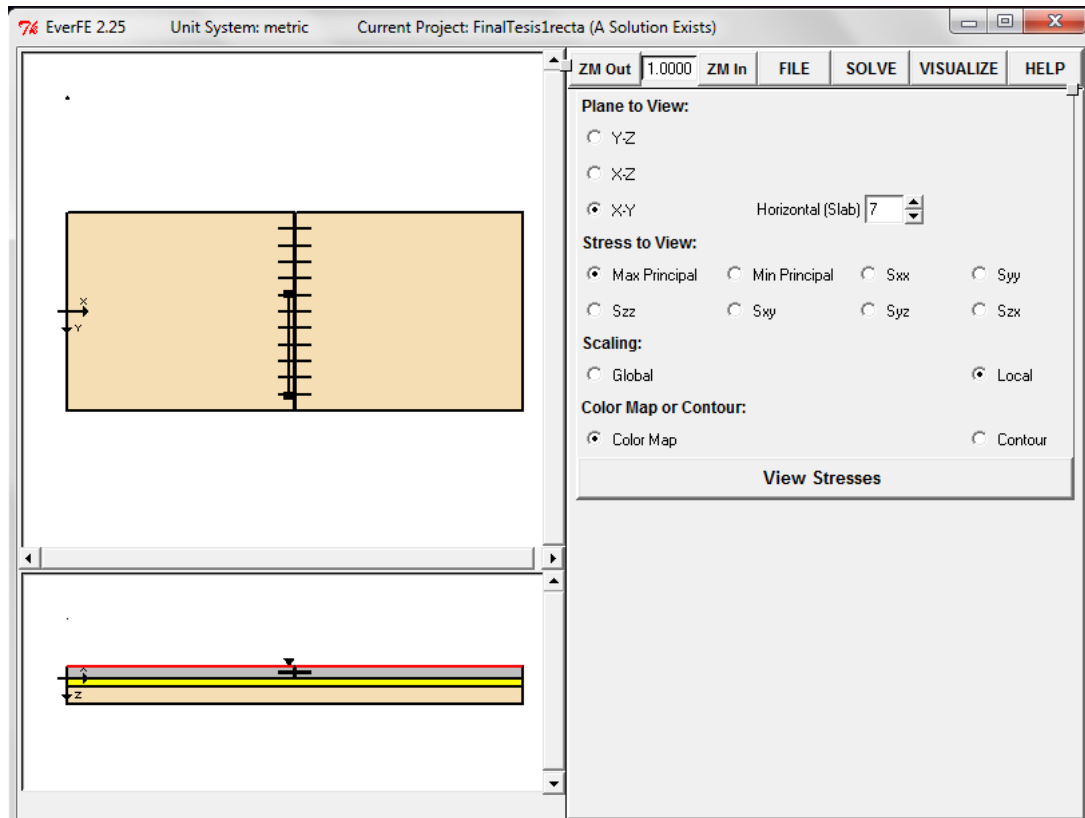


*Fuente, elaboración propia en Software EverFe 2.25.*

## b) RESULTADOS DEL PROGRAMA

Para visualizar de forma gráfica las tensiones, seleccione *stresses* en el menú *Visualizar*. Con ello se abre el panel de visualización de la tensión que se muestra a continuación en la Figura 35.

**FIGURA N° 39,** Ventana de Visualización de Esfuerzo.

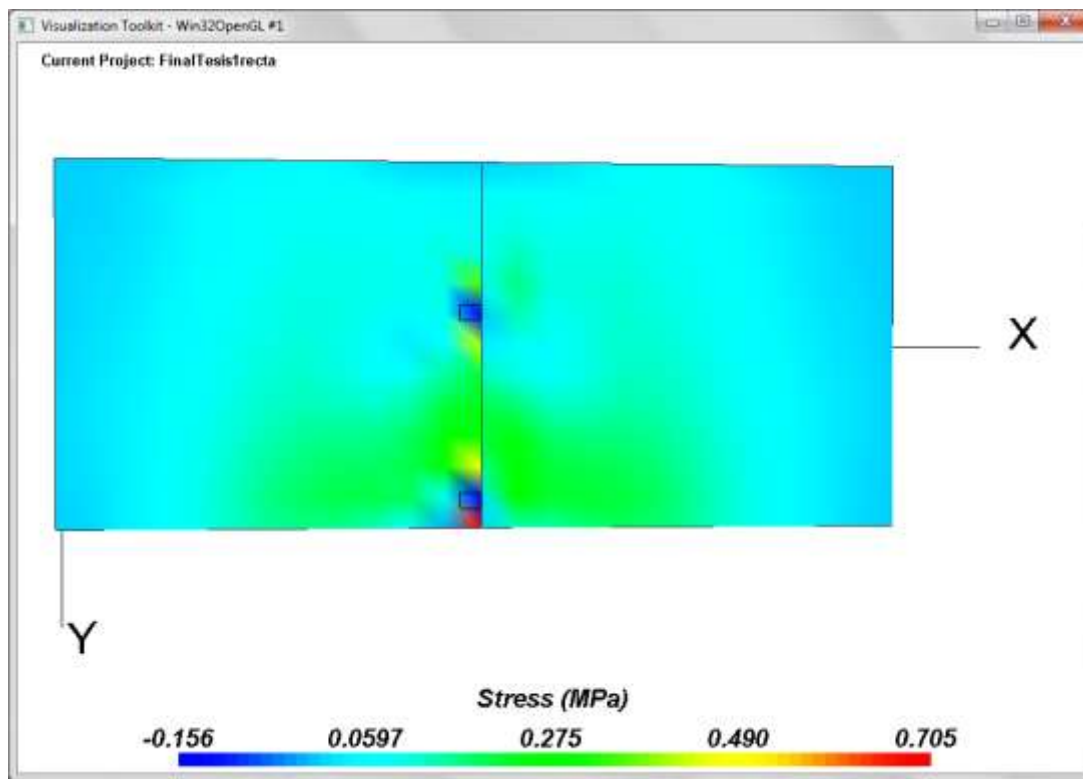


*Fuente, elaboración propia en Software EverFe 2.25.*

Para ver las tensiones en otros planos dentro de la losa, el programa brinda la opción de cambiar el plano **horizontal** a cualquier valor entre 3 (la parte inferior) y 7 (la parte superior), ya sea escribiendo un número en el cuadro de entrada o haciendo clic en las flechas.

