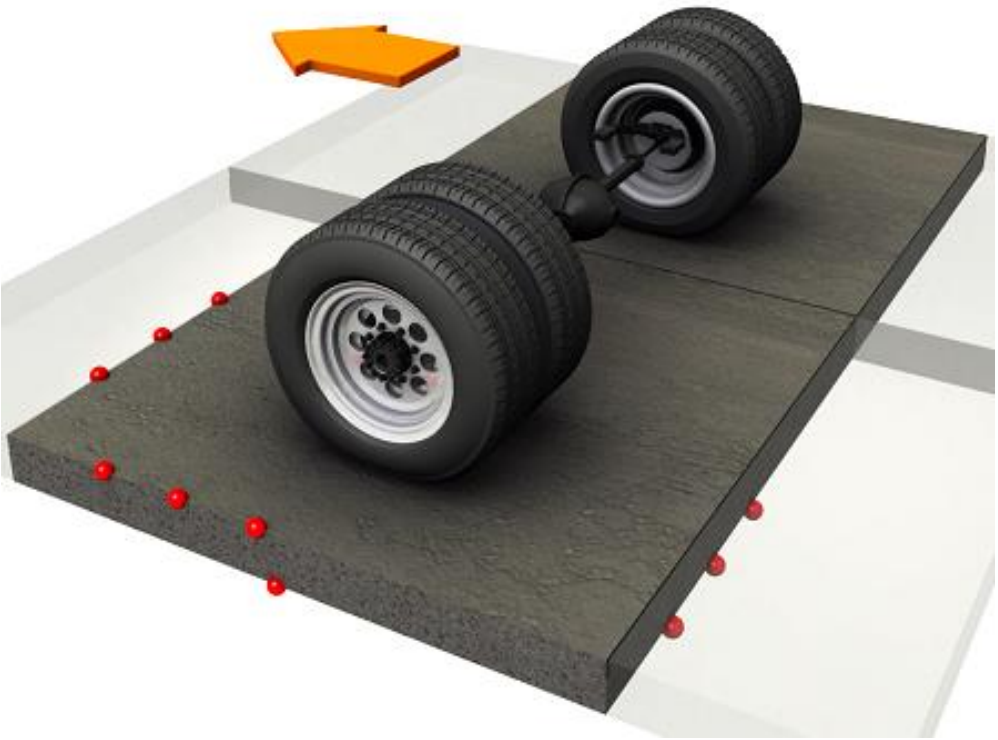
Documentación y Guía de Diseño
Optipave 2.5



Introducción

Los sistemas de pavimentación en hormigón empleados actualmente se diseñan con losas de ancho igual al ancho de la pista y de largo entre 3,3 y 6 m. Debido a que las losas presentan un alabeo cóncavo producto del gradiente de construcción lo que se traduce en un levantamiento de las esquinas de la losa un camión puede cargar simultáneamente la losa con sus cuatro sets de ruedas. Esta condición produce tensiones de tracción en la superficie de ésta.

La nueva tecnología de diseño y construcción de losas dimensiona éstas de forma tal que ellas nunca sean cargadas por más de un set de ruedas del camión, logrando con esto disminuir significativamente las tensiones en dicha losa. Las tensiones dentro de la losa determinan la vida útil del pavimento, donde tensiones mayores generan un deterioro más rápido en este. Esto produce un menor agrietamiento de las losas del pavimento y una mayor tolerancia a la carga por eje del camión.

El método creado por la empresa TCPavements es el resultado de años de estudios y pruebas, basado en las ecuaciones de daño por fatiga del proyecto NCHRP 1-37ª (ME-PDG, AASHTO, EEUU) y con simulaciones de tensiones realizadas en ISLAB2000 (programa de elementos finitos). Este método logra diseñar pavimentos de losas optimizadas, obteniendo resultados óptimos, para esta nueva condición geométrica

El procedimiento es un método mecanicista - empírico, ya que ha sido calibrado con tramos de pruebas instrumentados, determinando las constantes de calibración. El concepto básico del diseño es dimensionar las losas de tal manera que solo una rueda o set de ruedas se apoyen en una losa, a la vez, calcular el daño por fatiga producido en los puntos críticos de la losa, dado esto, determinar el espesor correspondiente considerando las condiciones de suelo, alabeo, tráfico, y otras condiciones relevantes

El modelo calcula las tensiones críticas que se producen en las losas del pavimento producto de la combinación de las cargas, efectos de temperatura y distintas condiciones de borde. Además, el método incluye verificación para las condiciones del escalonamiento de las juntas transversales sin barras de traspaso de cargas y del agrietamiento de esquina.

En esta segunda versión, se incorpora el uso de Redes neuronales para la predicción de tensiones, calculo incremental de fatiga en el tiempo y una serie de mejoras para generar un sistema de diseño preciso.

*La tecnología TCP (Thin Concrete Pavements), el método de diseño y construcción de losas delgadas de hormigón perfeccionadas para uso en pavimentación y demás derechos relacionados con dicha tecnología, tales como programas computacionales, know-how, secretos industriales, y manuales instructivos, entre otros, son de propiedad exclusiva de Comercial TCPavements Ltda. y están protegidos por las leyes y tratados internacionales vigentes en materia de Propiedad Industrial e Intelectual, en particular por el registro de patente industrial Nos. 44820 en Chile, patente No. 7,571,581 en Estados Unidos, y solicitud internacional PCT/EP2006/064732. TCP® y TCPAVEMENTS® son marcas comerciales, registradas en Chile bajo los números 815.883, 815.884, 818.885, 815.886, 815.887, 818.888, y 815.889, 821.195, 821.216, de propiedad exclusiva de Comercial TCPavements Ltda. Su utilización no autorizada se encuentra sancionada civil y penalmente por las leyes del Estado de Chile, y demás países en donde se encuentren reconocidas.

El uso de losas de menores dimensiones y la consiguiente reducción del espesor, requiere una lista de modificaciones en el método de diseño para cumplir de forma satisfactoria la vida de servicio del pavimento. A continuación se muestra una lista de modificaciones en las especificaciones técnicas que se deben llevar a cabo al utilizar este sistema:

1. Debido a un mayor número de juntas de contracción y por lo tanto una menor esfuerzo de contracción en estas juntas es que se recomienda el uso de sierras más delgadas de entre 2 y 2,5 mm, lo que permite omitir sellar la junta, al restringir el ingreso de material incompresible dañino para la junta, lo que limita el desconche en la junta.
2. Debido a que se recomienda no sellar las juntas, es necesario tener una base que tenga una cantidad limitada de material fino, lo que resulta en un muy bajo bombeo de finos y por lo tanto que el pavimento no sufra escalonamiento. Es por esto que se recomienda para pavimentos de tráfico pesado, una base con menos de 8% de finos (Material que pasa la malla #200).
3. Para evitar la contaminación de material fino a la base que lleva menos de 8% de finos, una malla geotextil debe ser colocada que actúe como un separador entre la base y el suelo debajo.
4. Juntas de contracción de menor ancho permiten una mayor transferencia de carga entre las losas, por lo que utilizar barras de transferencia de carga o barras de amarre no son parte del diseño estándar del sistema. Sin embargo en juntas de construcción si son necesarias, ya sea en juntas transversales, en que aumentan la transferencia de carga en una junta fría o en juntas longitudinales en que se colocan barras de amarre para evitar la separación de las losas de hormigón. Con el mismo fin es que se hace necesario agregar pines laterales en el pavimento lo que evita movimientos laterales del pavimento, los que pueden ser omitidos en pavimentos con incorporación de fibra estructural en el hormigón.

1. Guía de Diseño Optipave 2.5

Introducción

El software de Diseño Optipave 2.5, es la tercera versión del programa de diseño de losas con geometría optimizada, el cuál fue desarrollado en lenguaje C# . En esta tercera versión el programa calcula las tensiones en el pavimento, utilizando el concepto de estructura equivalente y redes neuronales. A continuación, se muestra la siguiente guía que explica en mayor detalle, los parámetros de diseño necesarios para poder realizar diseños del paquete estructural de un pavimento con esta herramienta.

Los parámetros de diseño se pueden dividir en cinco categorías como se muestra a continuación. Cada una de estas categorías será explicada de forma más detallada en los sub-capítulos siguientes

- Parámetros de Diseño del Tipo de Pavimento
- Parámetros de Diseño del Tráfico
- Propiedades del Hormigón
- Parámetros del Suelo
- Clima

1.1- Parámetros de Diseño del Tipo de Pavimento

1.1-1. Vida de Diseño

La vida de diseño del pavimento, es la cantidad de tiempo (en años) en que se espera que un pavimento se desempeñe con un cierto estándar de calidad. El desempeño del pavimento se predice desde el momento en que el camino se abra al tráfico. La vida de diseño se puede seleccionar dependiendo de la clasificación de la vía, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1: Vida de Diseño Recomendado según clasificación del Pavimento

Clasificación de la Vía	Vida de Diseño (Años)
Rutas Locales y Calles	15-20
Calles Principales y vías de mediano tráfico < $15*10^6$ EE	20
Carreteras Interurbanas y Vías de Alto Tráfico> $15*10^6$ EE	20-40

1.1-2. Largo de Losa

El largo de una losa, que es el equivalente al espaciamiento existente entre una junta transversal y la siguiente, depende de la ubicación de construcción del pavimento y las técnicas equipos y materiales utilizados durante la construcción. Si la pavimentación se realiza en un área propensa a alabeos de magnitudes altas, es conveniente realizar juntas transversales menos espaciadas. El largo de la losa debe ser de entre 1,4 y 2,3 m y en caso de tener tráfico en más de una dirección (intersecciones o pavimentos

industriales), se debe reducir a no más de 1,75m para evitar que más de un set de ruedas cargue la losa de forma diagonal.

1.1-3. Espesor de la Losa de Hormigón

Espesor de la losa de hormigón soportante, que será la carpeta de rodadura, se expresa en milímetros y el espesor puede ir de 60mm a 250mm. Este programa de diseño permite evaluar el desempeño de un cierto espesor del pavimento o realizar una iteración que obtiene el espesor mínimo que cumple con el umbral de diseño especificado.

1.1-4. Tipo de Borde

El tipo de borde se refiere a la condición de borde del pavimento, lo cual tiene dos efectos, primero define el soporte lateral que entrega la berma al pavimento en términos de transferencia de carga y por otro lado aleja el tráfico del borde. Se definieron cuatro tipos de borde que se muestran en la Tabla 2

Tabla 2: Tipos de Borde y su efecto en términos de soporte y circulación del tráfico

Tipo de Borde	Soporte a la Estructura	¿Aleja el tráfico del Borde?
Borde Libre	Nulo	No
Berma Granular/ Asfáltica	Muy Leve	No
Berma de Hormigón	Leve	No
Vereda	Mediano	Sí

1.1-5. Sobreancho en las Losas

El sobreancho en la losa exterior del pavimento mejora notablemente el desempeño de este al alejar de manera significativa el tráfico del borde ya que aumenta la distancia entre la línea de demarcación externa con el borde del pavimento.

1.1-6. Barras de Transferencia de Carga

El uso de barras de transferencia de carga en juntas transversales permite una mayor y más prolongada transferencia de carga en la junta transversal, mejorando el comportamiento tanto estructural como el escalonamiento. Su uso se recomienda para tráficos altos. (> 15.000.000 EE)

1.1-7. Dren Lateral del Pavimento

Opción de realizar el análisis, agregando dren lateral al pavimento.

1.1-8. Interfaz Pavimento-Base

El programa añade la posibilidad de realizar un diseño de una capa de hormigón adherida sobre otra existente. (Esta opción no se encuentra de momento disponible)

1.1-9. IRI Inicial

Es el IRI (índice de Rugosidad Internacional) de recepción del pavimento. En general este valor es de 2 m/Km en Chile, que es el máximo valor admisible en un proyecto del MOP:

1.1-10. Porcentaje de Losas Agrietadas

Es el umbral de daño aceptado, dado un nivel de confiabilidad que se espera tenga el pavimento al final de su vida de diseño. El nivel de daño máximo admisible depende de la importancia de la vía. En la siguiente tabla se muestran valores recomendados según el tipo de vía:

Tabla 3: Valores Recomendados de Porcentaje Máximo Admisible de Losas Agrietadas según la Clasificación de La Vía

Clasificación de la Vía	Porcentaje Máximo Admisible de Losas Agrietadas
Rutas Locales y Calles	30%-50%
Calles Principales y vías de mediano tráfico < $15*10^6$ ESALS	10%-30%
Carreteras Interurbanas y Vías de Alto Tráfico> $15*10^6$ EE	10%

1.1-11. IRI final de diseño

IRI máximo admisible que deberá cumplir el pavimento. En caso de superar ese valor el pavimento deberá ser sometido a algún tratamiento que permita bajar los niveles de IRI. En proyectos de Concesión este valor es de 3,5 m/km .

1.1-12. Escalonamiento Promedio Final de diseño

Escalonamiento máximo admisible que deberá cumplir el pavimento. En caso de superar ese valor el pavimento deberá ser sometido a algún tratamiento que permita bajar los niveles de escalonamiento. En general el valor promedio máximo permitido es de 5 mm para Chile.

1.1-13. Confiabilidad

Grado de confiabilidad del diseño, que se controla por el factor de confiabilidad (M) que es función de un valor asociado al nivel de confianza de la distribución normal (Zr) y de la desviación normal del error combinado (Se) de todos los parámetros que intervienen en el comportamiento del pavimento.

La desviación normal del error combinado (Se), es la dispersión de resultados entre el daño por fatiga calculado y el daño medido real, esto incluye las dispersiones inherentes a todos los factores que influyen en el comportamiento del pavimento, entre los cuales tienen una participación preponderante los errores que pudieran darse en la predicción del tránsito solicitante y el grado de variabilidad que presentan los suelos de la subrasante. Cuando el nivel de solicitaciones es muy elevado, la probabilidad

de errar por defecto en la predicción es menor, debido a que la pista de diseño se encuentra a niveles cercanos a la saturación; asimismo, entre mayor es la dispersión de los valores representativos de los suelos de la subrasante, existe una probabilidad más alta de fallas. Por último, con el propósito de minimizar los trabajos de mantenimiento durante la vida de servicio de la obra, el nivel de confianza del diseño debe crecer en la medida que aumenta el tránsito.

- El programa considera un nivel de confiabilidad para los tres mecanismos de falla del pavimento.

Valores Recomendados según la clasificación de la vía, se muestra en la Tabla 4

Tabla 4: Confiabilidad según la clasificación de la vía

Clasificación de la Vía	Urbanas	Rurales
Carreteras Interurbanas y Vías de Alto Tráfico	85%-97%	80%-95%
Calles Principales y Vías de Mediano Tráfico	80%-95%	75%-90%
Calles de Bajo Tráfico	75%-85%	70%-80%
Pasaje	50%-75%	50%-75%

1.2- Tráfico

El programa permite ingresar el tráfico como parámetro de diseño, a través de dos variables:

- Tráfico por Ejes Equivalentes
- Tráfico por Espectro de Carga

1.2-1. Tráfico por Ejes Equivalentes

Es un parámetro que transforma los diferentes ejes que circulan por una ruta, a un eje simple de rueda doble (E.S.R.D) de 80 KN (18 Kips) de peso, considerado como eje patrón (Daño Equivalente). El factor de equivalencia es el cuociente que resulta entre el número de ejes de una configuración y peso, necesarios para originar una determinada pérdida de serviciabilidad, respecto del número de ejes patrón requerido para producir la misma pérdida de serviciabilidad; el valor de este cuociente es el Factor de Ejes Equivalentes. En el programa se debe ingresar el número total de ejes equivalentes que circularán por el pavimento desde la apertura al tráfico hasta el final de la vida de diseño.

1.2-2. Espectro de Carga

Los siguientes inputs son necesarios para realizar el diseño mediante un análisis de espectro de carga:

- TMDA Inicial (Ambos Sentidos) solo vehículos relevantes (TMA_i): Número promedio anual de vehículos relevantes (buses o camiones) que circulan durante un día en ambos sentidos y en la totalidad de las pistas.
- Porcentaje de Tráfico en Dirección de Diseño: Proporción de vehículos pesados que circulan en la dirección de diseño. Típicamente se utiliza un valor de 50%, con rangos que varían entre 40% y 60%
- Porcentaje de Tráfico en Pista de Diseño: Proporción del tráfico pesado que transita por la pista de diseño, la cual corresponde generalmente a la pista externa del pavimento.

- Porcentaje de Tráfico en Verano: Debido a que las propiedades del pavimento son distintas en invierno que en verano, que se puede diferenciar el porcentaje de vehículos que circulan en verano de los que circulan en invierno.
- Tráfico Total: El número total de vehículos pesados se obtiene de la siguiente sumatoria:

$$T_{TOT} \coloneqq TMA_i \cdot \sum_{i=1}^{Vd} (1+tc)^{i-1} \cdot T_{DD} \cdot T_{PD}$$

$$T_{TOT} \coloneqq TMA_i \cdot T_{DD} \cdot T_{PD} \cdot \sum_{i=1}^{Vd} (1+tc)^{i-1}$$

$$T_{TOT} \coloneqq TMA_i \cdot T_{DD} \cdot T_{PD} \cdot \frac{((1+tc)^{VD}-1)}{tc}$$

Con:

TMA_i Tráfico diario medio anual inicial en ambos sentidos

T_{DD}: Porcentaje de tráfico en la dirección de diseño

T_{PD} : Porcentaje de tráfico en pista de diseño

Tc: Tasa anual de crecimiento del tráfico

VD: Vida de diseño del pavimento.

1.2-3. Tasa de Crecimiento:

Porcentaje de crecimiento anual promedio del tráfico durante la vida de Diseño del proyecto.