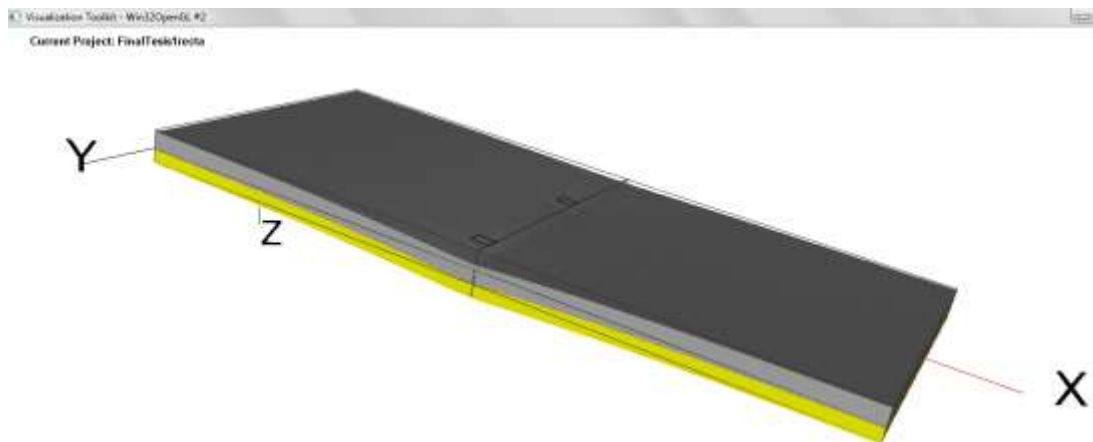


**FIGURA N° 40**, Máximo de Tensiones Principales en la Rodadura de la Losa.



*Fuente, elaboración propia en Software EverFe 2.25.*

**FIGURA N° 41**, Modelo 3D de la Deformación de la Losa.

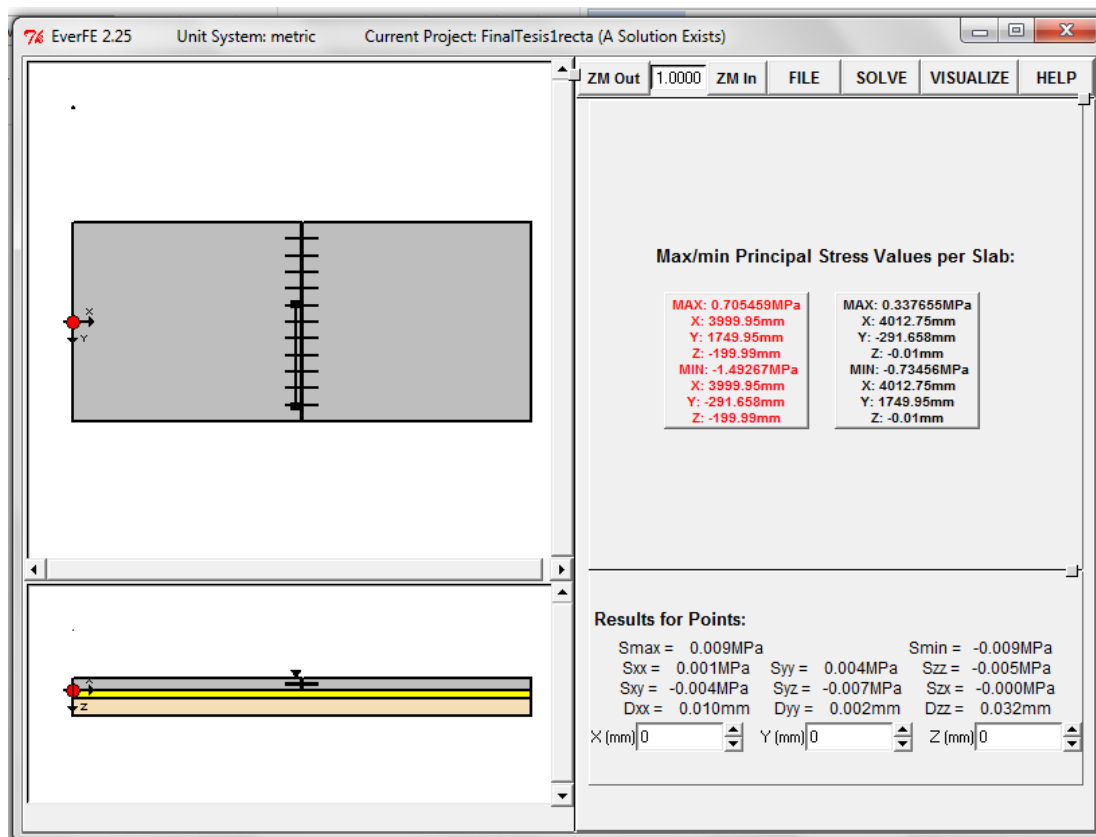


*Fuente, elaboración propia en Software EverFe 2.25.*

### 3.5.2.1.10 RESULTADOS DE ESFUERZOS MÁXIMOS ABSOLUTOS

EverFE permite la obtención de tensiones previstos en cualquier punto de las losas y la base, por medio de **resultados para los puntos (Results for Points)** del menú **Visualización**. Esto muestra el panel que se muestra a continuación en la Figura 38. El texto en cada rectángulo muestra los esfuerzos principales máximos y mínimos y su ubicación en la losa correspondiente; para la losa con la tensión principal máxima el texto está en rojo.

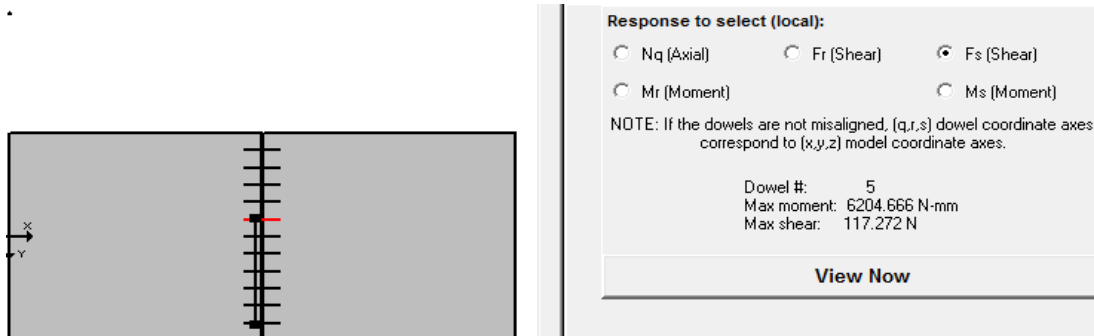
**FIGURA N° 42,** Esfuerzos Principales Mínimos y Máximos en la Losa y Punto.



*Fuente, elaboración propia en Software EverFe 2.25.*

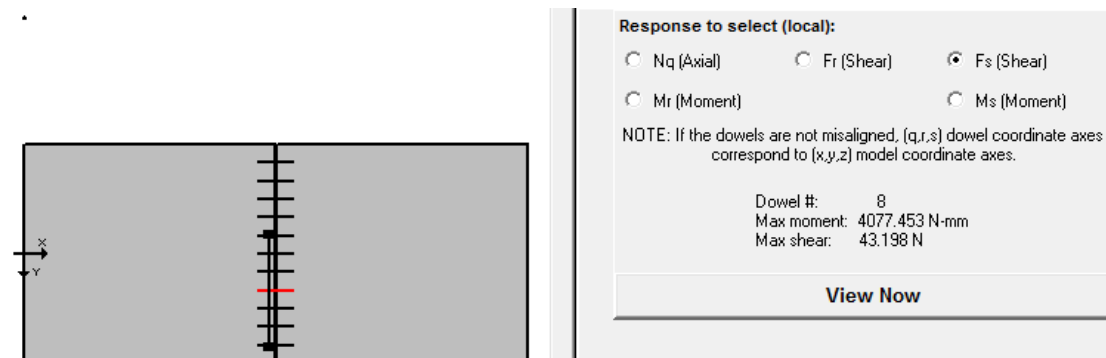
## ■ RESUMEN DE RESULTADOS

**FIGURA N° 43, Momento Máximo y Cortante en la Dovela Nro. 5.**



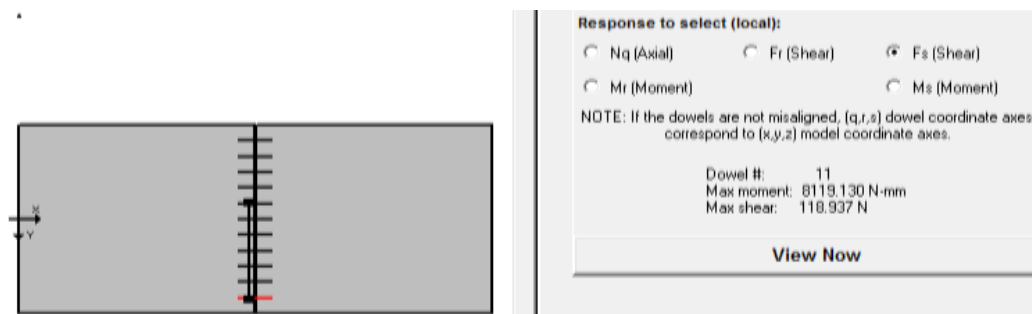
Se observa en rojo la Dovela analizada con el valor del momento y cortante en ella.

**FIGURA N° 44, Momento Máximo y Cortante en la Dovela Nro. 8.**



Se observa en rojo la Dovela analizada con el valor del momento y cortante en ella.

**FIGURA N° 45, Momento Máximo y Cortante en la Dovela Nro. 11.**



Se observa en rojo la Dovela analizada con el valor del momento y cortante en ella.

*Fuente, elaboración propia en Software EverFe 2.25.*

### 3.5.3 ANÁLISIS DE APLICABILIDAD

En el trabajo de investigación utilizaremos la herramienta EVERFE 2.25 para la modelación y evaluación numérica de la desviación de las dovelas en losas de pavimento rígido, en base a elementos finitos, sometidos a carga de tránsito.

La posibilidad de que la modelación sea aplicable a cualquier proyecto en nuestro medio dependerá de manera estricta y tajante, de los valores o datos obtenidos en campo mediante ensayos y pruebas en laboratorio al suelo, acero y al concreto.

Con los valores o parámetros para poder introducir al programa para una modelación de losa tipo, de una sección de tamaño real constructivamente, nos ayudaría a entender e interpretar como se deforma la losa, y las fuerzas que actúan en ella.

Es así que se presenta como objetivo analizar la aplicabilidad, manejo y resultados numéricos a lo realizado en laboratorio de suelos y hormigones. Con esto se presentan los resultados y pasos a seguir en la definición de la losa de modelado y sus condiciones de borde, propiedad del material y coeficientes normados para concreto y acero. Los resultados de una viga modelada y una viga vaciada con hormigón enfrentadas deberían dar como resultado una consistencia entre ellas en el caso de viga sin dovela. Se concluirá con un análisis a los objetivos y consideraciones más importantes observadas durante la investigación, tales como la utilización del programa, la metodología en la caracterización de materiales, la modelación de una geometría 3.5 x 4m (losa tipo).

Consideramos que, con una modelación numérica de la colocación de dovelas en losas de pavimento rígido en el medio, podemos obtener valores de esfuerzos, cortantes y momentos en cualquier punto de la losa, para su análisis e interpretación.

**Ventajas** El método de Elementos Finitos es muy versátil y poderoso y permite a los ingenieros obtener información del comportamiento de objetos de forma complicada bajo casi cualquier carga imaginable (cargas puntuales, de presión, térmicas, fuerzas inerciales, cargas dependientes del tiempo). Permite resolver problemas en estado estable o dependiente del tiempo, lineal o no lineal. Se pueden manejar materiales especiales: no homogéneos, ortotrópicos, anisotrópicos. Se pueden además considerar

efectos especiales sobre los materiales: plasticidad, propiedades dependientes de la temperatura. Las ramas de aplicación son variadísimas: mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, electromagnetismo, biomecánica, transferencia de calor y acústica, entre muchas otras.

**Desventajas** La principal limitación de los métodos de Elementos Finitos radica en que la precisión de los resultados depende de la densidad de elementos utilizada. En análisis estructurales, cualquier región con alta concentración de esfuerzos debe ser cuidadosamente analizada mediante un enmallado suficientemente fino para obtener resultados confiables.

Ya que los paquetes actuales de Elementos Finitos parecen resolver tan amplia gama de problemas, existe una marcada tendencia a resolver problemas mecánicamente sin tomarse el trabajo de entender la física y matemática subyacentes en el problema. Los paquetes de Elementos Finitos se han vuelto casi indispensables en el diseño y análisis mecánico, pero han acercado a los usuarios la posibilidad de cometer grandes errores. La versatilidad del método no salva la necesidad de realizar un detallado análisis de los resultados obtenidos antes de ser aplicados en la solución de un problema real. Los resultados pueden obtenerse tan bien presentados que infunden gran confianza en el análisis, lo cual puede conducir a “cometer errores con gran confianza”.