1.2-4. Tipo de Tráfico:

Se debe seleccionar el tipo de tráfico que modele de mejor forma el tráfico en el proyecto. En caso de que se tenga información precisa del tipo de tráfico que circulará por el pavimento, es posible agregarlo

como nuevo tipo de tráfico, a partir de una planilla Excel. El programa trae incorporado por defecto las siguientes clasificaciones de tráfico:

1.2-4.1. Clasificación de la Federal Highway Administration:

La Federal Highway Administration de EEUU asigna al tipo de tráfico una numeración que va desde 1 hasta 17. El criterio de selección del grupo a utilizar se muestra en la siguientes tablas :

Tabla 5: Grupo de Clasificación de Tráfico Recomendado según uso del pavimento

Uso del Pavimento	**Grupo de Clasificación Recomendado**
Arterias Principales (Rutas Inter-regionales)	1,2,3,4,5,8,11,13
Arterias Principales (Rutas Interregionales incluyendo autopistas urbanas)	1,2,3,4,6,7,8,9,10,11,12,14,16
Arterias Menores	4,6,8,9,10,11,12,15,16,17
Colectoras Mayores	6,9,12,14,15,17
Colectoras Menores	9,12,14,17
Calles Locales y de Servicio	9,12,14,18

Tabla 6: Grupo de Clasificación de Tráfico Recomendado según uso del pavimento según tipo de vehículos

Porcentaje de Flujo de Buses	**Tipo de Camiones**		**Grupo TTC**
	Múltiples Remolques	**Remolque Simple y de una unidad**	
Nulo a Bajo (<2%)	Relativamente alto número de camiones con múltiples remolques (>10%)	Predominio de remolque simple	5
		Alto porcentaje de camiones de remolque simple, pero con algunos camiones de una unidad	8
		Tráfico de camiones mixto, con alto número de camiones con remolque simple	11
		Tráfico de camiones mixto, con más o menos igual número de camiones de unidad simple y camiones de remolque simple	13
		Predominio de camiones de una unidad	16
	Número moderado de camiones con múltiples remolques (2 a 10%)	Predominio de remolque simple	3
		Tráfico de camiones mixto, con alto porcentaje de camiones con remolque simple	7
		Tráfico de camiones mixto, con más o menos igual porcentaje de camiones de unidad simple y camiones de remolque simple	10
		Predominio de camiones de una unidad	15
Bajo a Moderado (entre 2 y 25%)	Bajo a Nulo (<2%)	Predominio de remolque simple	1
		Predominio de remolque simple con bajo número de camiones de una unidad	2
		Predominio de remolque simple con bajo a moderado número de camiones de una unidad	4
		Tráfico de camiones mixto, con mayor número de camiones con remolque simple	6
		Tráfico de camiones mixto, con más o menos igual número de camiones de unidad simple y camiones de remolque simple	9
		Tráfico de camiones mixto, con mayor número de camiones de una unidad	12
		Predominio de camiones de una unidad	14

Ruta con alto tráfico de buses (>25%)	Bajo a Nulo (<2%)	Tráfico de camiones mixto, con más o menos igual número de camiones de unidad simple y camiones de remolque simple	17

1.2-4.2. Clasificación de la American Concrete Pavement Asociation (ACPA)

Incorporados en el programa de diseño de Streetpave, La ACPA considera cuatro tipo de tráficos para el flujo por vías urbanas:

Clasificación de Tráfico	Tipo de Vía	Tráfico de Diseño (TMDA)	Peso Máximo/Eje	
			Simple	Tandem
Streetpave Residential	Pasaje	Hasta 25	98	160
Streetpave Collector	Vía Local	40-1000	116	196
Streetpave Minor Arterial	Colectora	5-5000	133	231
Streetpave Mayor Arterial	Troncal	1500-8000	151	267

1.2-4.3. Clasificación de ACI 330

Clasificación de tipo de tráfico desarrollado por ACI para tráficos de tipo industriales y Centros Comerciales.

Según la guía ACI 330 R 08, el criterio para la selección del tipo de tráfico, dejando fuera la clasificación de vehículos livianos es:

Tabla 7: Criterio de Selección Tipo de Tráfico según ACI 330

1. Vías de Entradas de Camiones: Categoría A		
2. Entrada de Centros Comerciales y Vías de Servicio: Categoría B		
3. Areas de Estacionamiento de Buses (Ciudad y Escolares) Area de Estacionamiento y vías interiores-Categoría B Entrada y Vías Exteriores- Categoría C		
4. Area de Estacionamiento de Camiones (Categoría B,C,D):		
Típo de Camión	Area de Estacionamiento y vías Interiores	Entrada y Vías Exteriores
Unidades Simple (Camiones ¾)	Categoría B	Categoría C
Camión con uno o mas Remolques	Categoría C	Categoría D

1.2-5. Distribución Lateral del Tráfico

El efecto que produce la ubicación con respecto al borde del pavimento es significativo, por lo tanto es importante modelar el pavimento, con distintas posiciones de los vehículos, con respecto al borde del pavimento. La posición en que pasa un cierto vehículo, tiene una distribución normal con media 45 cm desde la línea de demarcación del pavimento y una desviación estándar de 25 cm.

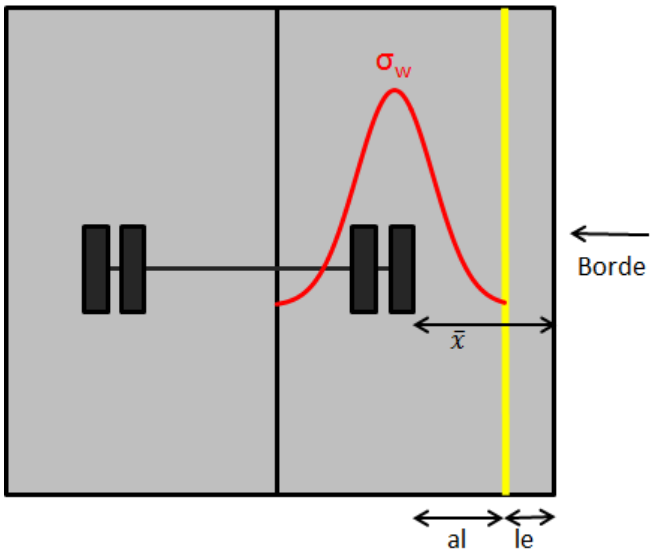


Figura 1: Distribución lateral típica de un pavimento de hormigón

1.2-6. Efecto de Soleras y Sobreancho en la distribución lateral del tráfico

Al utilizar losas con sobreancho o soleras en el borde, aumenta de forma significativa la distancia en que los vehículos se desplazan con respecto al borde del pavimento, comparado a los otros tipos de borde. La solera aumenta la distancia entre la línea de demarcación del pavimento y la rueda exterior del vehículo (al+ lc) y además disminuye la desviación estándar de la distribución del tráfico.

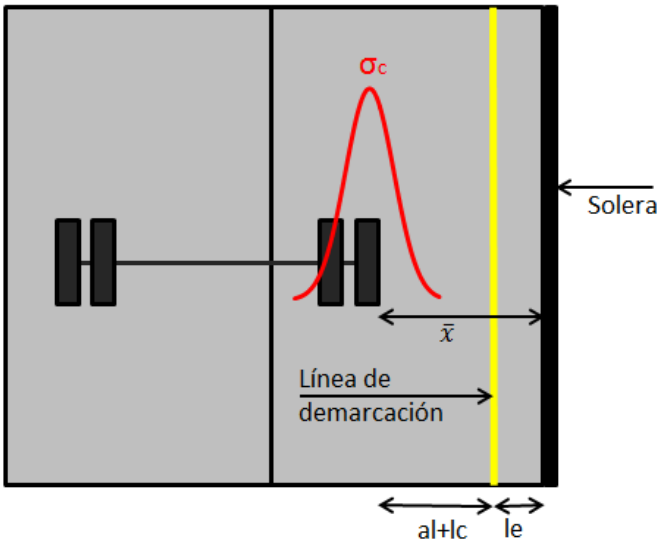


Figura 2: Distribución Lateral para un pavimento con solera en el borde

El efecto del sobreancho en una losa es similar al de la solera, al aumentar la distancia media del borde. Esto ocurre debido a un aumento en la distancia entre el borde del pavimento y la línea de demarcación (Le+Lw)

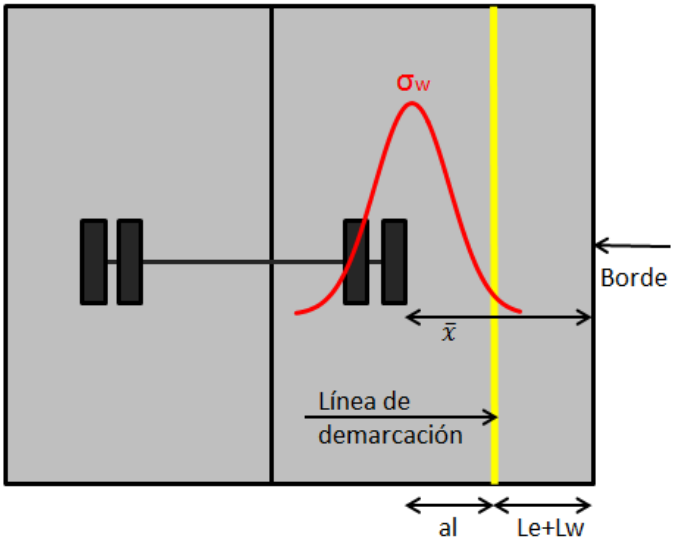


Figura 3: Distribución Lateral del tráfico para un pavimento con sobreancho

Los valores por defecto de la distancia entre el borde, la línea de demarcación y la rueda externa del vehículo se muestran en la Tabla 8

Tabla 8: Valores por defecto de las distancia entre el borde, la línea de demarcación y la rueda externa de los vehículos

Tipo de Borde	**Distancia entre el borde y la línea de demarcación**	**Distancia entre la línea de demarcación y la rueda externa de los vehículos**	**Distancia entre el borde y la rueda externa de demarcación**
Borde Libre, Berma de Hormigón, berma granular/asfáltica	150 mm	450 mm	600 mm
Solera de Borde	150 mm	550 mm	700 mm
Losa con Sobreancho	300 mm	450 mm	750 mm

Los valores por defecto de la desviación estándar se muestran en la siguiente tabla:.

Tabla 9: Desviación Estándar según tipo de Borde

Tipo de Borde	**Desviación Estándar por defecto de distar. Lateral de tráfico**
Borde Libre, Berma de Hormigón, berma granular/asfáltica	250 mm

Solera de Borde	200 mm
Losa con Sobreancho	250 mm

1.3- Propiedades del Hormigón

1.3-1. Resistencia del Hormigón

La resistencia del hormigón se mide por lo general a partir del ensayo de flexotracción (LNV 83). Sin embargo este método permite obtener la resistencia a la flexotracción por medio de la resistencia de probetas cúbicas o cilíndricas utilizando factores de correlación. El factor de correlación se puede modificar en la sección hormigón de factores de calibración.

Como resistencia se debe especificar la resistencia característica a los 28 días.

1.3-2. Confiabilidad de la Mezcla de Hormigón

Nivel de confianza de la mezcla de hormigón. Generalmente se utiliza un 80%.

1.3-3. Desviación Estándar de Diseño del Hormigón

Desviación que tiene el proceso de fabricación del hormigón. Se recomienda 0,4 Mpa.

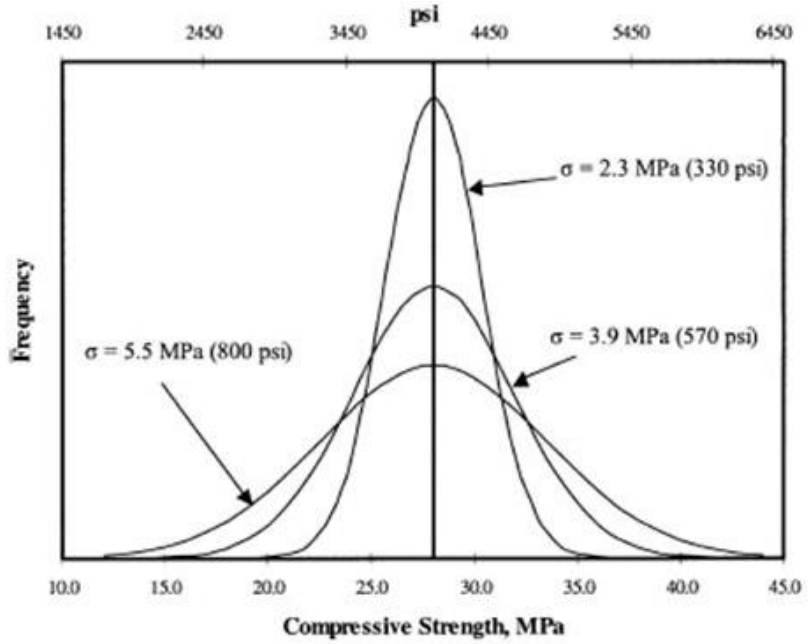


Figura 4: Efecto de la desviación estándar durante la producción de hormigón

1.3-4. Aumento de Resistencia 28-90 Días

Corresponde al incremento porcentual en la resistencia a la Flexo tracción que ocurre desde el día 28 al día 90 en las losas de hormigón. El valor de este depende de cada mezcla, pero se recomienda utilizar por defecto un valor de 1.1 (10%)

1.3-5. Módulo de Rotura del Hormigón (MOR)

Resistencia final de diseño del hormigón. Este valor es el que utiliza el programa para el cálculo de daño por fatiga y es equivalente a la resistencia media a la flexotracción a los 90 días de edad.

Se obtiene de la siguiente relación:

MOR={$R_{flex,28}$+(desvest·Zp)}·Aum.Resist.

$R_{flex,28}$:Resistencia Característica a la flexotracción a 28 días

Desvest: Desv. Estándar de Diseño del Hormigón

Zp: Coeficiente estadístico, asociado al Nivel de Confianza. (1-R) en una curva de distribución normal

Aum.Resist: Aumento de Resistencia del hormigón desde los 28 días a los 90 días.

1.3-6. Módulo de Elasticidad del Hormigón

El Módulo de Elasticidad del hormigón utilizado se puede obtener ya sea a través de ensayo en laboratorio o por medio de correlaciones con la resistencia a la compresión Cilíndrica. En caso de no tener certeza de este valor, se recomienda utilizar la siguiente fórmula que correlaciona resistencia a la compresión con módulo de elasticidad.

$$E_c = 57.600 \cdot \sqrt{f_c'} \text{ (PSI)}$$

$$E_c = 4.780 \cdot \sqrt{f_c'} \text{ (MPA)}$$

Dónde:

E_c: Modulo de Elasticidad
f'_c: Resistencia a la Compresión Cilíndrica

1.3-7. Resistencia Residual del Hormigón con Fibra

La resistencia residual de la fibra se puede ingresar según tres diferentes tipos de ensayo:

- ASTM 1609-10
- Ensayo de Barcelona (UNE 83515-2010)
- ASTM C1399-10

En general se utiliza la norma ASTM 1609-10 como método de ensayo y 1MPa como resistencia residual

1.3-8. Peso Específico del Hormigón

Es el peso de la mezcla de hormigón por unidad de volumen. Se recomienda un valor de 2.400 Kg/m^3

1.3-9. Módulo de Poisson

Es la razón entre la deformación unitaria lateral y la deformación unitaria axial, causada por una carga en el sentido axial. Su valor por defecto es de 0,15 y varía entre 0,1 y 0,25.

1.3-10. Coeficiente de Expansión Térmico

El coeficiente de expansión térmico es una medida de la expansión o contracción de un material al ser sometido a cambios de temperatura. Se utiliza un valor de $1 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1} salvo que se determine el valor por ensayo de laboratorio.

1.3-11. Retracción del Hormigón a 365 Días

La retracción del hormigón es un parámetro de gran importancia en el hormigón que afecta la transferencia de carga que habrá entre dos juntas. Como se ve en la imagen, esta retracción va aumentando a medida que el hormigón se va endureciendo, hasta un punto en el que baja bruscamente y luego se estabiliza. La retracción en este punto es irreversible ya que no disminuye si se sigue saturando la mezcla. Por defecto la Retracción a 365 días se determina aumentando en un 30% este valor final. Se utiliza por defecto 0,0007 (700με).

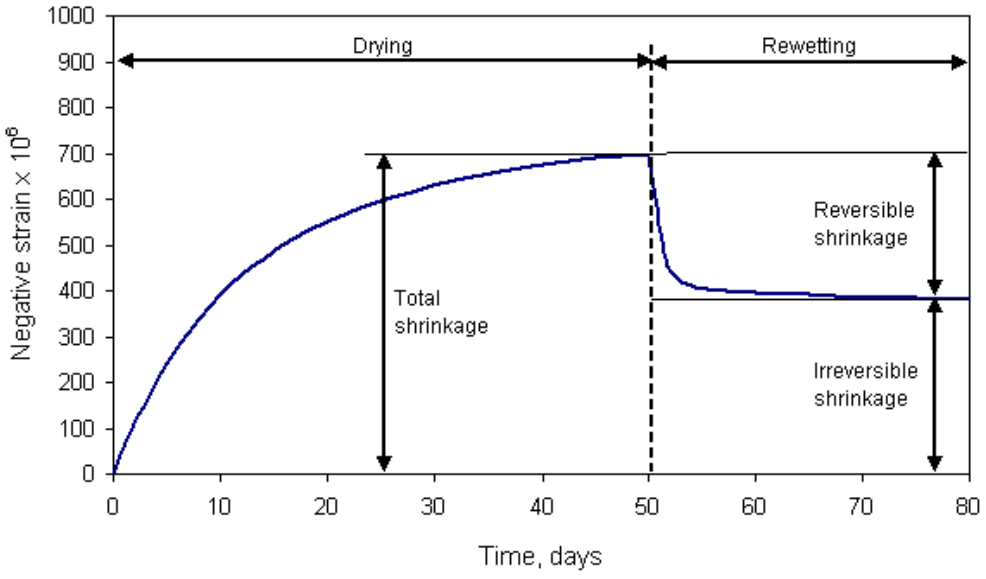


Figura 5: Retracción típica del hormigón en el tiempo

1.3-12. Contenido de Aire

Porcentaje de aire contenido en la mezcla de hormigón.

1.3-13. Relación Agua/cemento

Razón agua utilizada por unidad de cemento en la mezcla de hormigón

1.4- Suelo

1.4-1. Número de Capas

Sin considerar la subrasante como capa, se debe ingresar el número de estratos de suelo, con un mínimo de 0 capas (pavimento directamente sobre la subrasante) hasta un máximo de seis.

1.4-2. Módulo Resiliente de la Capa

A cada capa se le ingresa el módulo resiliente. Este módulo puede correlacionarse con el CBR a través de las siguientes correlaciones:

$$Mr=179,61(CBR)^{0,64} \qquad kg/cm^2$$

1.4-3. Módulo de Poisson

El módulo de poisson de cada capa, debe ser ingresado. El programa trae incorporado una tabla, con el valor recomendado según el tipo de suelo, oprimiendo el botón ayuda.

1.4-4. Espesor de la Capa

Espesor en mm o pulgadas de cada capa. El espesor de la Base esta restringido a un máximo de 200 mm (7,87 pulg). En caso de diseñar con un espesor mayor, dividir la base en dos capas diferentes.

1.4-5. Índice de Erosión de la Base

El índice de erosión de lo, tiene un impacto significativo en la aparición de deterioros en el pavimento, especialmente con el escalonamiento. La resistencia a la erosión se subclasifica en cinco niveles:

- Nivel 1- Materiales extremadamente resistentes a la erosión
- Nivel 2- Materiales muy resistentes a la erosión
- Nivel3- Materiales resistentes a la erosión
- Nivel 4- Materiales poco resistentes a la erosión
- Nivel 5- Materiales muy erosionables

1.4-6. Coeficiente de Fricción Pavimento-Base

Coeficiente de Fricción presente entre la losa de hormigón y la capa soportante, lo que afecta la transferencia de carga del pavimento. Para el caso de suelos granulares, se recomienda usar 0,65.

1.4-7. Porcentaje de Material Fino Bajo Malla N°200 (Capa bajo el Pavimento)

Porcentaje de material fino (Material que pasa la malla N°200) en la capa bajo el pavimento. En caso de colocar el pavimento directo sobre la subrasante

1.4-8. Procesamiento de los Parámetros del soporte del Suelo

El programa utiliza el método K-Sem para obtener los módulos k de la subrasante, para el invierno y el verano. Cabe señalar que el valor K utilizado en el diseño, es diferente para las deflexiones y tensiones de la esquina de la losa, que las tensiones de la junta longitudinal y del borde del pavimento. En la esquina el programa considera a la base como una capa que aumenta el K combinado del suelo, mientras que en la junta longitudinal y el borde del pavimento, es utilizado como parte de la estructura del hormigón, siguiendo el concepto de estructura equivalente.

1.4-9. Método K-Sem

Los datos de entrada son las características de los materiales (módulo de Elasticidad y módulos de Poisson) y el espesor de cada capa. El radio de carga circular es constante y equivalente al radio de la placa de carga. Es importante considerar que el método KSEM considera las características propias del material de cada capa, es decir, la relación de Poisson y los módulos de Elasticidad, lo que genera un resultado del módulo de reacción estático. Sin embargo es muy común trabajar con el módulo de Resiliencia de los materiales, el que nos arroja un resultado relativamente mayor. Es por esto que el software da la opción de utilizar el módulo de elasticidad o el módulo de resiliencia de los materiales, al utilizar este último aparece un factor de 0,5 en el cálculo del módulo de reacción equivalente.

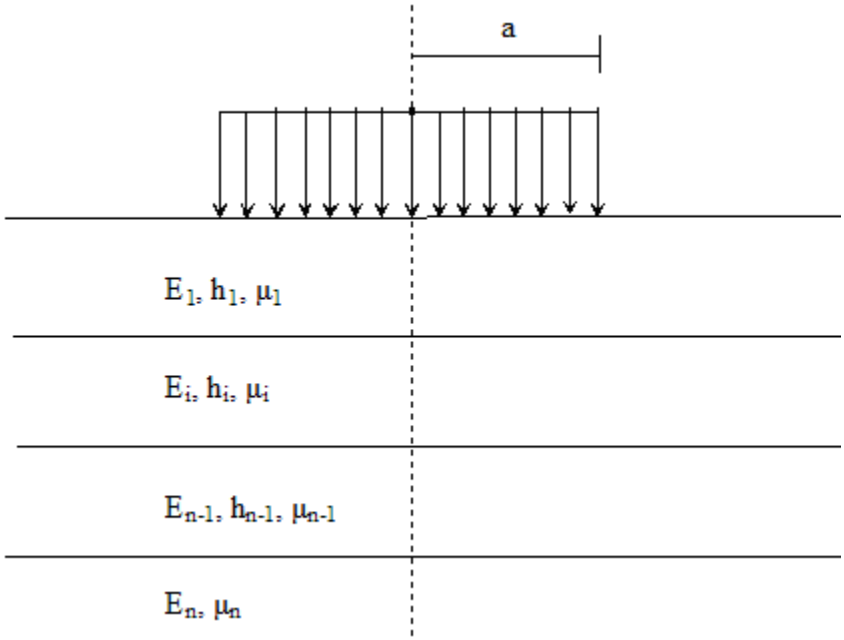


Figura 6: Esquema de un sistema multicapas

Dónde:

- Ei = Módulo de Elasticidad de la capa i

- hi = Espesor de la capa i
- µi = Relación de Poisson de la capa i
- a = Radio de la carga (38.1 cm)

Característica de los Materiales

Módulo de Reacción Equivalente

El cálculo del módulo de reacción equivalente, deriva de la deflexión en la superficie generada por una placa de carga rígida. Este software modela el ensayo de placa de carga de una forma rápida y precisa.

Fórmulas:

Para un masivo semi-infinito (una capa)

$$k = \frac{1.273 \cdot E}{2(1-\mu^2)a}$$

Para dos o más capas:

$$k = \frac{0.0167087 \cdot E_n}{(1-\mu^2)\left[\frac{\left(1-\frac{E_n}{\hat{E}}\right)}{\left[1+\left(\frac{h_1+h_2+\ldots+h_{n-1}}{38.1}\right)^2\left(\frac{\hat{E}}{E_n}\right)^{2/3}\right]^{1/2}}+\frac{E_n}{\hat{E}}\right]}$$

En donde:

$$\hat{E} = E_1\left[\frac{h_1 + h_2\sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}} + h_3\sqrt[3]{\frac{E_3}{E_1}} + \ldots + h_{n-1}\sqrt[3]{\frac{E_{n-1}}{E_1}}}{\sum_{i=1}^{n-1} h_i}\right]^3$$

- Ê = Módulo Equivalente
- Ei = Módulo de Elasticidad de la capa i
- hi = Espesor de la capa i
- µ = Relación de Poisson de la capa n

1.5- Clima

El clima se ingresa a través de bases de datos de las diferentes localidades del país las cuáles entregan ciertas distribuciones de diferenciales de temperatura entre la parte inferior y superior de la losa. El programa viene incorporado con 12 climas. En caso de que ningún clima sea aplicable a la zona en que se construirá el pavimento y no se tenga información, se deberán utilizar los 4 climas genéricos:

- Húmedo- Heladizo
- Húmedo-no Heladizo
- Seco- Heladizo
- Seco-No Heladizo

1.5-1. Gradiente de Construcción

El gradiente de construcción es una estimación del alabeo inicial que se produce en la losa debido a retracciones diferenciales entre la parte superior y la parte inferior de esta. Este gradiente se expresa como el gradiente térmico (ºC) que existiría para tener la losa plana. El valor depende gran parte de la época del año cuando se construye, y del clima de la zona. Debido a que no existe mucha información con respeto a este valor por lo que se recomienda utilizar los siguientes valores según la zona en que se construirá el pavimento:

- Zonas Húmedas sin viento -5ºC.
- Zonas Húmedas con viento y zonas secas sin viento -10ºC
- Zonas Secas con viento y Altura -15º C
- Condiciones Extrema de evaporación de agua -20ºC

1.5-2. Temperatura Media de Invierno

Corresponde a la temperatura media del aire de los 6 meses de menor temperatura del año.

1.5-3. Temperatura Media de Verano

Corresponde a la temperatura media del aire de los 6 meses de mayor temperatura del año.

1.5-4. Temperatura Fraguado del Hormigón

Se define como la temperatura luego de colocado el hormigón y durante el fraguado de la losa en la cual la losa de hormigón no se encuentra ni dilatada ni contraída térmicamente. Esta es la temperatura de referencia, según la cuál la losa se encuentra expandida o contraída térmicamente a una cierto nivel.

En general utilizar la temperatura por defecto (45°C), salvo que la ubicación del proyecto permita definir una temperatura menor a esta.

1.5-5. Número de Días al año con Precipitaciones

Número de días en un año promedio, en que se registran precipitaciones mayores a 2,5 mm.

1.5-6. Índice de Congelamiento de la Base

Porcentaje del tiempo en el año que la base se encuentra a una temperatura inferior a 0°C.

2. Documentación Optipave 2.5

A continuación se presenta la metodología mecánica empírica utilizada en el desarrollo del software de diseño para losas con geometría optimizada, Optipave 2.5.

2.1- Mecanismos de Falla de un pavimento

En este método se consideraron los siguientes 5 mecanismos de falla:

- Agrietamiento transversal en el tercio central de la losa
- Agrietamiento Longitudinal
- Agrietamiento en la Esquina
- Escalonamiento
- Rugosidad (IRI)

2.1-1. Agrietamiento transversal en el tercio central de la losa

Una grieta transversal en el pavimento es una grieta que ocurre en el tercio central de una losa, producto de la fatiga que presenta el material. Esta grieta se origina en la fibra inferior de la losa en el punto del borde de la losa y la mitad longitudinal de la losa.

2.1-2. Agrietamiento Longitudinal

El agrietamiento longitudinal ocurre por tensiones en la fibra inferior de la losa, y se desarrolla en sentido longitudinal atravesando todo el largo de la losa. La ubicación con respecto al borde en donde se origina la falla depende de varios factores entre los que se encuentran: el ancho de la losa, la magnitud del alabeo de la losa, la configuración del paso de los vehículos (distancia con respecto al borde por el que pasan los vehículos), entre otros.

2.1-3. Agrietamiento de Esquina

El agrietamiento de esquina ocurre en la fibra superior de la losa, cuya ubicación depende de varios factores. Este se evalúo en diferentes puntos ya que el origen de la falla no siempre ocurre en la misma ubicación. Debido a la importancia del eje tándem en el origen de este tipo de falla, es que se consideró el efecto de ejes simple y el efecto de ejes tándem.

2.1-4. Escalonamiento en la junta

El escalonamiento en la junta transversal es una diferencia de altura, que se va incrementando en el tiempo, a medida que circula tránsito pesado sobre él. Esta diferencia de altura, se debe a que el material de la base se entre dos losas debido al movimiento del material de la base.

2.1-5. Rugosidad (IRI)

La rugosidad que tiene un pavimento es fundamental a la hora de evaluar el confort que siente un usuario al transitar por un pavimento. El método más utilizado universalmente para medir el nivel de confort que siente un usuario es el índice de rugosidad Internacional (IRI).

En la figura a continuación se método de funcionamiento del programa de diseño Optipave 2.5:

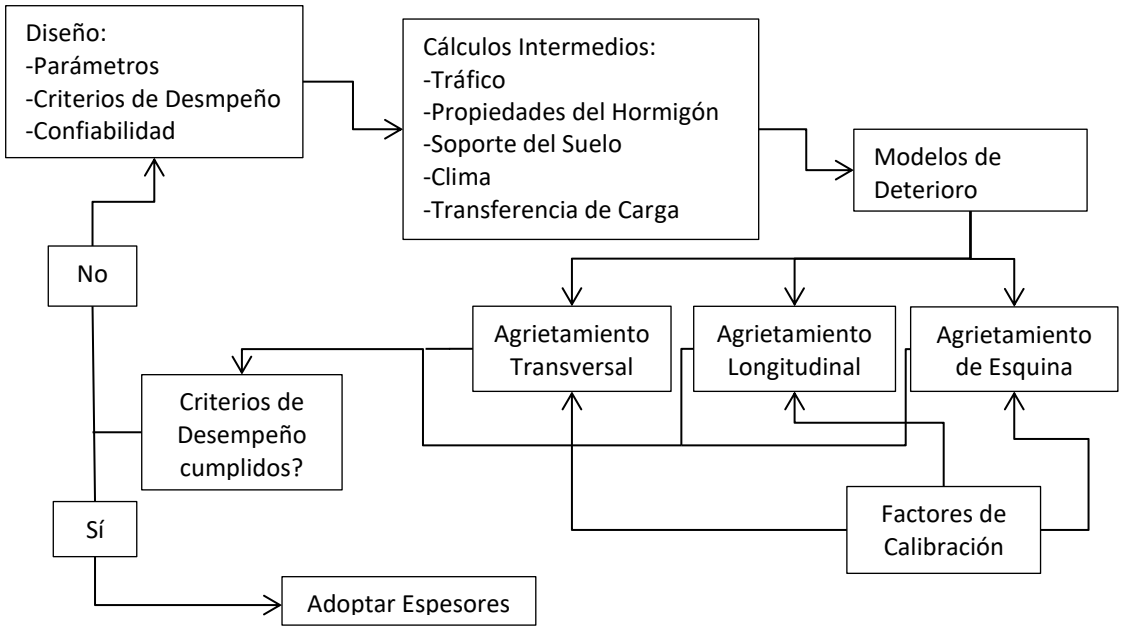


Figura 7: Diagrama de Flujo del Método de Diseño utilizando Optipave

2.2- Estructura Equivalente

Existe un número infinito de posibles combinaciones de variables de diseño, como tráfico, propiedades del hormigón, propiedades de los suelos y propiedades climáticas. La adopción del concepto de estructura equivalente (Khazanovich 1994; Khazanovich et al. 2001) y el entrenamiento de redes neuronales, reducen esta problemática. La metodología empleada se muestra a continuación:

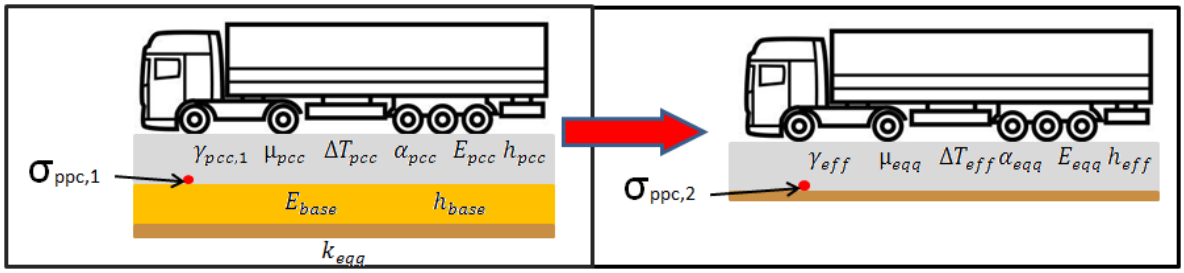


Figura 8: Equivalencia de un sistema de dos capas (Izquierda) en un sistema equivalente de una capa (derecha).