**Incertidumbre** Se pueden producir grandes errores en el modelamiento debido al uso de opciones inadecuadas del programa, o debido al uso adecuado del programa, pero con datos errados. Los resultados de un programa no son confiables si el usuario no entiende cómo funciona el programa o si no tiene las nociones físicas suficientes para entender los resultados arrojados por el programa. Los resultados deben ser comparados con las expectativas; se pueden obtener resultados alternos de modelos simplificados calculados a mano, o de experimentación en estructuras o elementos similares. “El método de los Elementos Finitos puede hacer de un ingeniero bueno uno mejor, y de un mal ingeniero uno más peligroso”.

### 3.5.4 VIGAS CON DOVELAS (PROCEDIMIENTO EN LABORATORIO)

Entrando en lo que es la práctica en general partiremos por una descripción consecutiva paso a paso:

- a) Se prepara los materiales que componen la mezcla de hormigón, como ser la arena, la grava, el cemento y las barras de acero lisas de 30 cm.

**Foto N° 10, Barras de Acero Lisas de 1 Pulgada.**



**Fuente:** *fuente propia.*

**Foto N° 11, Preparación de Materiales.**



**Fuente:** *fuente propia.*

- b) Una vez preparado el material, se procede al preparado de la mezcla en base a la dosificación calculada.

**Foto N° 12, Mezcla de Hormigón mediante Dosificación Calculada.**



- c) Cuando se tiene listo el hormigón que es preparado de acuerdo a la dosificación; la cual se realizó en base a la norma ACI 211.1, se debe hacer el ensayo del cono de *Abrams*, para verificar que la consistencia este dentro de los rangos establecidos.

**Foto N° 13, Revenimiento realizado con el *Cono de Abrams*.**



**Foto N° 14, Mezclado y Vaciado de Moldes con Hormigón**



**Fuente:** *fuentes propia.*

- d) Una vez realizado el cono de Abrams, y verificado el asiento es decir que se mantenga en el rango de 2-5 cm. Se procede a llenar los moldes del material y añadir las barras con distintas inclinaciones.

**Foto N° 15, Colocado de Barras (dovelas) en los Moldes**



**Fuente:** *fuentes propia.*

- e) Se trabajará colocando los materiales alternativos en este caso las barras de transferencia de carga o dovelas con desviación horizontal y vertical de acuerdo  
 f) al siguiente cuadro de posiciones en el orden que se presenta a continuación:



<b>BARRAS LISAS DE 1"</b>	Recta 1/2 de la base	Barra de 1"	3
	Inclinada hor. Der.	Barra de 1"	3
	Inclinada hor. Izq.	Barra de 1"	3
	Inclinada ver. Abajo	Barra de 1"	3
	Inclinada ver. Arriba	Barra de 1"	3
	sin barra	Barra de 1"	3
<b>TOTAL PROBETAS</b>			<b>18</b>

**Tabla N° 41, control de probetas a vaciar**

**Foto N° 16, Ubicación de las Dovelas en Distinta Posición.**



**Fuente:** *frente*

*propia.*

**Foto N° 17, Ubicación de Dovelas y Enrasado de Molde Tipo Viga.**



### 3.5.4.1 CURADO DE LOS MOLDES CON HORMIGÓN

Terminado el proceso de vaciado de los moldes de hormigón, se guardarán los moldes en un ambiente seguro y a una humedad ambiente ahí esperarán, hasta que llegue el momento del desmolde que normalmente varía entre 24 horas y un poco más. Tras transcurrir las 24 horas, hemos de desmoldar las probetas e inmediatamente introducirlas en agua.

**Foto N° 18,** *Desmolde de Probetas para posterior Ensayo a Flexión.*



para realizar el curado, que debe llevar mínimamente una semana claro que si se cuenta con el tiempo es mucho mejor procurar que este tiempo se prolongue un poco más, esto de ser posible ayudara en una medida considerable el mejor desarrollo del proceso de curado.

**Foto N° 19,** *Curado de Probetas de Hormigón.*



Una vez terminado el proceso de desmolde y puestos en agua las probetas es recomendable revisar los moldes y raspar los restos que puedan estar prendidos, no hay que dejar de lado la limpieza de los moldes para una reutilización, en posteriores ocasiones dentro del proceso de vaciado de las probetas.

**Foto N° 20, Limpieza de Moldes.**



**Fuente:** *fuentes propia.*

**Foto N° 21, Cepillado y Limpieza de Moldes.**



**Fuente:** *fuentes propia.*

### 3.5.4.2 EVALUACIÓN DE RESISTENCIAS EN LAS VIGAS CON DOVELAS EN POSICIÓN INCLINADA HORIZONTAL E INCLINADA VERTICAL

En cuanto a la evaluación de la desviación de las dovelas en las probetas tipo viga se procedió a la rotura de los moldes en los laboratorios de la U.A.J.M.S., en estos laboratorios se cuenta con el equipo hidráulico para la rotura de moldes de hormigón a flexión la misma que dará como resultados los datos de las cargas que resisten dichos moldes de hormigón, la que luego nos servirá para encontrar el valor de la resistencia.

*Foto N° 22, Maquina con Carga Centrada para la Rotura de los Moldes.*



La carga impuesta a los moldes fue ubicada al centro de los mismos, aunque la posición de la fisura permanece incontrolada en este ensayo, el hecho de imponer una carga centrada da como resultado un pico marcado para la flexión alrededor del centro de la viga. De esta manera se produce generalmente el fallo muy cercano al centro de aplicación de dicha carga. El resultado es una rotación de fisura más constante para una deflexión central dada.

Posteriormente se puede apreciar en la Tabla Nro. 42 los resultados de todos los ensayos y poder analizar las cargas y los esfuerzos producidos al momento de la fisuraron de las vigas para su posterior análisis y conclusiones.

**FOTO N° 23, Ubicación de Carga y Fisuras.**



**Fuente:** *fuentes propia.*



Se observa una fisura leve dentro del tercio central en las vigas con posición de dovelas rectas, y en las vigas con posición de dovelas vertical dispuesta hacia arriba y hacia abajo.



Se observa la fisura dentro del tercio central con tendencia a salir de los límites. Este tipo de fisura se dio en las vigas con dovelas posicionadas en sentido horizontal.

### 3.6 PROCESAMIENTO DE RESULTADOS

Para el control de rotura para las probetas se trabajó en base a la siguiente tabla:

*Tabla Nro. 42, Planilla Final de Resultados.*

Ensayo Nº	TIPO DE ESTRUCTURA	Descripcion de la barra	Desviación respecto a la base	FECHA DE VACIADO	FECHA DE ROTURA	EDAD (días)	AREA (cm <sup>2</sup> )	Carga en (KN)	CARGA (Kg.)	RESISTENCIA (Kg/cm <sup>2</sup> )	PROYECCION 28 días (Kg./cm <sup>2</sup> )	PROMEDIO	DESVIACION ESTANDAR
1	molde rectangular (viga)	barra lisa de Ø 1"	recta 1/2 de la base	29/04/2015	13/05/2015	14	900	38.95	39.70	44.116	48.267	49.093	0.806
2	molde rectangular (viga)	barra lisa de Ø 1"	recta 1/2 de la base	29/04/2015	13/05/2015	14	900	39.65	40.42	44.909	49.134		
3	molde rectangular (viga)	barra lisa de Ø 1"	recta 1/2 de la base	29/04/2015	13/05/2015	14	900	40.25	41.03	45.588	49.878		
4	molde rectangular (viga)	barra lisa de Ø 1"	inclinada hor. Der.	29/04/2015	13/05/2015	14	900	34.10	34.76	38.623	42.257	41.104	1.014
5	molde rectangular (viga)	barra lisa de Ø 1"	inclinada hor. Der.	29/04/2015	13/05/2015	14	900	32.56	33.19	36.878	40.348		
6	molde rectangular (viga)	barra lisa de Ø 1"	inclinada hor. Der.	29/04/2015	13/05/2015	14	900	32.85	33.49	37.207	40.708		
7	molde rectangular (viga)	barra lisa de Ø 1"	inclinada hor. Izq.	30/04/2015	14/05/2015	14	900	35.65	36.34	40.378	44.178	42.443	1.625
8	molde rectangular (viga)	barra lisa de Ø 1"	inclinada hor. Izq.	30/04/2015	14/05/2015	14	900	34.05	34.71	38.566	42.195		
9	molde rectangular (viga)	barra lisa de Ø 1"	inclinada hor. Izq.	30/04/2015	14/05/2015	14	900	33.05	33.69	37.433	40.956		
10	molde rectangular (viga)	barra lisa de Ø 1"	inclinada ver. Abajo	30/04/2015	14/05/2015	14	900	31.65	32.26	35.848	39.221	38.072	1.117
11	molde rectangular (viga)	barra lisa de Ø 1"	inclinada ver. Abajo	30/04/2015	14/05/2015	14	900	29.85	30.43	33.809	36.990		
12	molde rectangular (viga)	barra lisa de Ø 1"	inclinada ver. Abajo	30/04/2015	14/05/2015	14	900	30.67	31.26	34.738	38.006		
13	molde rectangular (viga)	barra lisa de Ø 1"	inclinada ver. Arriba	30/04/2015	14/05/2015	14	900	31.15	31.75	35.281	38.601	38.725	1.367
14	molde rectangular (viga)	barra lisa de Ø 1"	inclinada ver. Arriba	30/04/2015	14/05/2015	14	900	30.20	30.78	34.205	37.424		
15	molde rectangular (viga)	barra lisa de Ø 1"	inclinada ver. Arriba	30/04/2015	14/05/2015	14	900	32.40	33.03	36.697	40.150		
16	molde rectangular (viga)	molde de hormigon simple	sin barra	01/05/2015	08/05/2015	7	900	29.00	29.56	32.846	40.955	43.027	1.843
17	molde rectangular (viga)	molde de hormigon simple	sin barra	01/05/2015	08/05/2015	7	900	30.90	31.50	34.998	43.639		
18	molde rectangular (viga)	molde de hormigon simple	sin barra	01/05/2015	08/05/2015	7	900	31.50	32.11	35.678	44.486		

### 3.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS

En esta parte de la investigación se realiza una comparación entre cada posición de la dovela, esta comparación gráfica nos ayudará de un modo más preciso a determinar que desviación horizontal y vertical presenta características más aceptables en cuanto a resistencia y comparado con la barra que constructivamente se coloca recta al medio de la losa sin ninguna inclinación horizontal o vertical”.

O en su defecto nos ayudará a identificar que posición es menos apta para el fin que se persigue y cómo varía los rangos en el aspecto estructural. Pues éstas son barras estructurales para transferencia de carga en pavimentos rígidos.

A continuación se presentan los gráficos obtenidos:

#### ■ *Resistencia Vs. Posición de dovela con respecto a inclinación horizontal*

**Figura N° 46**, Comparación de Resistencia de la Barra de D= 1” en sus tres Posiciones.



*Fuente*, proceso de datos en gabinete, en base a resultados obtenidos.

En la **Figura N° 46**, podemos analizar claramente la variación de resistencia existente para cada posición horizontal de la barra lisa de  $\varnothing 1''$ , siendo fácil analizar en cuál de las tres posiciones la barra lisa responde mejor a la carga aplicada, el valor máximo fue de 49.09 Kg/cm<sup>2</sup> para la barra recta además podemos observar la posición más desfavorable de la barra y así entender mejor el comportamiento estructural de la misma. 41.10 Kg/cm<sup>2</sup> resistencia posición horizontal a la derecha de menor valor.