2.2-1. <u>Obtener heff según si es un pavimento adherido o no adherido:</u>

Para el caso no adherido, el espesor efectivo de un sistema equivalente de un sistema de una capa es (Ioannides et al. 1992):

$$h_{eff} := \sqrt[3]{h_{PCC}^3 + \frac{E_{base}}{E_{PCC}} \cdot h_{BASE}^3 +,,,,,,}$$

Con:
h_{eff}: Espesor efectivo
h_{PCC}: Espesor de hormigón
E_{BASE}: Módulo Resilente de la Base
E_{PCC}: Módulo de Elasticidad del Hormigón
h_{BASE}: Espesor de la Base

En el caso adherido, el espesor efectivo de un sistema equivalente de una capa es (Ioannides et al. 1992):

$$h_{eff} := \sqrt[3]{h_{PCC}^3 + \frac{E_{base}}{E_{PCC}} \cdot h_{Base}^3 + 12\left(h_{PCC}\left(x - \frac{h_{PCC}}{2}\right)^2 + \frac{E_{Base}}{E_{PCC}}\left(h_{PCC} + \frac{h_{Base}}{2} - x\right)^2 h_{Base}\right)}$$

Con: x:=Distancia entre el plano neutro y la superficie superior de la capa de hormigón, que se puede determinar a través de la siguiente ecuación:

$$x := \frac{\frac{h_{PCC}^2}{2} + \frac{E_{Base}}{E_{PCC}} h_{Base}\left(h_{PCC} + \frac{h_{Base}}{2}\right)}{h_{PCC} + \frac{E_{Base}}{E_{PCC}} h_{Base}}$$

2.2-2. <u>Obtener el diferencial efectivo lineal de temperatura:</u>

Para el caso No Adherido (Ioannides and Khazanovich 1998):

$$\Delta T_{eff} := \frac{h_{PCC}^2}{h_{eff}^2} \cdot \Delta T$$

Para el caso Adherido (Ioannides and Khazanovich 1998):

$$\Delta T_{eff} := \frac{h_{PCC} \cdot \Delta T \cdot (6 \cdot x - 2 \cdot h_{PCC})}{h_{eff}^2}$$

2.2-3. Calcular el Peso Específico Efectivo (γ_{eff})

Para el caso no adherido (Khazanovich 1994):

$$\gamma_{eff} := \frac{\gamma_{PCC} \cdot h_{PCC}}{h_{eff}}$$

Dónde:

γ_{eff}: Peso Específico efectivo
γ_{PCC}: Peso Específico Hormigón
h_{eff}: Espesor efectivo
h_{PCC}: Espesor de hormigón

2.2-4. Calcular el Radio de Rigidez Relativo (l)

Tanto para el caso adherido como el caso no adherido, el radio de rigidez relativo (Westergaard 1927) se obtiene de:

$$l = \sqrt[4]{\frac{E_{PCC} h_{eff}^3}{12 * (1 - \mu^3) * k}}$$

l: Radio de Rigidez Relativo
E_{PCC}: Módulo de Elasticidad del Hormigón
h_{eff}: Espesor efectivo
μ: Módulo de Poisson
k: Módulo de Reacción de la Subrasante

2.2-5. Gradiente de Temperatura adimensional de Korenev

Según (Korenev and Chernigovskaya 1962), el gradiente de temperatura adimensional de Korenev se obtiene de la siguiente fórmula:

$$\phi = \frac{2\alpha_{PCC}(1+\mu_{PCC})l^2 k}{h_{eff}^2 \gamma_{eff}} \Delta T_{eff}$$

ϕ: Gradiente de Temperatura adimensional de Korenev
α_{PCC}: Coeficiente de Dilatación Térmico
μ_{PCC}: Módulo de Poisson del Hormigón
l: Radio de Rigidez Relativo
k: Módulo de Reacción de la Subrasante
h_{eff}: Espesor efectivo
γ_{eff}: Peso Específico efectivo
ΔT_{eff}: Diferencial de temperatura efectivo entre la parte inferior y superior de la losa.

2.2-6. Concepto de Estructura Equivalente

El concepto de estructura equivalente consiste en que si se cumplen las siguientes condiciones, las tensiones entre una estructura y otra son equivalentes. Las condiciones son:

i. $l_1 = l_2$
ii. $L_1 = L_2$
iii. $\Phi_1 = \Phi_2$
iv. $\frac{AGG_1}{k_1 l_1} = \frac{AGG_2}{k_2 l_2}$
v. $\frac{P_{a,1}}{h_{pcc,1}\gamma_{pcc,1}} = \frac{P_{a,2}}{h_{pcc,2}\gamma_{pcc,2}}$
vi. $s_1 = s_2$

Dónde:

l: Radio de rigidez relativo

L: Largo de la losa

Φ: Radio de rigidez relativo

AGG: Factor de trabazón de la junta

P_a: Peso de eje

γ_{pcc}: Peso específico del hormigón

s: Distancia entre el borde de la losa y el borde de la rueda externa

1 y 2: Losa 1 y 2 respectivamente.

2.2-7. Corrección de Huella

Debido a la corrección de carga por el concepto de estructura equivalente explicado anteriormente, por lo que para espesores bajos se obtienen cargas altas, lo que sumado a que la presión del

neumático no se modificó en las diferentes corridas de elementos finitos iniciales, es que hay que hacer una corrección de la huella, modelando las cargas a diferentes presiones del neumático, de modo de obtener una huella similar a la del caso que se está evaluando. Para esto hubo que desarrollar una set de redes neuronales para el agrietamiento transversal, longitudinal y esquina.

Si se cumplen las condiciones antes mostradas, entonces es posible obtener la tensión de una losa cualquiera (1) a través de la tensión obtenida de la red neuronal (2) utilizando la siguiente ecuación:

$$\sigma_{pcc,1} = \frac{h_1^2 h_2 \gamma_1}{h_{eff}^3 \gamma_2}(\sigma_{pcc,2} - \sigma_{NN,Huella}) - \frac{E_{pcc,1}}{1-\mu_{pcc,1}}\alpha_{pcc,1} \cdot \left(\frac{h_{eff}^3 - h_{pcc}^3}{2 \cdot h_{eff}^3}\right) \cdot (T_{top} - T_{bot})$$

Con:

$$\sigma_{pcc,2} = \sigma_{NN}\left(l_1, L_1, \varphi_{1,} \frac{AGG_1 k_2 l_2}{k_1 l_1}, \frac{P_{a,1} h_{pcc,2} \gamma_{pcc,2}}{h_{pcc,1} \gamma_{pcc,1}}\right)$$

2.3- Cálculo de Tensiones por medio de Islab2000:

Con el fin generar una base de datos de tensiones y deformaciones para los modelos de agrietamiento, escalonamiento y pérdida de transferencia de carga, que permitan desarrollar las redes neuronales, se utilizó el software de elementos finitos ISLAB 2000 (Khazanovich et al. 2000). A continuación se muestran los parámetros considerados para el análisis de tensiones.

2.3-1. Variables de diseño

Se consideraron las siguientes variables de diseño

2.3-1.1. Dimensiones de las Losas

Se consideraron 6 geometrías de las losas, divididos en 3 largos de losa:

- 1,4 m
- 1,8 m
- 2,3 m

y 2 anchos diferentes:

- 1,8 m
- 2,1 m (losa con sobreancho).

2.3-1.2. Tipos de Ejes y Cargas

Se consideraron los siguientes tipos de ejes y cargas:

- Tipo de Eje: EJE Simple Rueda Doble y Eje Doble Rueda Doble
- Intervalos de Carga: 0, 3.000, 6.000, 12.000 , 16.000, 25000 y 40.000 Kg

2.3-1.3. Configuración de los EJES

Debido a que el sistema de pavimentos TCP únicamente permite a que un eje simple o un eje doble cargue una losa simultáneamente, es que se pudo simplificar la configuración de ejes en el análisis de elementos finitos a ejes simples y dobles.

La siguiente tabla muestra la configuración del eje Simple (

Tabla 10) y eje Doble (Tabla 11)

Tabla 10: Configuración del Eje Simple

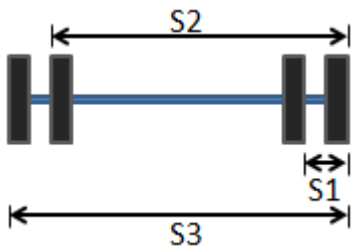
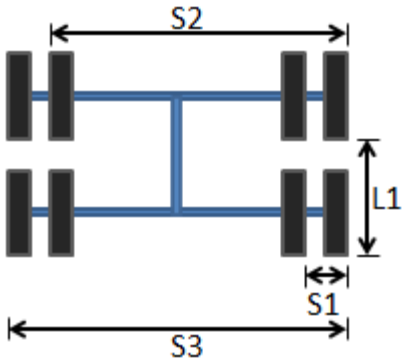
Tipo de Eje: Eje Simple Rueda Doble		
	Parámetro	
	S1	31 cm
	S2	182 cm
	S3	213 cm
	Presión Neumáticos	8,2 Kg/cm^2
	Ancho Neumático	25 cm

Tabla 11: Configuración del Eje Doble

Tipo de Eje: Eje Doble Rueda Doble		
	Parámetro	
	S1	31 cm
	S2	182 cm
	S3	213 cm
	L1	145 cm
	Presión Neumáticos	8,2 Kg/cm^2
	Ancho Neumático	25 m

2.3-1.4. Propiedades del Hormigón

Se hicieron corridas con distintos valores del módulo elástico del hormigón, de modo de producir nueve valores del radio de rigidez relativo, entre el menor y el mayor posible:

Tabla 12: Valores de módulo de elasticidad utilizado y el correspondiente valor de Radio de Rigidez Relativo

E_{PCC} (kg/cm^2)	Radio de Rigidez Relativo (cm)
4.000	18,4
10.000	23,2
30.000	30,5
100.000	41,2
300.000	54,2
500.000	61,6
1.000.000	73,2
2.500.000	92,1
5.000.000	109,5

Las otras propiedades del hormigón utilizadas, fueron:

- h_{PCC}: 15 cm
- α_{PCC}: 10^{-5} °C^{-1}
- μ_{PCC}: 0.15
- γ_{PCC}: 0.002 Kg/cm^3

2.3-1.5. Propiedades de la Subrasante

Al utilizar el método mediante estructura equivalente, hubo que realizar las corridas con un único valor de módulo de reacción de la subrasante (k=10Kg/cm2)

2.3-1.6. Transferencia de Carga

La transferencia de carga en una junta es de vital importancia en un pavimento de hormigón ya que a mayor valor de esta, la carga se distribuye en una mayor área con las losas vecinas. La transferencia de carga del pavimento proviene de la trabazón mecánica entre los agregados bajo la junta aserrada, en el caso de que el pavimento tenga barras de transferencia de carga estas aportan a generar traspaso de carga. Aprovechando que la distancia de los cortes de inducción de juntas es menor, se produce un menor ancho de las grietas inducidas y por ende una mayor transferencia de carga. En el programa de elementos finitos se modelaron las siguientes transferencias de carga:

- Borde: Se consideran tres transferencias de carga diferentes según el tipo de borde
    - 0% (Borde Libre, Vereda)

- 5% (Berma Granular/ Asfáltica)
- 25% (Berma de Hormigón)

- Junta Transversal:

  - Agrietamiento Transversal: Se evaluó únicamente 50% de transferencia de carga en la junta transversal, ya que el efecto es prácticamente nulo.
  - Agrietamiento Longitudinal y de Esquina: La transferencia de carga en la junta transversal se obtiene por medio del modelo de transferencia de carga (1.4). Debido a que la transferencia de carga varía según las condiciones climáticas en que se encuentre la losa, se utiliza una t.c. en invierno y otra en verano.
- Junta Longitudinal:
  - Se considera una transferencia de carga de 50% en la junta longitudinal, ya que su efecto es prácticamente nulo en magnitud de las tensiones generadas

2.3-1.7. Diferencial de Temperatura Efectivo (ΔT_{eff})

Se hicieron corridas con distintos valores del diferencial efectivo de temperatura, de modo de producir nueve valores de Gradiente de Temperatura adimensional de Korenev, entre el menor y mayor valor posible:

Tabla 13: Valores de Diferencial de Temperatura efectivo considerados y el correspondiente gradiente de temperatura de Korenev.

ΔT_{eff} (°C)	Gradiente de Temperatura adimensional de Korenev
-80	-100,1
-50	-62,6
-25	-31,3
-10	-12,5
0	0,0
10	12,5
20	25,0
40	50,1
65	81,3

2.3-2. Factorial de Corridas

El factorial para las corridas de elementos finitos en el caso de grieta transversal en el centro de la losa se resume en la siguiente tabla:

Tabla 14: Factorial de Corridas para el Agrietamiento Transversal

Dimensiones Losa		*TIPO de EJE: ESRD*			*Transferencia de Carga*			*Propiedades del Material*	
Largo	*Ancho*	*Peso (KG)*	*Ubicación (cm)*		*Borde (%)*	*Junta Longitudinal (%)*	*Junta Transversal (%)*	*Radio Rig. Relativo (cm)*	*Φ Korenev*
			x	*Y*					
140	*180*	*0*	*0*	*L/2*	*0*	*50*	*50*	18,4	-100
180	*210*	*3.000*	*10*		*25*			23,2	-63
230		*6.000*	*25*		*50*			30,5	-31
		10.000	*50*					41,2	-13
		16.000						51,8	0
		25.000						61,6	13
		40.000						73,2	25
								92,1	50
								109,5	81
3	*2*	*7*	*4*	*1*	*3*	*1*	*1*	9	9

Conteo de Casos corridos por Elementos Finitos para Falla Transversal: 40.824

Tabla 15: Factorial de Corridas para el agrietamiento Longitudinal, agrietamiento de esquina de eje simple y escalonamiento de eje simple

Dimensiones Losa		*TIPO de EJE: ESRD*			*Transferencia de Carga*			*Propiedades del Material*	
Largo	*Ancho*	*Peso (KG)*	*Ubicación (cm)*		*Borde (%)*	*Junta Longitudinal (%)*	*Junta Transversal (%)*	*Radio Rig. Relativo (cm)*	*Φ Korenev*
			x	*Y*					
140	*180*	*0*	*0*	*L/2*	*0*	*50*	*10*	18,4	-100
180	*210*	*3.000*	*10*		*25*		*30*	23,2	-63
230		*6.000*	*25*		*50*		*50*	30,5	-31
		10.000	*50*				*80*	41,2	-13
		16.000	*80*					51,8	0
		25.000						61,6	13
		40.000						73,2	25
								92,1	50
								109,5	81
3	*2*	*7*	*5*	*1*	*3*	*1*	*4*	9	9

Conteo de Casos corridos por Elementos Finitos para Falla Longitudinal, Falla de Esquina de Eje Simple y

Escalonamiento de Eje Simple: 204.120

Tabla 16: Factorial de Corridas para el agrietamiento de esquina de eje doble y escalonamiento de eje doble

Dimensiones Losa		*Tipo de EJE: EDRD*			*Transferencia de Carga*			*Propiedades del Material*	
Largo	*Ancho*	*Peso EDRD (Kg)*	*Ubicación (cm)*		*Borde (%)*	*Junta Longitudinal (%)*	*Junta Transversal (%)*	*Radio Rig. Relativo (cm)*	*Φ Korenev*
			x	*Y*					
140	*180*	*0*	*0*	*Junta*	*0*	*50*	*10*	18,4	-100
180	*210*	*6.000*	*10*		*25*		*30*	23,2	-63
230		*12.000*	*25*		*50*		*50*	30,5	-31
		20.000	*50*				*80*	41,2	-13
		30.000						51,8	0
		50.000						61,6	13
		80.000						73,2	25
								92,1	50
								109,5	81
3	*2*	*7*	*4*	*1*	*3*	*1*	*4*	9	9

Conteo de Casos corridos por Elementos Finitos para Falla de Esquina de Eje Doble y Escalonamiento de Eje Doble: 204.120

Como se explicó anteriormente, hubo que desarrollar una red neuronal de corrección de la huella. Esta red fue simplificada ya que el efecto del diferencial de temperatura es despreciable. Los parámetros utilizados para estas redes neuronales son las mostradas en la tabla 9 para agrietamiento transversal, tabla 10 para agrietamiento longitudinal y tabla 11 para agrietamiento de esquina.

Tabla 17: Factorial de corridas para corrección de huella en agrietamiento transversal

Dimension Losa		Eje Simple				Transferencia de Carga			Propiedades del Material	
Largo	Ancho	Carga (KG)	Presión de la Rueda (Kg/cm^2)	Ubicacion (cm)		Borde (%)	Long. (%)	Transv. (%)	Radio de Rigidez Relativo (cm)	Φ Korenev
				X	Y					
180	180	0	4	0	L/2	0	50	50	18,4	0
		4.000	6	10		5			23,2	
		8.000	8,2	25		25			30,5	
		12.000	10	40		50			41,2	
		16.000	12	75					58,2	

		25.000	15	120					61,6	
		40.000	18						73,2	
			21						87,1	
									109,5	

Tabla 18: Factorial de corridas para corrección de huella en agrietamiento longitudinal y esquina eje simple

Dimension Losa		Eje Simple				Transferencia de Carga			Propiedades del Material	
Largo	Ancho	Carga (KG)	Presión de la Rueda (Kg/cm^2)	Ubicacion (cm)		Borde (%)	Long. (%)	Transv. (%)	Radio de Rígidez Relativo (cm)	Φ Korenev
				X	Y					
180	180	0	4	0	Junta	0	50	50	18,4	0
		4.000	6	10		5			23,2	
		8.000	8,2	25		25			30,5	
		12.000	10	40		50			41,2	
		16.000	12	75					58,2	
		25.000	15	120					61,6	
		40.000	18						73,2	
			21						87,1	
									109,5	

Tabla 19: Factorial de corridas para corrección de huella en agrietamiento de esquina eje doble

Dimension Losa		Eje Doble				Transferencia de Carga			Propiedades del Material	
Largo	Ancho	Carga (KG)	Presión de la Rueda (Kg/cm^2)	Ubicacion (cm)		Borde (%)	Long. (%)	Transv. (%)	Radio de Rígidez Relativo (cm)	Φ Koronev
				X	Y					
180	180	0	4	0	Junta	0	50	50	18,4	0
		8.000	6	10		5			23,2	
		16.000	8,2	25		25			30,5	
		24.000	10	40		50			41,2	
		32.000	12	75					54,2	
		50.000	15	120					61,6	
		80.000	18						73,2	
			21						92,1	
									109,5	

2.4- Algoritmo de Fatiga

2.4-1. Modelo de Agrietamiento

El modelo de agrietamiento se basa en la suma de daño por fatiga (FD), a través de la siguiente relación:

$$CRK = \frac{1}{1 + bFD^{a}}$$

Con a,b factores a calibrar para cada tipo de agrietamiento (transversal, longitudinal y esquina)

El daño por fatiga en tanto se obtiene por el cuociente entre el número de pasadas reales de una cierta carga dividido por el número de pasadas admisibles:

$$FD = \sum \frac{n_{i,j,k,l}}{N_{i,j,k,l}}$$

FD:= Daño por fatiga total

$n_{i,j,k,l}$,:=Numero de repeticiones de carga aplicadas para la condición i,j,k,l,m,n

$N_{i,j,k,l}$:=Numero de repeticiones admisibles para la condición i,j,k,l,m,n

i:= Tipo de eje

j:= Nivel de carga

k:= Diferencial de Temperatura

l:= Posición del eje

El número de repeticiones de cargas admisibles para cada condición se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$\log\left(N_{i,j,k,l}\right) = 2 \cdot \left(\frac{\sigma_{i,j,k,l}}{MOR \cdot C_1 \cdot C_2}\right)^{-1,22}$$

$\sigma_{i,j,k,l}$:= Tensión aplicada, condición i,j,k,l

MOR: Resistencia a la flexotracción final

C_1:= Constante cuyo valor se explica por la forma de la fractura

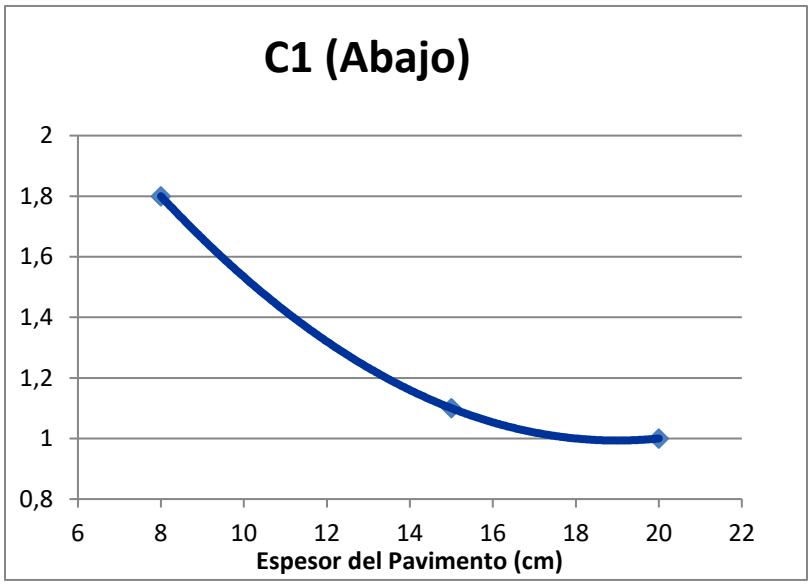


Figura 9: Magnitud Factor C1 según el espesor del pavimento

C2:= Constante que depende de la magnitud de resistencia residual aportada por la fibra (en caso de que se diseñe con fibra, de lo contrario $C_2 = 1$).