■ **Resistencia Vs. Posición de dovela con respecto a inclinación vertical**

**Figura N° 47**, Comparación de Resistencia de la Barra de  $\varnothing= 1''$  en sus Posiciones Verticales.



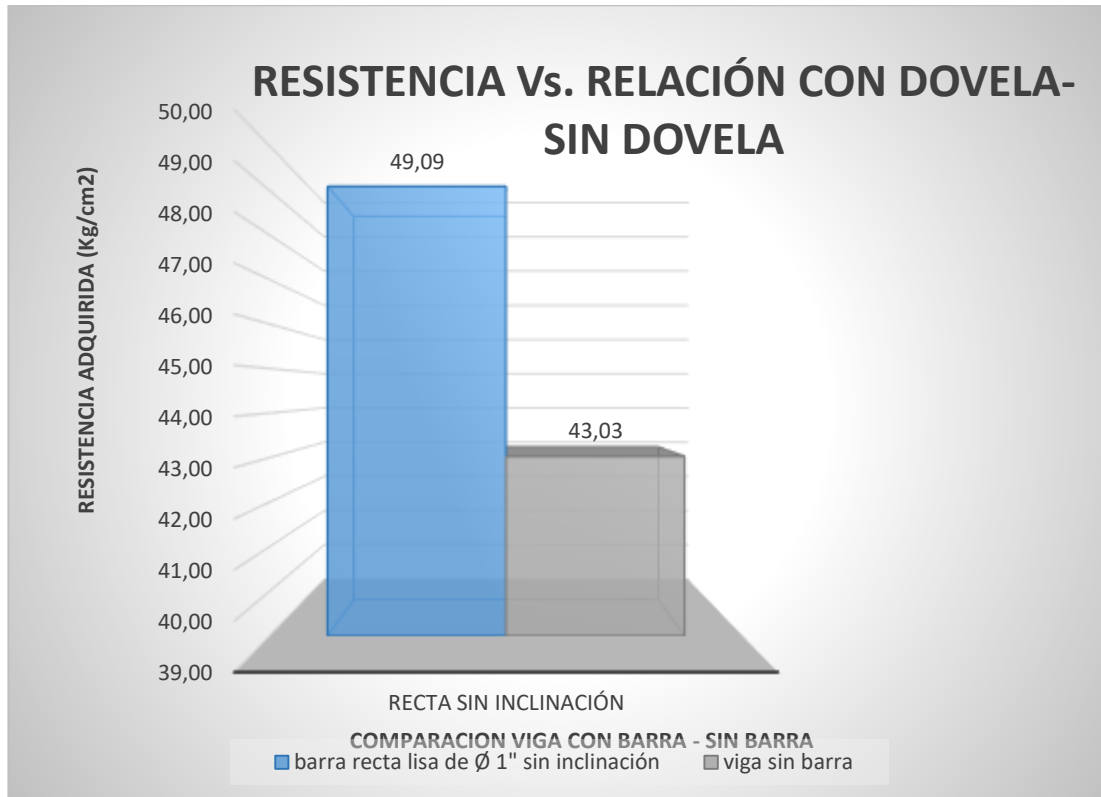
*Fuente, proceso de datos en gabinete, en base a resultados obtenidos.*

Para este caso la **Figura N° 47**, muestra el comportamiento estructural de las barras de  $\varnothing= 1''$ , este comportamiento estructural varía en cada posición con respecto a la inclinación vertical de la dovela en la probeta, muestra claramente en qué posición se obtiene la mejor resistencia 49.09 Kg/cm<sup>2</sup> posición recta y cuánto varía la misma con respecto a la más baja de 38.07 Kg/cm<sup>2</sup> inclinada vertical hacia abajo.



■ **Resistencia Vs. Viga con dovela – Viga solo con hormigón**

**Figura N° 48**, Comparación de Resistencia de la Viga con Dovela  $\varnothing=1''$  y una Viga Normal con solo Hormigón.



*Fuente, proceso de datos en gabinete, en base a resultados obtenidos.*

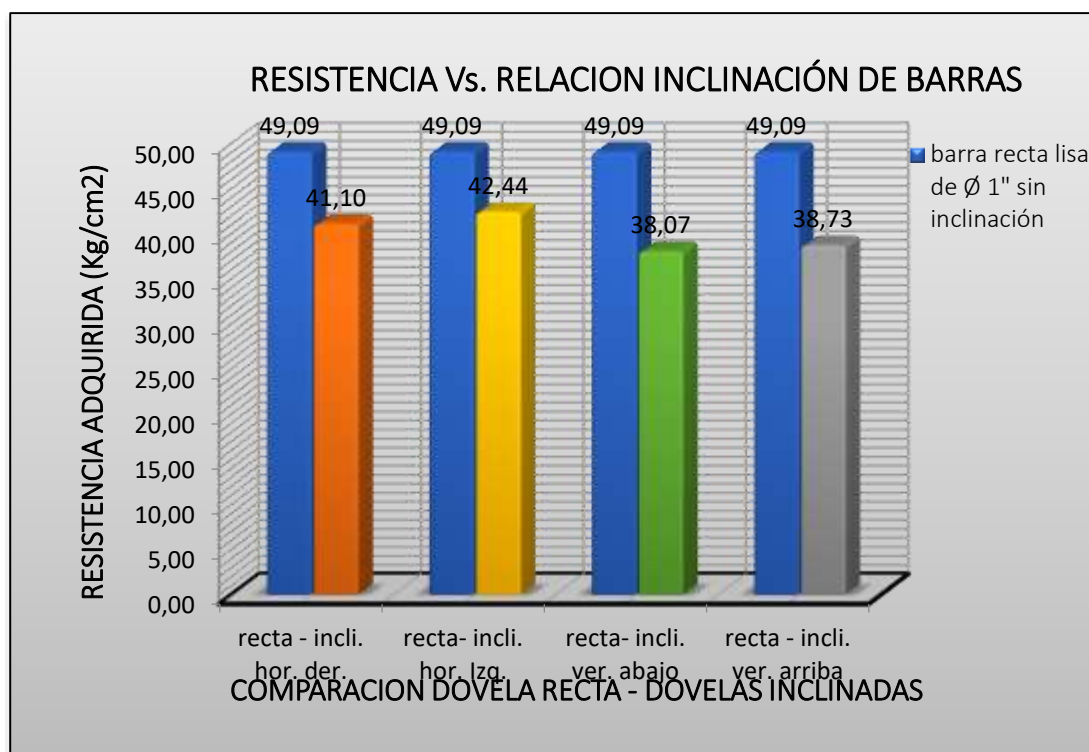
La **Figura N° 48**, muestra la respuesta que tuvo la viga con barra de  $\varnothing=1''$  en cuanto a resistencia, esta respuesta se expresa en la posición normal que se coloca la barra con respecto a la base de la probeta al centroide de la viga, muestra claramente que se obtiene una mejor resistencia de 49.09 Kg/cm<sup>2</sup> y cuanto varía la misma con respecto a la resistencia más baja adquirida en la viga con sólo hormigón de 43.03 Kg/cm<sup>2</sup>.

A continuación mostraremos el comportamiento estructural en resistencias de todas las barras de diámetro 1'' dispuestas con sus respectivas inclinaciones. Las mismas se comparan con la barra de posición recta normal en el centro, para poder tener más apreciación con respecto a la barra lisa en condiciones reales.

En la **Figura N° 49**, se analizan los cuatro casos, en los que la barra estructural de  $\varnothing=1''$  lisa se encuentra posicionada al centro de la probeta con desviación horizontal y vertical nula, nos muestra cómo varían sus resistencias y cuál de las cinco es la más aceptable. Primero con 49 Kg/cm<sup>2</sup> barra recta y segundo 42.44 Kg/cm<sup>2</sup> dovela con inclinación horizontal izquierda, y las otras resistencias en descenso.

#### ■ Resistencias vs. relación barra-inclinación de barras

**Figura N° 49**, Relación Barra Recta - Barras Inclinadas.



*Fuente, proceso de datos en gabinete, en base a resultados obtenidos.*

La **Figura N° 49**, es una de las gráficas más representativas ya que la misma nos muestra una comparación directa entre la barra de acero lisa  $\varnothing=1''$  que es la que normalmente se emplea como pasador en el pavimento rígido y las barras inclinadas cabe mencionar que para la gráfica se usaron todas las posiciones en las que actúa la barra de transferencia y estas desviaciones vs resistencias las analizamos en las anteriores gráficas.

Esta Grafica 49 además muestra cómo responden las otras vigas con barras lisas inclinadas en comparación con la barra lisa recta de diámetro 1", además establecemos la diferencia de resistencia que existe en relación a las cuatro posiciones alternativas ensayadas.

### ■ Resistencia Vs. Desviación de las dovelas

**Figura N° 50**, Resistencia de Vigas en Función a la Desviación de las dovelas en orden descendente en 4 posiciones y 1 viga sin barra de transferencia.



*Fuente, proceso de datos en gabinete, en base a resultados obtenidos.*

En esta **Figura N° 50**, mostramos claramente qué barra es la que mejor respondió en cuanto a resistencia, observamos como la barra de acero liso de diámetro 1" sin ninguna inclinación; colocada de manera recta en el centro de la probeta es la que alcanzó el valor más alto de resistencia, respecto al molde empleado. Observando un descenso gradual al posicionamiento de éstas con valores bajos referente a desviación-resistencia pero no así diferencias o variaciones muy grandes en valor resistencia o esfuerzo generado en las vigas ensayadas.

## ■ Resistencia Vs. Todos los casos.

**Figura N° 51**, Resistencia Vs. Todos los Casos de Ensayos.



*Fuente, proceso de datos en gabinete, en base a resultados obtenidos.*

Finalmente la **Figura N° 51**, muestra una correlación de todos los datos obtenidos en el laboratorio, esta correlación muestra el rango de resistencia que alcanzaron cada una de las probetas ensayadas, además establecemos el límite de resistencia aceptable, como ser de 45 Kg/cm<sup>2</sup> de acuerdo a este rango puede observarse claramente la mala posición y desalineación de las dovelas afecta al pavimento, no alcanzan la resistencia adecuada, lo que nos llama a tomar los recaudos para no tener problemas de fisuras, escala y bombeo, como indagadores de esta investigación.

### 3.8 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran las distintas resistencias que soportan las vigas al ser sometidas a cargas mecánicas. En ellas se denota la incidencia de las dovelas incrustadas en las vigas con ciertas inclinaciones; denotando claramente que la posición horizontal en el centro del espesor de la losa es la que mantiene inalterable el mayor esfuerzo a soportar en pavimentos rígidos las cargas tipo vehículos.

Vale comparar estos resultados de esfuerzos de laboratorio con la modelación realizada en el Programa Everfe 2.25.

### **3.8.1 RELACIÓN Y COMPARACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO Y CON EL PROGRAMA**

Los resultados obtenidos muestran las distintas resistencias que soportan las vigas al ser sometidas a cargas mecánicas. En ellas se denota la incidencia de las dovelas incrustadas en las vigas con ciertas inclinaciones; denotando claramente que la posición horizontal en el centro del espesor de la losa es la que mantiene inalterable el mayor esfuerzo a soportar en pavimentos rígidos las cargas tipo vehículos.

Vale comparar estos resultados de esfuerzos de laboratorio con la modelación realizada en el Programa Everfe 2.25.

#### **COMPARACIÓN DE RESULTADOS**

##### **Modelación numérica en el programa everfe 2.25 con la información generada en laboratorio de suelos.**

La modelación de una viga tipo de sección 15cm x 15cm y con longitud de 60 cm sometido a una carga puntual de 30 KN nos da un valor de resistencia de 4.1 Mpa equivalente a 41 Kg/cm<sup>2</sup> (ver anexos) cuando en el ensayo a flexión realizado en laboratorio a la viga de hormigón con una carga promedio registrada de 31 KN nos da un valor de 4.3 Mpa en promedio equivalente a 43 Kg/cm<sup>2</sup>.

Estos valores comparados denotan una similitud de lo calculado a mano mediante planillas con lo realizado en el programa en computadora siendo estos valores aceptables con el fin que se pretende en la investigación.

La viga ensayada en laboratorio con la dovela colocada de manera recta (sin ninguna inclinación) en el medio nos da un valor de 49.09 Kg/cm<sup>2</sup>, superior a 41 Kg/cm<sup>2</sup> la cual no tiene insertada la barra de transferencia de carga, lo cual indica claramente la mayor resistencia por la función de la dovela en esta viga.

Los análisis numéricos realizados indican que la desviación horizontal y vertical, aún con valores tan altos en el rango de 15° - 30°, no causa un aumento en el esfuerzo de manera significativa en todas las losas analizadas (0.71-0.34) Mpa. Esto se puede apreciar en la tabla 38 donde las variaciones de los esfuerzos en las vigas con dovelas

posicionadas en sentido horizontal y vertical no existe gran variación en las resistencias en un rango de 38 – 42 Kg/cm<sup>2</sup>.

La fuerza cortante calculada en las dovelas 5,8 y 11 con posición horizontal y vertical mediante el programa muestra un incremento de la cortante con respecto a la dovela sin inclinación como se puede observar en la tabla 43.

En este tipo de análisis donde tomamos constante el espesor de la losa para 20cm y los parámetros o variables ya mencionados SI existe el incremento de la fuerza cortante y pudiera no ser así en otros tipos de análisis.