$C_2 = (1+R_{3,e})$

$$R_{3,e} = \frac{f_{150}^{150}}{MOR}$$

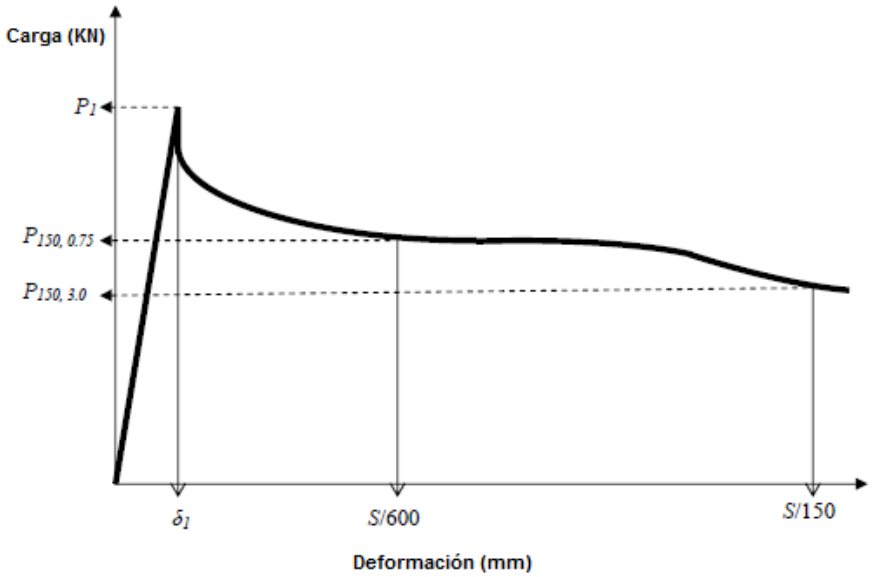


Figura 10: Curva carga-Deformación para un pavimento con fibra.

Calculo Losas agrietadas final 50% de confiabilidad:

$CRK_{50} = CRK_E + CRK_L + CRK_T - CRK_E \cdot CRK_L - CRK_E \cdot CRK_T - CRK_L \cdot CRK_T + CRK_E \cdot CRK_L \cdot CRK_T$

Donde

- CRK_{50} = % Losas agrietadas Totales, 50% de confiabilidad
- CRK_E = % Losas agrietadas en Esquina
- CRK_L =% Losas agrietadas Longitudinalmente
- CRK_T =% Losas agrietadas Transversalmente

Dónde:

- CRK_E = Máx. (CRK_{Ei})
- CRK_L = Máx. (CRK_{Li})

Con i: Punto de evaluación de tensiones.

2.4-2. Confiabilidad del Agrietamiento

El agrietamiento a un cierto nivel de confianza (m) se obtiene de la siguiente fórmula:

$CRACK_m = CRACK + Z_p \cdot STD_{CR}$

$$STD_{CR} = a \cdot CRACK^2 + b \cdot CRACK + c$$

Dónde:

$CRACK_m$ = Porcentaje Losas agrietadas Totales con M % de confiabilidad

CRACK= % Losas agrietadas Totales

a,b,c = Factores a calibrar

Zr = coeficiente estadístico, asociado al Nivel de Confianza. (1-R) en una curva de distribución normal

2.4-3. Efecto de la distribución de pasado de los ejes

La posición con respecto al borde, por la que pasan los ejes, es muy sensible respecto a la tensión que producirá en el pavimento, como se muestra en la Figura 11:

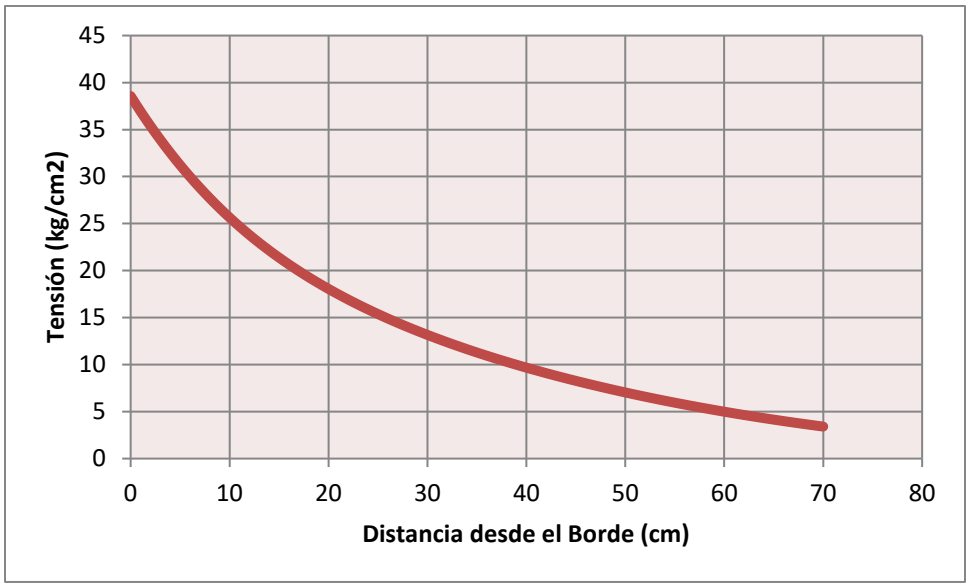


Figura 11: Efecto de la posición del eje respecto a la tensión

La posición en que el eje circula, varía dependiendo del tipo de pavimento. Generalmente circula en el medio de una pista, pero esto puede cambiar, ya que por ejemplo si circula en un camino de una pista por cada sentido, tenderá a circular más cerca del borde del pavimento, que de la línea de demarcación del centro del camino. Por otro lado en caso de pavimentos con sobreancho en que la línea de demarcación se encuentra distanciada del borde del pavimento, la circulación será más cercana a la línea de demarcación del centro del camino que del borde del pavimento. La probabilidad de que un cierto vehículo circule a cierta distancia del borde del pavimento, sigue una distribución estándar con media en la huella del camino, como se muestra en la Figura 12.

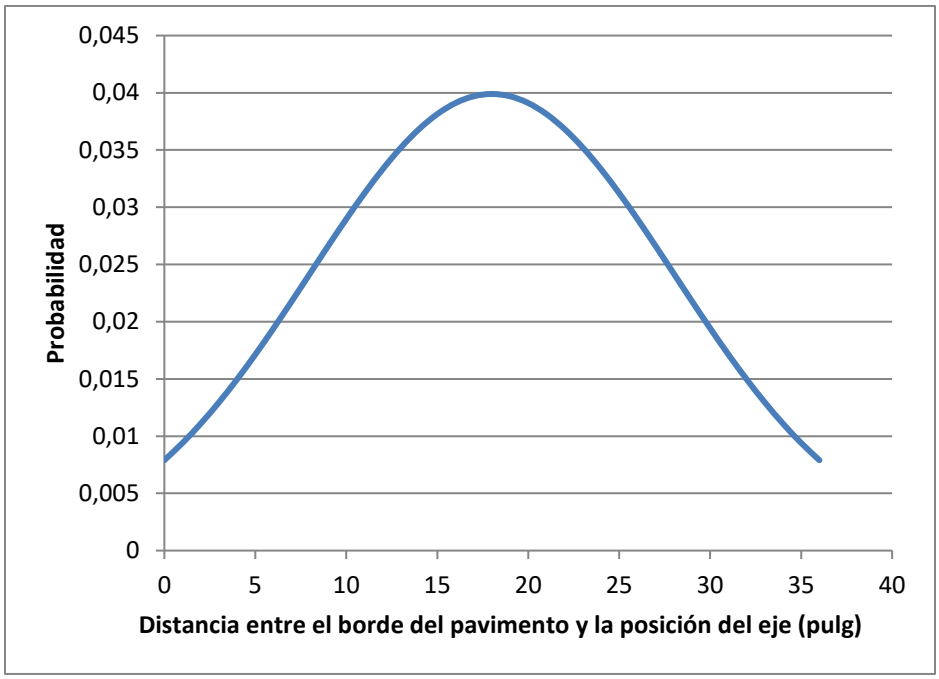


Figura 12: Probabilidad de que un eje circule a cierta distancia del borde del pavimento

Por lo tanto, la tensión producida por un eje de tipo l, peso j, con el pavimento a un diferencial de temperatura k, $\sigma_{i,j,k}$, se calcula como:

$$\sigma_{i,j,k} = \int_{x=0}^{x=w} \sigma(x)_{i,j,k} \cdot prob(x) d(x)$$

Dónde:

X: Posición de la Carga

$\sigma(x)_{i,j,k}$: tensión producida por un eje de tipo l, peso j, con el pavimento a un diferencial de temperatura k y posición x

prob(x): Probabilidad que la carga este en la posición x

w: Ancho de la losa de hormigón

Esta ecuación se puede simplificar dividiendo la curva en n rectángulos de ancho wx y altura px:

$$\sigma_{i,j,k} = \sum_{x=1}^{n} \sigma(x)_{i,j,k} \cdot w_x \cdot p_x$$

2.4-4. Modelo de Distribución del Tráfico para agrietamiento Transversal y de Esquina:

El modelo de distribución de tráfico para agrietamiento transversal y de esquina considera cinco posiciones. Debido a que, para estos dos casos, el tráfico cercano al borde es muchísimo mayor, la mayor cantidad de puntos de evaluación se encuentran en las cercanías del borde del pavimento. Los cinco puntos son:

- 0 cm del borde
- 5 cm del borde
- 10 cm del borde
- 20 cm del borde
- A 60 cm del borde (borde libre o con berma) 70 cm (solera de borde) y 75 cm (Sobreancho)

2.4-5. Modelo de Distribución del Tráfico para agrietamiento Longitudinal

Para la tensión de agrietamiento longitudinal, el efecto de la posición del eje es también de suma importancia, ya que la tensión es mayor cuando la carga se encuentra sobre el punto de evaluación y considerablemente menor cuando se encuentra alejado del punto de evaluación. Debido a que ambas ruedas interactúan entre sí y que calcular de forma correcta la tensión puede ser bastante complejo, que se calculó la tensión máxima cuando la rueda se encuentra sobre el punto de evaluación y considerar una tensión nula cuando la rueda se encuentra fuera del punto de evaluación. Los tres puntos de evaluación fueron definidos dependiendo del tipo de borde que tenga el pavimento y si tiene o no sobreancho.

Para calcular la probabilidad de que el área afectada este sobre el punto de evaluación, el usuario debe definir el área afectado, el cuál es la distancia entre el borde externo de una rueda y el borde externo de la segunda rueda, es decir dos veces el ancho de una rueda (Tw) más el espacio libre entre las dos ruedas (Ts) como se muestra en la Figura 13:

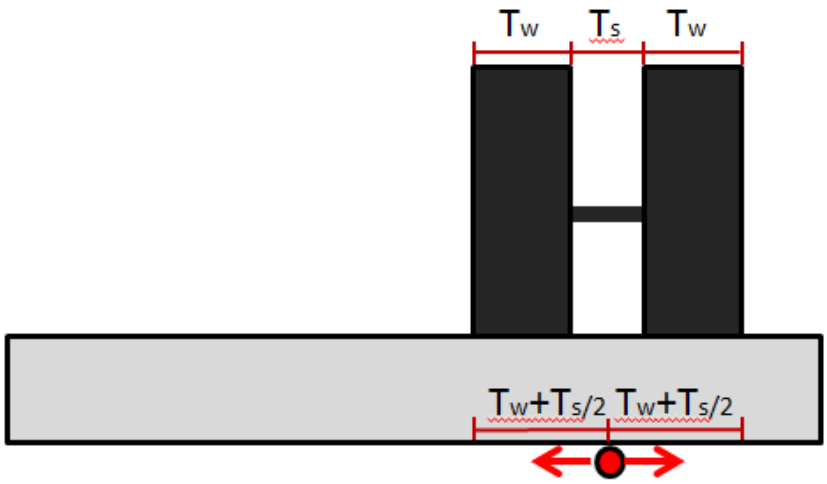


Figura 13: Área afectada por una rueda doble

La tensión producida por el tipo de eje l, carga j y diferencial de temperatura k en el punto de evaluación m $\sigma_{i,j,km}$ para el modelo de agrietamiento longitudinal es:

$$\sigma_{i,j,k,m} = \sum_{x=0}^{w} Max\ \sigma_{i,j,k,m}(x)\,.\,prob(x)$$

2.4-6. Cálculo del Número de Pasadas

2.4-6.1. Número de Pasadas para el Agrietamiento Transversal

El eje simple se modela en la posición crítica que es al centro de la losa, con el total del peso del eje como se muestra en la Figura 14.

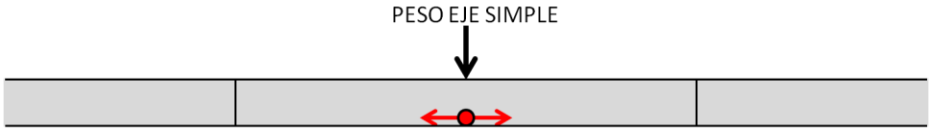


Figura 14: Ubicación del eje simple en el cálculo de agrietamiento transversal.

La tensión crítica provocada por el eje doble se calcula ubicando la mitad de la carga en el centro de la losa y despreciando la segunda carga. Esta simulación se repite una vez en cada eje doble como se muestra en la Figura 15.

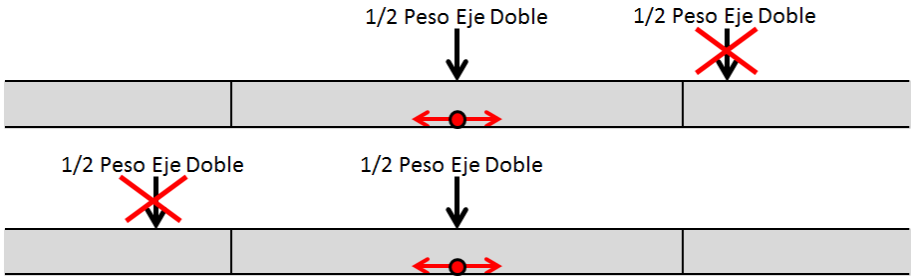


Figura 15: Simplificación del eje doble en el cálculo de agrietamiento transversal

EJE Trídem

La tensión crítica provocada por el eje triple es similar a la del eje doble, ubicando un tercio de la carga en el centro de la losa y despreciando las otras dos cargas. Esta simulación se repite dos veces en cada eje triple como se muestra en la Figura 16.

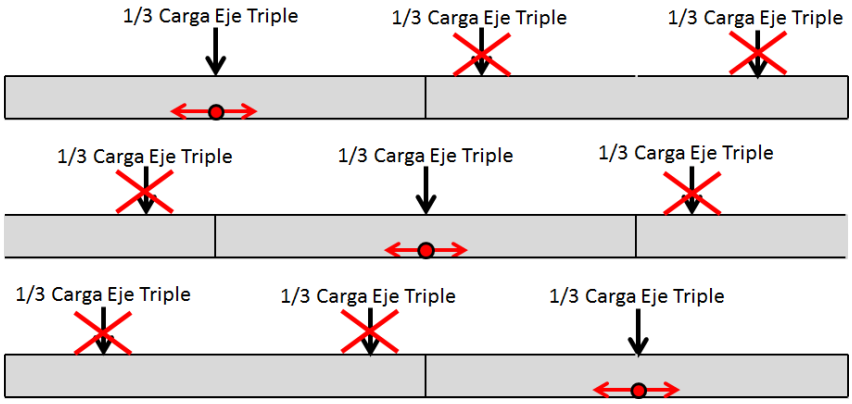


Figura 16: Simplificación del eje triple en el cálculo de agrietamiento transversal

2.4-6.2. <u>Agrietamiento Longitudinal</u>

El cálculo de repeticiones de carga según el tipo de eje, para el agrietamiento longitudinal, es similar al transversal, solo que la carga se ubica en la junta transversal de la losa.

El eje simple se modela en la posición crítica que es al borde de la junta longitudinal de la losa, con el total del peso del eje como se muestra en la Figura 17:

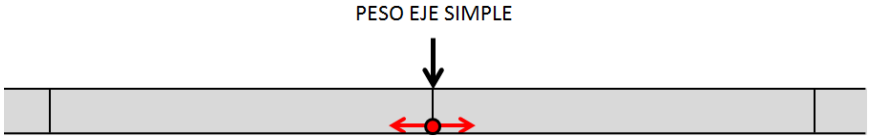


Figura 17: Ubicación del eje simple en el cálculo de agrietamiento longitudinal.

El eje doble en tanto, es similar al simple, con la mitad de la carga en la junta transversal y despreciando la otra carga. Se repite una vez el caso, como se muestra en la Figura 18:

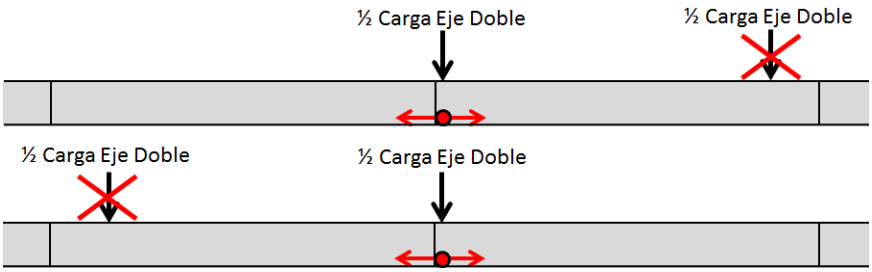


Figura 18: Simplificación del eje doble en el cálculo de agrietamiento longitudinal

Al igual que en el caso del agrietamiento transversal, el eje triple se simplifica modelando una pura carga en la junta transversal, con un tercio de la carga del eje y despreciando las otras dos cargas. Esto se repite dos veces como se muestra en la Figura 19.

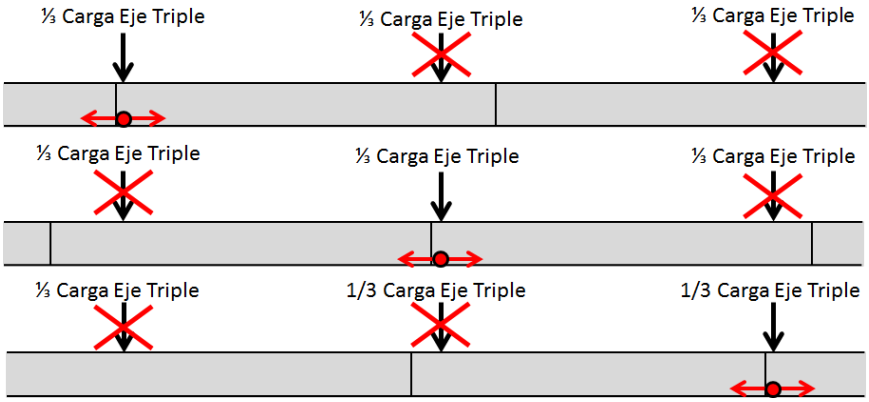


Figura 19: Simplificación del eje triple en el cálculo de agrietamiento longitudinal.

2.4-6.3. Agrietamiento de Esquina

Para el agrietamiento de esquina, es importante considerar el eje doble en la losa ya que ocurre flexión en la parte superior de la losa, en el borde del pavimento y por lo tanto no es posible simplificar esa tensión como en el caso longitudinal y transversal. Para ejes simples, la carga está situada en la junta transversal del pavimento, como se muestra en la Figura 20 .

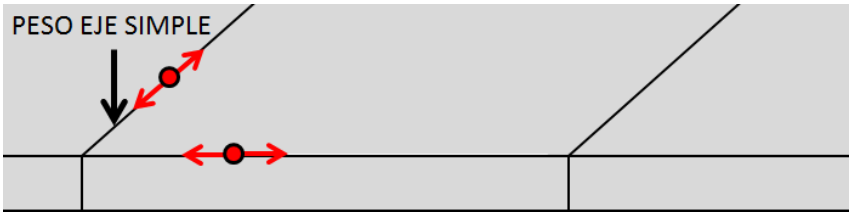


Figura 20: Ubicación del Eje Simple para determinar el agrietamiento de esquina

Para el eje doble, la rueda delantera se sitúa en la junta transversal. Se debe también considerar el eje trasero en la junta transversal, considerándolo como un eje simple. Esto se muestra con mayor claridad en la Figura 21

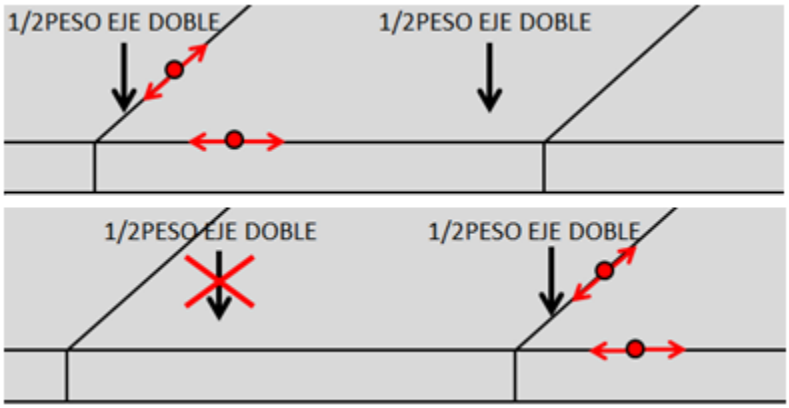


Figura 21: Simplificación del eje doble en el cálculo de agrietamiento de esquina

Por ultimo para el eje triple, se consideran tres repeticiones por cada eje triple, dos ejes dobles y luego un eje simple, como se muestra en la Figura 22

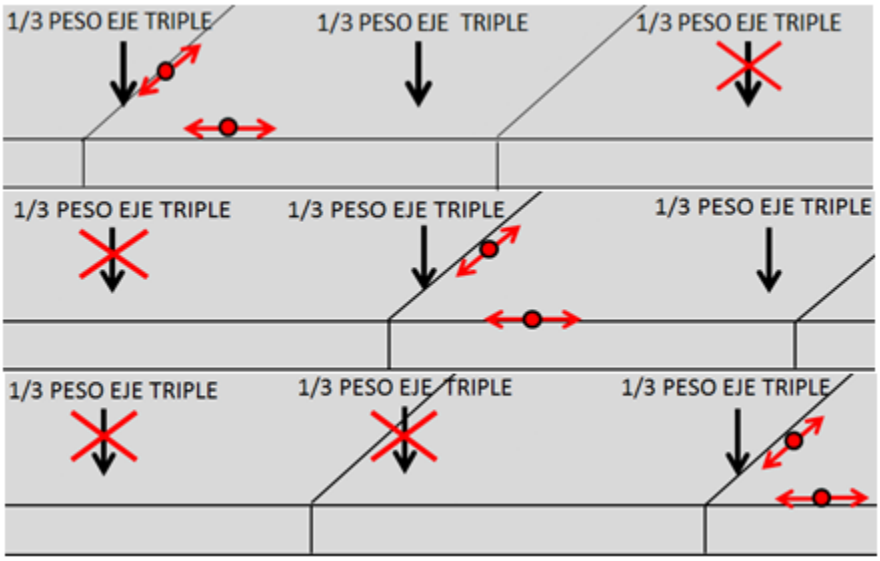


Figura 22: Simplificación del eje triple en el cálculo de agrietamiento de esquina

2.5- Modelo De Transferencia de Carga

La transferencia de carga transversal se calcula a través del siguiente modelo de transferencia de carga (Zoelhinger)

$$cw = Max(L \cdot \beta \cdot (\alpha \cdot (T_{constr.} - T_{media}) + \varepsilon_{horm})$$

Dónde:

- cw: Ancho de grieta
- L: Espaciamiento de las juntas
- β: coeficiente de fricción base-hormigón
- α: Coeficiente de dilatación térmico
- T_{constr}: Temperatura de construcción del hormigón
- $T_{promedio}$: Temperatura media
- ε_{horm}: Retracción hidraúlica del hormigón

Debido a que la apertura de las juntas es mayor en invierno que en verano, se calculó a partir de esta ecuación la apertura de las juntas en verano y en invierno, considerando una temperatura media de invierno y otra diferente durante el verano, por lo que se obtienen dos transferencias de carga diferentes según la estación.

aggr. joint shear capacity (s)

$$s = a \cdot \left(h_{pcc}\right)^{b} \cdot e^{d \cdot c_w} - \Delta s_i$$

Dónde:

- a,b,c constantes de calibración: a=0,07, b=1,36 y d=-0,0342
- h_{pcc}: Espesor de capa de hormigón
- Pérdida de transferencia de carga acumulada en el semestre i (ver cap. 6.1)

$$Log(agg/kl) = a \cdot e^{-e^{-\left(\frac{J_s-b}{c}\right)}} + d \cdot e^{-e^{-\left(\frac{s-e}{f}\right)}} + g \cdot e^{-e^{-\left(\frac{J_s-b}{c}\right)}} \cdot e^{-e^{-\left(\frac{s-e}{f}\right)}}$$

Con:

- a=-4
- b=-11,26
- c=7,56
- d=-28,85
- e=0,35
- f=0,38
- g=56,25
- s: aggr. joint shear capacity
- J_s: transferencia de carga entre el borde y la berma

x=log(agg/kl)+4

$$Log(agg/kl) = \frac{0{,}15984353 + 0{,}13029748 \cdot x + 0{,}01913246 \cdot x^2 - 0{,}18655878 \cdot x^3 + 0{,}086967231 \cdot x^4}{(1 - 0{,}39498611 \cdot x + 0{,}058358386 \cdot x^2 - 0{,}0055641051 \cdot x^3 + 0{,}009554144 \cdot x^4) \cdot 100}$$

2.6- Modelo de Escalonamiento y Transferencia de Carga a Través de Diferencial de Energía

Tanto el modelo de Escalonamiento como el de Transferencia de Carga, usan modelos incrementales por semestre. El escalonamiento en cada semestre es la suma de escalonamiento del semestre anterior y el incremento del semestre analizado. Como se muestra en el siguiente esquema, el cálculo se realiza semestre a semestre, obteniéndose para un semestre m, agrietamiento, escalonamiento y una pérdida de rigidez de los agregados acumulado, el cual produce una pérdida en la transferencia de carga para el período siguiente. Finalmente se obtiene para cada semestre, el IRI promedio, que es función del agrietamiento y escalonamiento del pavimento.

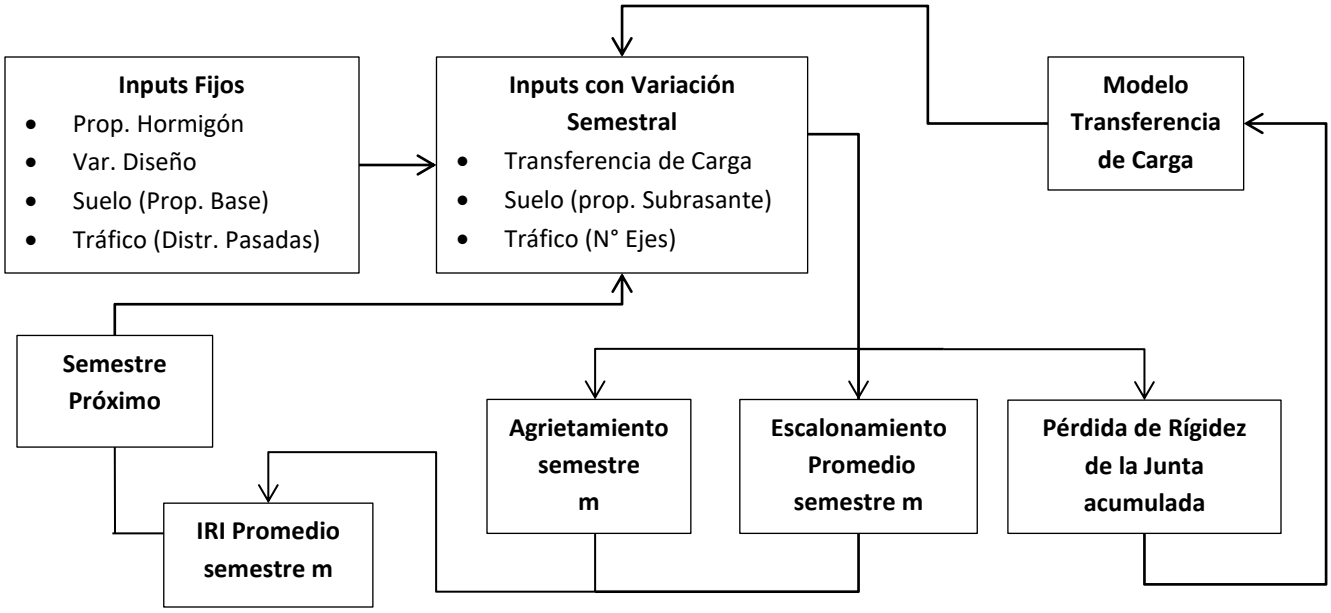


Figura 23: Diagrama de Flujo del Modelo de Escalonamiento y Transferencia de Carga

Las repeticiones de carga a las que están sometidos las juntas de los pavimentos, generan un desgaste del árido. Este desgaste genera una pérdida de transferencia de carga. Este desgaste depende en gran medida de la apertura que tenga la junta (jw)

$\Delta s_i = 0$ si jw < 0,001*h_{PCC}

$$\Delta s_i = \frac{a*10^{-6}}{b+c*\left(\frac{j_w}{h_{PCC}}-d\right)^f}\left(\frac{\tau_{iA}}{\tau_{ref}}\right)$$ si jw > 0,001*h_{PCC}

Dónde:

h_{pcc}: Espesor Losa de hormigón

Para losas cortas, los parámetros a,b,c,d y f son:

- a =0,005
- b =1
- c =1
- d =0
- f =-5,7

τ_{ref} = 111,1*exp(-exp(0,9988*exp(-0,1089*log(J_{AGG})))

- τ_{ref} = Esfuerzo de corte referencial, derivado deresultados de pruebas de la PCA
- J_{AGG} = Rigidez de los agregados de la junta, calculado en ese mes.

$\tau_i = J_{AGG}*(\delta_{L,i,A} - \delta_{U,i,A})$

- τ_{iA}: Esfuerzo de corte en la junta debido a eje tipo A y categoría de peso i.
- J_{AGG} = Rigidez de los agregados de la junta, calculado en ese mes.
- $\delta_{L,i,A}$ = Deflexión en la esquina cargada causado por eje tipo A y categoría de peso i.
- $\delta_{U,i,A}$ = Deflexión en la esquina descargada causado por eje tipo A y categoría de peso i.

Luego la pérdida de rigidez de la junta en un semestre, se obtiene sumando cada pasada durante ese semestre, como se muestra en la siguiente fórmula:

$$\Delta S_{tot} = \sum_{i=1}^{2} \sum_{i=1}^{N_A} \Delta S_{i,A} n_{i,A}$$

Dónde:

- ΔS_{tot} = Pérdida de rigidez de la junta acumulado durante el semestre
- $\Delta S_{i,A}$ = Pérdida de rigidez de la junta producido por eje tipo A, carga i
- $N_{i,A}$ = Número de repeticiones de carga en el semestre para eje tipo A, carga i

2.7- <u>Escalonamiento Promedio</u>

El modelo de escalonamiento del programa, realiza un cálculo incremental, basado en semestres y el nivel de escalonamiento del período anterior, afecta la magnitud del incremento. El escalonamiento en un semestre es la suma de los incrementos de cada semestre anterior en la vida del pavimento, desde la apertura al tráfico, usando el siguiente modelo, el cuál es una variación del modelo original, desarrollado en el MEPDG (Khazanovich et al. 2004):

$$Fault_i = Fault_{i-1} + \Delta Fault_i$$

$$\Delta Fault_i = C_{34} \cdot (FAULTMAX_{i-1} - Fault_{i-1})^2 \cdot DE_i \; FAULTMAX_0 = C_{12} \cdot \delta_{MAX} \cdot C_A \cdot C_B$$

$$FAULTMAX_i = FAULTMAX_{i-1} + \frac{C_7}{10^6} \cdot DE_i \cdot C_A \cdot C_B$$

$$C_A = [Log(1 + C_5 \cdot 5^{EROD})]^{C_6}$$

$$C_B = \left[Log\left(\frac{P_{200} \cdot 100 \cdot \left(\frac{Wetdays}{Dren^{C_9}}\right)^{C8}}{P_S} \right) \right]^{C_6}$$

$$C_{12} = C_1 + C_2 \cdot \sqrt[4]{FR}$$

$$C_{34} = C_3 + C_4 \cdot \sqrt[4]{FR}$$

Con,

Fault$_m$ = Escalonamiento promedio en el semestre m, pulg.

ΔFault$_i$ = Incremento semestral en escalonamiento promedio durante el semestre *i*, pulg.

FAULTMAX$_i$ = Máximo escalonamiento Promedio para semestre i, pulg.

FAULTMAX$_0$ = Máximo escalonamiento Promedio inicial, pulg.

EROD = Factor de erosión de la base/subbase.

DE$_i$ = Diferencial de energía acumulado durante el semestre i

Dren = Diseño incluye colocacionde Dren Lateral (1 No, 2 Sí)

$\delta_{curling}$ = Máxima deflexión mensual, debido a alabeo de temperature y humedad de la losa.