*Tabla Nro. 43, Resultados por Modelación Numérica.*

LOSA CON DOVELAS RECTAS			
	MOMENTO (N-mm)	CORTANTE(N)	OBS.
DOVELA 5	6204.66	117.27	
DOVELA 8	4077.45	43.2	
DOVELA 11	8119.13	118.94	

LOSA CON DOVELAS HORIZONTAL INCLINADA DERECHA			
	MOMENTO (N-mm)	CORTANTE(N)	OBS.
DOVELA 5	6207.88	141.7	
DOVELA 8	3786.67	84.42	
DOVELA 11	8092.07	166.36	

LOSA CON DOVELAS HORIZONTAL INCLINADA IZQUIERDA			
	MOMENTO (N-mm)	CORTANTE(N)	OBS.
DOVELA 5	6340.41	151.05	
DOVELA 8	3760.7	91.53	
DOVELA 11	8038.55	190.41	

LOSA CON DOVELAS VERTICAL INCLINADA ARRIBA			
	MOMENTO (N-mm)	CORTANTE(N)	OBS.
DOVELA 5	7029.37	166.76	
DOVELA 8	4590.22	64.82	
DOVELA 11	9487.85	201.41	

<b>LOSA CON DOVELAS VERTICAL INCLINADA</b>			
<b>ABAJO</b>			
	<b>MOMENTO (N-mm)</b>	<b>CORTANTE(N)</b>	<b>OBS.</b>
<b>DOVELA 5</b>	4925.87	54.99	
<b>DOVELA 8</b>	4634.64	67.36	
<b>DOVELA 11</b>	6814.31	70.4	

Los valores en la modelación para el esfuerzo en la losa están en el rango de 0.71 Mpa – 0.34 Mpa valores bajos por el eje sencillo de 80 KN.

Basándonos en el contenido teórico planteado en el Capítulo II y con los resultados obtenidos en las simulaciones efectuadas en el programa de elementos finitos EverFE 2.25, se concluye que los esfuerzos resultantes a la combinación de carga de eje sencillo 80 KN son menores en las losas por la función de las dovelas; aun así la incidencia de la inclinación si afecta a las fallas en el pavimento es razonable mantener los estándares de alineamiento sugeridos por la FHWA, la ACPA y otras agencias viales pues su carácter conservador no está completamente probado.

## CAPÍTULO IV “CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES”

### 4.1 CONCLUSIONES

- El análisis de resultados mediante gráficos, nos ha ayudado a establecer la variación de resistencias que existe entre la disposición de barras (dovelas) por la inclinación de éstas, ya sea de manera horizontal o vertical.  
Este análisis comparativo de la resistencia contra la desviación denota cuál es la posición que ofrece la mejor resistencia y cuánto varía la misma con respecto a la inclinación que se dio en la barra de acero liso de 1”, cuando está centrada en el medio de la viga y con ángulo de desviación horizontal o vertical 0. **La barra lisa de Ø 1" recta a 1/2 de la base sin desviación genera una Resistencia = 49.093 (Kg/cm<sup>2</sup>) y un valor con menor Resistencia = 38.725 (Kg/cm<sup>2</sup>) barra lisa de Ø 1" inclinada vertical arriba** siendo este el valor menor en las vigas ensayadas.
  
- En el momento de la rotura de las probetas, se pudo observar claramente que la falla en el hormigón era mucho más pequeña y se concentraba sólo en el tercio central en aquellos moldes que alcanzaron las mayores resistencias de 49.09 Kg/cm<sup>2</sup> con barra sin ninguna desviación. Y una resistencia a flexión de 43.027 Kg/cm<sup>2</sup> en viga sin barra lisa, esto nos demuestra que las barras le transfieren a las vigas de hormigón parte de su resistencia.
  
- Las barras lisas de 1”, al someterse a la carga puntual trabajaron adecuadamente en resistencia siendo su módulo de elasticidad 200 Mpa. se observó que las mismas no sufrieron deformación alguna lo que denoto fracturas leves en el hormigón dentro del tercio central de la viga y no así rotura de la misma.
  
- En cuanto a las inclinaciones de las dovelas podemos mencionar que la posición en la que se obtuvieron mejores resistencias fue la que se posesionó a 1/2 de la base de la probeta con su resistencia de 49.09 Kg/cm<sup>2</sup>, a nuestro modo de ver



esto se debe a que la falla del hormigón se produjo de manera perpendicular a la luz de la viga esto provocó que la barra trabajara mejor su resistencia a la flexión fisurándose levemente.

- Los resultados numéricos obtenidos y la información técnica consultada sugieren que el efecto de la desviación de las dovelas puede ser importante cuando ésta no es uniforme (diferentes orientaciones) o combina ángulos horizontales y verticales a la vez, es decir, cuando se presenta el bloqueo de la junta. En este caso se presentarían todo tipo de valores en cortante.
- Las medidas de laboratorio se han enfocado en relacionar el efecto de las desviaciones con la fuerza necesaria para abrir las juntas. En las vigas horizontal derecha e izquierda aun con el promedio de valores que fue de 41.10 Kg/cm<sup>2</sup> y 42.44 Kg/cm<sup>2</sup> se comprobó que si fuese mayor la carga se produciría la rotura de un borde de la viga quedando al descubierto el pasador.
- El resultado obtenido con la modelación para el valor máximo en la losa de concreto es de 0.71 Mpa por debajo de un ensayo tipo viga donde se diseñó para una resistencia de 4.5 Mpa a flexión. Esto se debe a los valores asumidos para nuestra losa tipo de sección rectangular 3.5m x 4.0m con espesor de 20 cm y dovelas de 30cm, y valores importantes como ser el Modulo de elasticidad del concreto 28000 Mpa, módulo de elasticidad del acero 200000Mpa.

## 4.2 RECOMENDACIONES

En base a todas las experiencias recaudadas creemos que las recomendaciones más puntuales son las siguientes:

- Los equipos utilizados para la rotura de las probetas de hormigón son de vital importancia ya que los mismos, deben ser precisos y exactos en los resultados que arrojan ya que estos le darán la confiabilidad y aceptación o rechazo al trabajo para el cual están siendo usados.
- El hormigón como se sabe, es un compuesto que depende de los elementos que lo conforman y las condiciones que lo rodean, en este sentido se hace un hincapié en la importancia del seguimiento y control que se debe hacer con las mismas ya que éstas representan un aspecto muy importante.
- Familiarizarse y revisar los manuales de los equipos a ser utilizados en los ensayos a Flexión para de esta manera obtener datos reales y valederos para las pruebas a ser ejecutadas; sabiendo lo que se está haciendo y programando.
- En cuanto a la medición de resistencia hay que tomar en cuenta los efectos que causa la finura del cemento o el porcentaje de absorción de los agregados este análisis nos ayudará a obtener mejores resultados.
- La barra de acero liso es el material que generalmente se emplea como pasador para juntas de dilatación por su buena resistencia a la flexión, existe ahora en base a esta investigación una idea más clara en la incidencia de la posición con grados de inclinación en su resistencia a la flexión, queda mucho campo por investigar en lo que es el diseño de pasajuntas y la profundización del tema puesto en investigación.
- Esta investigación puede servir como soporte para referencias bibliográficas, siempre y cuando los métodos y teorías planteadas se sometan a comparaciones y verificaciones correspondientes esto para una mayor seguridad del lector.