P_S = Sobrecarga de la subrasante, libras.

P_{200} = Porcentaje de material de la base que pasa la #200.

WetDays = Número de días promedio al año con precipitaciones.

C_1 a C_8 y C_{12}, C_{34} son constantes de calibración:

FR = Índice de congelamiento de la base (Porcentaje del tiempo en el año en que la base se encuentra bajo los 0°C.

2.7-1. <u>Confiabilidad del Escalonamiento</u>

El Escalonamiento a un cierto nivel de confianza (m) se obtiene de la siguiente fórmula:

$Fault_m = Fault + Z_p \cdot STD_{FAULT}$

$$STD_{Fault} = \sqrt{a \cdot Fault + b}$$

Dónde:

$Fault_m$ = Escalonamiento con M % de confiabilidad

Fault = Escalonamiento obtenido según modelo

a: 0,03261

b: 0,00009779

Zp = coeficiente estadístico, asociado al Nivel de Confianza. (1-R) en una curva de distribución normal

2.8- Modelo de IRI

El modelo de IRI fue calibrado y validado usando LTPP (FHWA 2009) y otros datos en terreno para asegurar que entrega resultados validos bajo cierta variedad de condiciones climáticas y de terreno. El modelo es:

$$IRI = IRI_I + C1\ CRK + C2\ SPALL + C3\ TFAULT + C4\ SF$$

Dónde:

IRI	=	IRI predicho, pulg/milla
IRI_I	=	Rugosidad inicial, medido en términos de IRI, pulg/milla
CRK	=	Porcentaje de losas agrietadas
SPALL	=	Porcentaje de losas con Desconches
TFAULT	=	Escalonamiento promedio acumulado por milla, pulg.
SF	=	Factor de Sitio
C1	=	0,013
C2	=	0,007
C3	=	0,0008
C4	=	0,003
S F	=	$AGE\ (1+0.5556\ FI)\ (1+P_{200})/1{,}000{,}000$

Con,

AGE	=	Edad Pavimento, años.
FI	=	Índice de Congelamiento, °F-días.
P_{200}	=	Porcentaje de material fino (material que pasa malla N° 200).

2.8-1. Confiabilidad del IRI

El IRI a un cierto nivel de confianza (m) se obtiene de la siguiente fórmula:

$$IRI_m = IRI + Z_p \cdot a$$

Dónde:

IRI_m = IRI con M % de confiabilidad

IRI= IRI obtenido según modelo

a = 0,5

Zr = coeficiente estadístico, asociado al Nivel de Confianza. (1-R) en una curva de distribución normal

3. Calibración de Modelos

Para poder calibrar el programa de diseño, fue necesario realizar un número importante de pruebas de pavimentos, con lo cual se puede relacionar el daño predicho por métodos mecánicos con el daño visual. Además se calibro la relación de la apertura de junta, con la transferencia de carga en la junta.

3.1- Calibración Apertura de Junta- Transferencia de carga:

Esta calibración se realizó con los resultados de la prueba de deterioro de pavimentos acelerados en Illinois y los tramos de prueba realizados en el laboratorio nacional de vialidad y el tramo de prueba en El Trebal. La transferencia de carga fue medida mediante deflectometro de impacto, dejando caer la masa en una losa y midiendo y comparando las deflexiones a través de un sensor en la losa cargada y un segundo sensor en la losa que recibe carga.

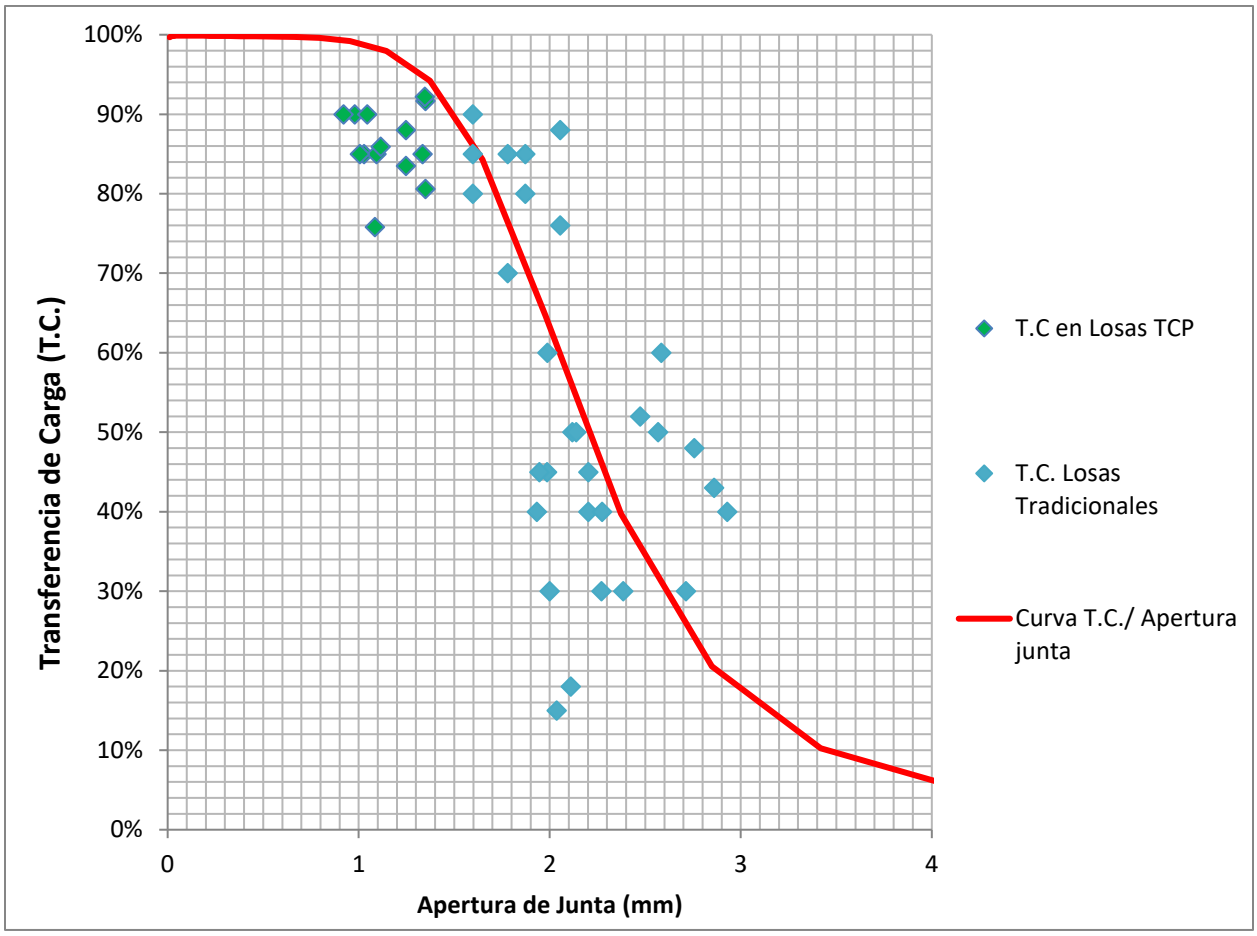
Tramo	Apertura de Junta (mm)	Transferencia de Carga (%)
Illinois	0,71	90%
Illinois	0,71	90%
Illinois	0,71	85%
Illinois	0,71	85%
Illinois	0,71	85%
Illinois	0,71	90%
Prueba LNV	0,91	81%
Prueba LNV	0,91	84%
Prueba LNV Gauss	0,91	92%
Prueba LNV Gauss	0,91	92%
Prueba LNV Gauss	0,91	85%
Prueba LNV Gauss	0,91	88%
Prueba LNV Gauss	0,91	86%
Prueba LNV Gauss	0,91	76%
Polpaico-El Trebal	0,71	90%

Además se incluyeron en la calibración los datos de estudios de relación apertura de junta-transferencia de carga en pavimentos de hormigón con losas tradicionales.

Tramo	Apertura de Junta (mm)	Transferencia de Carga (%)
Longotoma	1,62	30%
Lampa	1,37	30%
Lampa	1,37	40%
Lampa	1,37	45%
Lampa	1,37	50%
Lo Vásquez	1,37	30%

Lo Vasquez	1,37	40%
Lo Vásquez	1,37	18%
Lo Vásquez	1,37	30%
Talagante	1,37	50%
Talagante	1,37	60%
Talagante	1,37	40%
Paine	1,72	40%
Paine	1,72	43%
Paine	1,72	48%
Paine	1,72	60%
Graneros	1,38	45%
Graneros	1,38	45%
San Fernando	1,54	50%
San Fernando	1,54	52%
Melipilla	1,37	15%
Melipilla	1,36	80%
Melipilla	1,37	85%
Melipilla	1,36	90%
Melipilla	1,37	80%
Melipilla	1,36	85%
Leyda	1,37	88%
Leyda	1,37	70%
Leyda	1,37	76%
Leyda	1,37	85%

Con esta base de datos se graficó los puntos y se obtuvo la curva que mínimiza el error entre los puntos medidos y lo entregado por el modelo de transferencia de carga. Además se agregó un factor de minoración a la transferencia de carga, dado la gran dispersión que existe. El valor de ese factor se configura en los factores de calibración del programa.


100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
Transferencia de Carga (T.C.)
0
1
2
3
4
Apertura de Junta (mm)
T.C en Losas TCP
T.C. Losas Tradicionales
Curva T.C./ Apertura junta

3.2- Calibración Modelo de Agrietamiento:

El siguiente paso fue el de calibrar el modelo que relaciona el daño por fatiga obtenido por el programa, con el porcentaje de losas agrietadas. Para esto es que se recopiló la información de distintas pruebas realizadas:

3.2-1. Pruebas Realizadas Por el Instituto de Cemento y Hormigón de Chile (ICH)

El ICH realizó tres pruebas de pavimentos a escala real con pavimentos TCP en los años 2004, 2005 y 2006. A continuación se muestran dichas pruebas con las características respectivas:

Tramo De Prueba	Ubicación	Año de Construcción	Espesor Pavimento
Alameda Calzada Norte	R.M.	2004	13, 16 y 20 cm
Chinquihue	X Región	2005	8, 10 y 12 cm
Padre Las Casas	IX Región	2006	8, 10 y 12 cm

Cada una de las pruebas fue inspeccionada periódicamente por un período de hasta 6 años en el caso del pavimento más antiguo, haciendo un levantamiento de las fisuras en el pavimento en cada inspección. El resultado de las pruebas se resume en las siguientes tres tablas:

Tabla 20: Resultados Prueba Alameda Calzada Norte

Subtramo N°	Inspección N°	Espesor Pavimento (mm)	Ejes Equivalentes Acumulados	Porcentaje de Losas Agrietadas		
				Grieta Transversal	Grieta Longitudinal	Grieta de Esquina
1	1	152	10.552.195	42%	4%	0%
	2	152	15.891.912	24%	2%	0%
2	1	152	10.552.195	42%	4%	0%
	2	152	15.891.912	24%	2%	0%
3	1	152	10.552.195	42%	4%	0%
	2	152	15.891.912	24%	2%	0%
4	1	143	17.586.992	86%	14%	0%
	2	143	26.486.520	72%	8%	0%
5	1	143	17.586.992	86%	14%	0%
	2	143	26.486.520	72%	8%	0%
6	1	143	1.954.110	0%	1%	0%
	2	143	2.942.947	0%	0%	0%
7	1	147	10.552.195	57%	5%	0%
	2	147	15.891.912	37%	3%	0%
8	1	147	10.552.195	57%	5%	0%
	2	147	15.891.912	37%	3%	0%
9	1	147	10.552.195	57%	5%	0%

	2	147	15.891.912	37%	3%	0%
10	1	143	17.586.992	86%	14%	0%
	2	143	26.486.520	72%	8%	0%
11	1	143	17.586.992	86%	14%	0%
	2	143	26.486.520	72%	8%	0%
12	1	143	17.586.992	94%	12%	0%
	2	143	26.486.520	87%	7%	0%
13	1	196	10.552.195	0%	0%	0%
	2	196	15.891.912	0%	0%	0%
14	1	196	1.172.466	0%	0%	0%
	2	196	1.765.768	0%	0%	0%
15	1	196	10.552.195	0%	0%	0%
	2	196	15.891.912	0%	0%	0%
16	1	131	17.586.992	96%	30%	1%
	2	131	26.486.520	91%	19%	0%
17	1	131	1.954.110	24%	2%	0%
	2	131	2.942.947	12%	1%	0%
18	1	131	17.586.992	26%	29%	0%
	2	131	26.486.520	14%	19%	0%
19	1	165	17.586.992	28%	2%	0%
	2	165	26.486.520	15%	1%	0%
20	1	165	1.954.110	0%	0%	0%
	2	165	2.942.947	0%	0%	0%
	3	165	17.586.992	0%	3%	0%
	4	165	26.486.520	0%	2%	0%
21	1	165	1.954.110	28%	2%	0%
	2	165	2.942.947	15%	1%	0%
22	1	165	17.586.992	0%	0%	0%
	2	165	26.486.520	0%	0%	0%
23	1	165	17.586.992	49%	2%	0%
	2	165	26.486.520	30%	1%	0%

Tabla 21: Resultados Prueba Chinquihue

Subtramo N°	Inspección N°	Espesor Pavimento (mm)	Ejes Equivalentes Acumulados	Porcentaje de Losas Agrietadas		
				Grieta Transversal	Grieta Longitudinal	Grieta de Esquina
1	1	120	5.401	0%	0%	0%
	2	120	27.487	0%	0%	0%
	3	120	53.850	0%	0%	0%
	4	120	96.194	1%	1%	0%

	5	120	105.028	1%	1%	0%
	6	120	133.559	2%	1%	0%
	7	120	213.408	5%	2%	0%
2	1	120	3.574	0%	0%	0%
	2	120	25.660	0%	0%	0%
	3	120	52.022	0%	0%	0%
	4	120	94.366	1%	1%	0%
	5	120	103.201	1%	1%	0%
	6	120	131.731	2%	1%	0%
	7	120	211.580	5%	2%	0%
3	1	100	1.547	0%	0%	0%
	2	100	5.401	0%	0%	0%
	3	100	27.487	1%	1%	0%
	4	100	53.850	3%	2%	0%
	5	100	96.194	9%	5%	1%
	6	100	133.559	17%	7%	2%
	7	100	213.408	34%	13%	5%
4	1	100	3.574	0%	0%	0%
	2	100	25.660	1%	1%	0%
	3	100	52.022	3%	2%	0%
	4	100	94.366	9%	5%	1%
	5	100	131.731	16%	7%	2%
5	1	80	1.547	0%	0%	0%
	2	80	5.401	1%	1%	2%
	3	80	27.487	9%	7%	23%
	4	80	53.850	26%	15%	53%
	5	80	96.194	53%	29%	78%
	6	80	133.559	68%	38%	87%

Tabla 22: Resultados Prueba Padre Las Casas

Subtramo N°	Inspección N°	Espesor Pavimento (mm)	Ejes Equivalentes Acumulados	Porcentaje de Losas Agrietadas		
				Grieta Transversal	Grieta Longitudinal	Grieta de Esquina
1	1	120	5.160	0%	0%	0%
	2	120	33.170	1%	0%	0%
	3	120	78.806	4%	4%	0%
	4	120	148.222	13%	9%	0%
	5	120	221.484	24%	15%	0%
	6	120	307.597	38%	21%	0%
2	1	100	5.160	1%	0%	0%

	2	100	33.170	10%	1%	0%
	3	100	78.806	37%	20%	4%
	4	100	148.222	67%	36%	14%
	5	100	221.484	82%	50%	26%
	6	100	307.597	90%	61%	40%
3	1	100	5.160	0%	0%	0%
	2	100	33.170	4%	1%	0%
	3	100	78.806	21%	18%	3%
	4	100	148.222	48%	34%	10%
	5	100	221.484	67%	47%	20%
	6	100	307.597	79%	58%	32%
4	1	120	19.934	0%	0%	0%
	2	120	70.954	3%	4%	0%
	3	120	140.370	11%	9%	0%
	4	120	213.632	23%	14%	0%
	5	120	299.745	37%	21%	0%
5	1	80	5.160	3%	1%	2%
	2	80	33.170	28%	4%	20%
	3	80	78.806	69%	42%	81%
	4	80	148.222	88%	63%	94%
	5	80	221.484	94%	74%	97%
	6	80	307.597	97%	82%	98%
6	1	80	19.934	6%	2%	7%
	2	80	70.954	44%	38%	76%
	3	80	140.370	75%	61%	92%
	4	80	213.632	87%	73%	97%

3.2-2. Pruebas Realizadas por Privados

Entre los años 2011 y 2013 se realizaron diferentes pruebas de pavimentos delgados.

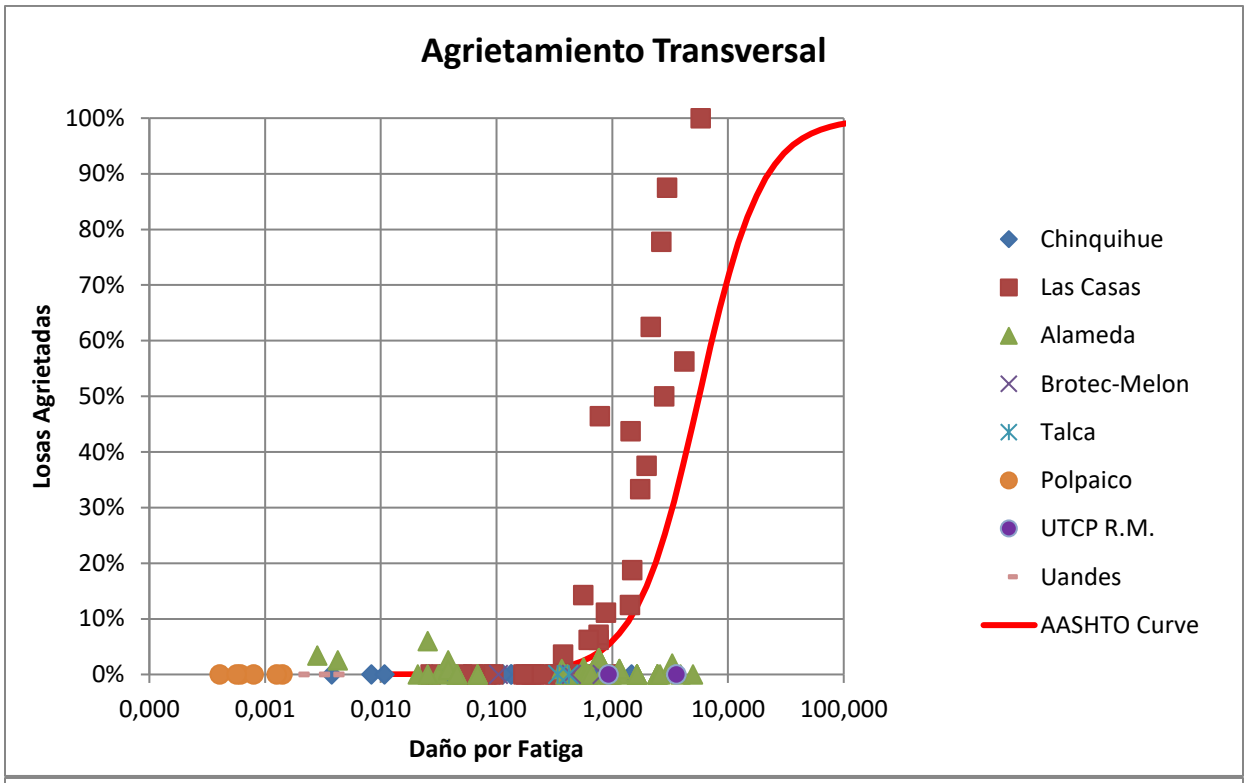
Tramo De Prueba	**Ubicación**	**Año de Construcción**	**Espesor Pavimento**
Altos de Lampa	R.M.	2012	8 y 10 cm c/ Fibra
Planta Ready mix	Quilicura R.M.	2012	6 y 8 cm c/ Fibra
Clínica Universidad de Los Andes	R.M.	2011	8 cm c/ Fibra
Reemplazo Losas Ruta 5	Talca VII Región	2008	16 cm
El Trebal	R.M.	2013	6 y 8 cm c/ Fibra

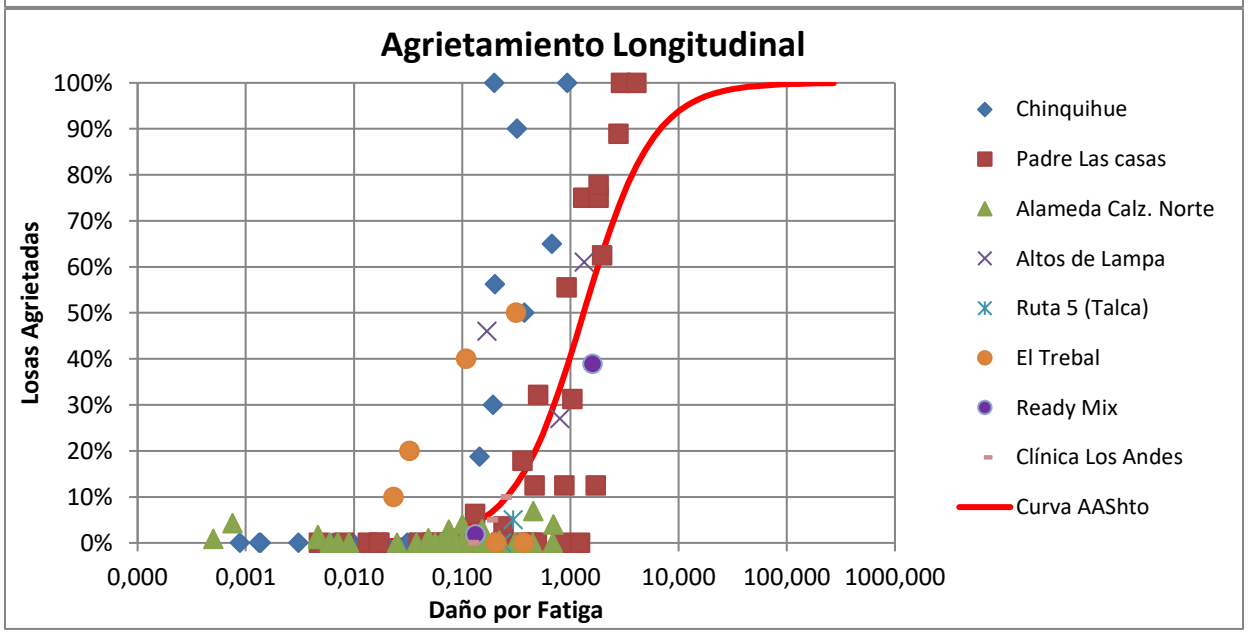
Estas pruebas entregaron los siguientes resultados:

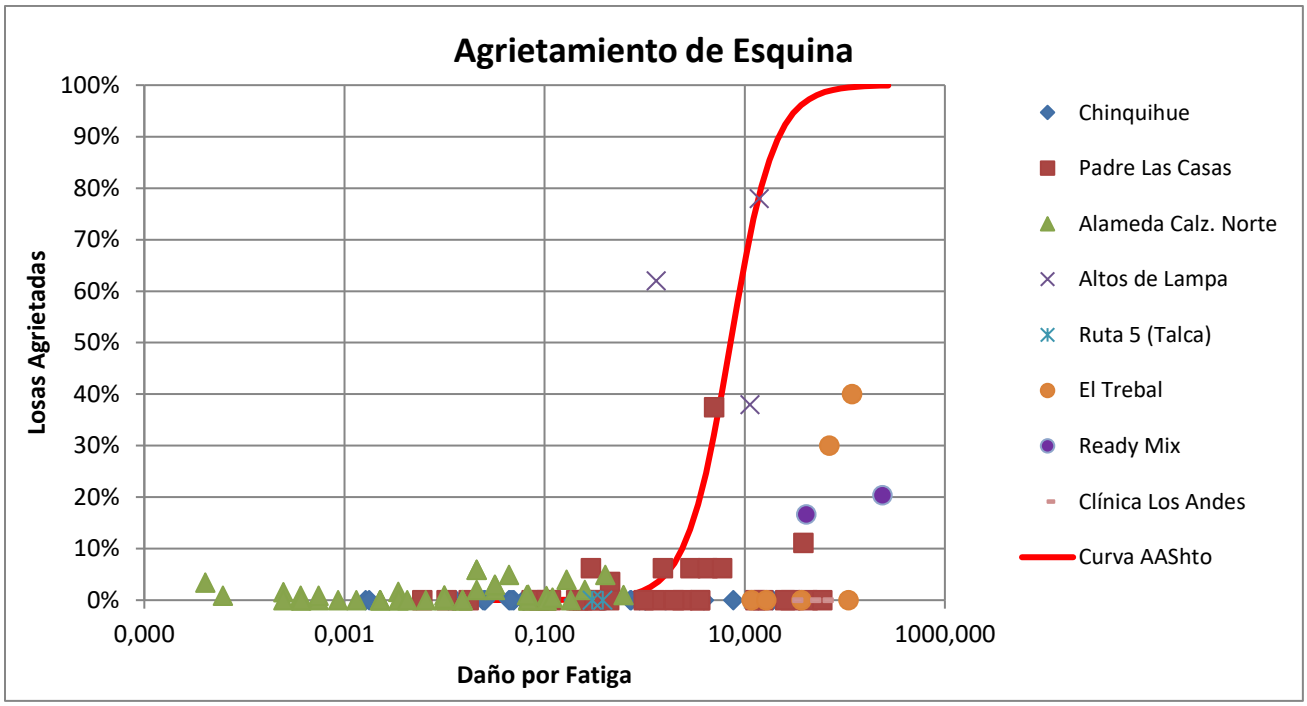
Tramo de Prueba	Subtramo	Inspección N°	Espesor Pavimento (mm)	Ejes Equivalentes Acumulados	Porcentaje de Losas Agrietadas		
					Grieta Transversal	Grieta Transversal	Grieta Transversal
Lampa	1	1	80 c/Fibra	27.348	40%	50%	79%
Lampa	2	1	100 c/Fibra	27.348	1%	6%	3%
Lampa	3	1	80 c/Fibra	27.348	17%	34%	71%
Ruta 5	1	1	160	12.000.000	10%	9%	0%
Ruta 5	1	2	160	15.000.000	15%	12%	0%
El Trebal	1	1	6 c/ Fibra	2.087	0%	3%	96%
El Trebal		2	6 c/ Fibra	4.884	0%	13%	100%
El Trebal		3	6 c/ Fibra	7.119	0%	8%	99%
El Trebal		4	6 c/ Fibra	8.488	0%	15%	100%
El Trebal	2	1	8 c/ Fibra	8.488	0%	0%	72%
El Trebal		2	8 c/ Fibra	11.921	0%	1%	84%
Ready-Mix	1	1	6 c/ Fibra	30.000	93%	56%	100%
Ready-Mix	2	1	8 c/ Fibra	30.000	46%	4%	97%
Uandes	1	1	8 c/ Fibra	36.500	0%	4%	95%
Uandes		2	8 c/ Fibra	54.750	0%	6%	97%
Uandes		3	8 c/ Fibra	73.000	0%	9%	99%

Cada uno de los tramos de prueba fue modelado en Optipave, para obtener el daño por fatiga del pavimento en el tiempo. Dicho daño fue gráficado según el porcentaje de losas agrietadas en los tres modos (transversal, longitudinal y esquina). Luego se incluyó en cada uno de los gráficos, la curva AASHTO que relaciona daño por fatiga con porcentaje de losas agrietadas. Con esto se pudo realizar la calibración del software, ajustando los coeficientes de la ecuación daño por fatiga, porcentaje de losas agrietadas, de modo de tener el menor error acumulado de cada una de las pruebas. Los coeficientes de calibración obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tipo de Agrietamiento	Coeficiente a	Coeficiente b
Transversal	-1,6	15,75
Longitudinal	-1,35	1,46
Esquina	-1,98	50


Agrietamiento Transversal
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
Losas Agrietadas
0,000
0,001
0,010
0,100
1,000
10,000
100,000
Daño por Fatiga
Chinquihue
Las Casas
Alameda
Brotec-Melon
Talca
Polpaico
UTCP R.M.
Uandes
AASHTO Curve


Agrietamiento Longitudinal
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
Losas Agrietadas
0,000
0,001
0,010
0,100
1,000
10,000
100,000
1000,000
Daño por Fatiga
Chinquihue
Padre Las casas
Alameda Calz. Norte
Altos de Lampa
Ruta 5 (Talca)
El Trebal
Ready Mix
Clínica Los Andes
Curva AAShto


Agrietamiento de Esquina
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
Losas Agrietadas
0,000
0,001
0,100
10,000
1000,000
Daño por Fatiga
Chinquihue
Padre Las Casas
Alameda Calz. Norte
Altos de Lampa
Ruta 5 (Talca)
El Trebal
Ready Mix
Clínica Los Andes
Curva AAShto

3.3- Calibración Modelo de Escalonamiento

Se creó una base de datos con proyectos que han mostrado algún signo de escalonamiento y proyectos con bastante tráfico acumulado o una vida considerable de servicio para poder calibrar el modelo. Los proyectos que muestran escalonamiento son proyectos con problemas de ejecución como alto contenido de material fino en la base u hormigón con bastante contenido de cemento. Los proyectos utilizados como base de la calibración son:

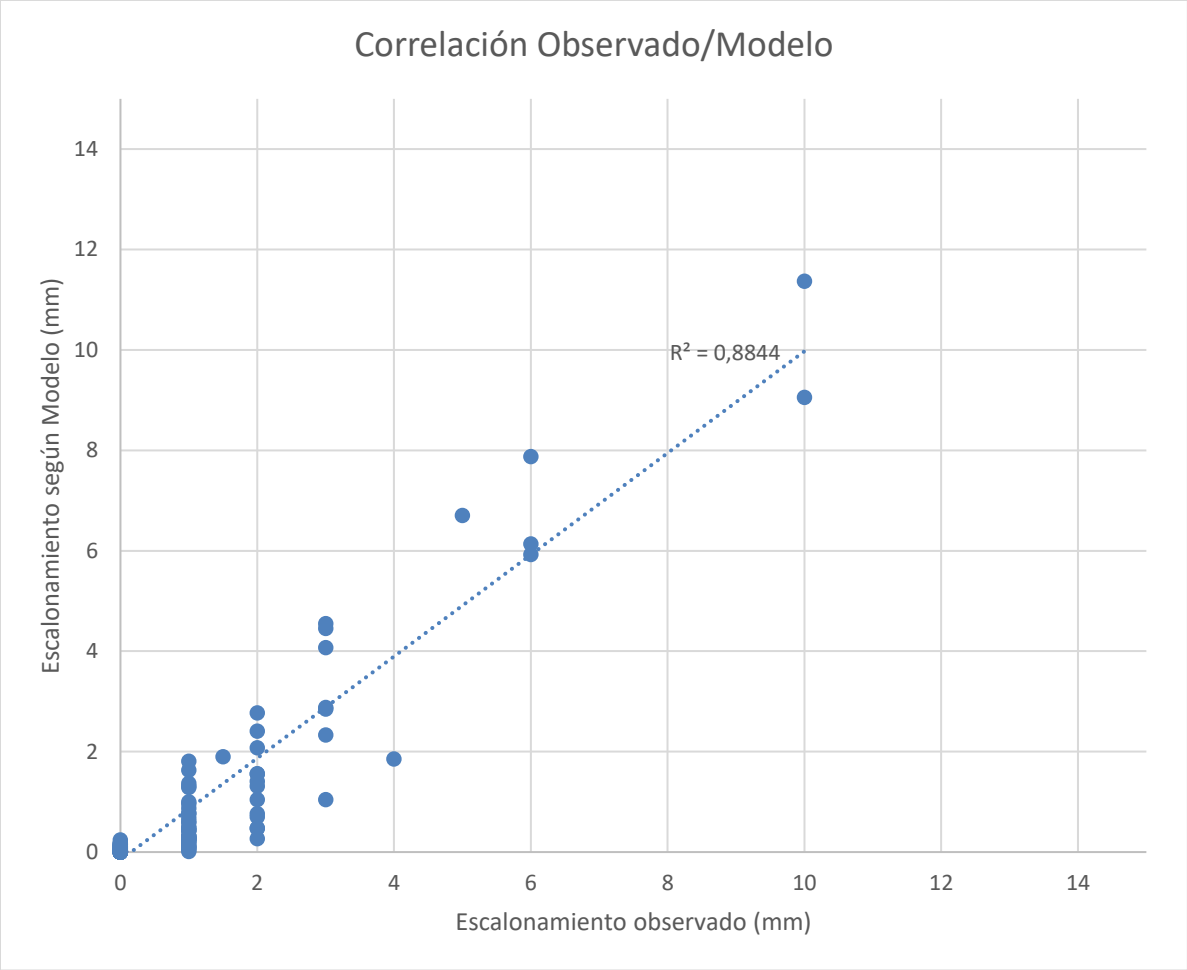
Nombre Proyecto	Largo de Losa cm	Espesor Pavimento mm	Tráfico de Diseño EE	Tipo de Base	Clima
Ruta 60-CH Tramo Portillo	1,75	150	22.000.000	Granular >15% Finos	Heladizo
Ruta 60-CH Tramo Portillo Pista Externa	1,75	150	22.000.000	Granular >15% Finos	Heladizo
Ruta 60-CH Sector Aduana	1,75	170	22.000.000	Granular >15% Finos	Heladizo
Ruta 60-CH Sector Guardia Vieja	2	220	22.000.000	Granular >10% Finos	Heladizo
Cauquenes Chanco	2,2	170	20.000.000	Granular < 8% Finos	Seco
Ruta 5 Talca	1,75	160	80.000.000	Binder Asfaltico	Seco
Ruta 5 Osorno	2	160	30.000.000	Granular >15% Finos	Humedo
Cerro Sombrero	1,75	140	12.000.000	Granular < 5% Finos	Heladizo
La Polvora	1,75	230	140.000.000	Asfalto Fresado	Seco
Sodimac	1,75	140	5.000.000	Granular < 8% Finos	Seco
Quellon Yungay	1,75	180	20.000.000	Granular < 8% Finos	Humedo
Walmart Acceso Principal	1,75	170	10.000.000	Granular < 8% Finos	Seco
Guatemala Camino Antigua	1,75	170	40.000.000	Granular < 8% Finos	Humedo
Guatemala Cuesta Villalobos	1,75	210	110.000.000	Asfalto	Humedo
G-84	1,75	100	500.000	Sin Base	Seco
Mahuidanche	1,75	90	500.000	Sin Base	Humedo

Cerro Castillo	2,2	120	2.000.000	Granular < 5% Finos	Heladizo
Ruta 7 El Toqui	1,75	110	3.000.000	Granular < 5% Finos	Heladizo

A continuación, las observaciones de escalonamiento hechas a diferentes años en cada uno de los proyectos:

	Edad Pavimento				
Proyecto	**1 Año**	**2 Años**	**5 Años**	**7 Años**	**10 Años**
Ruta 60-CH Tramo Portillo	1 mm	2 mm	6 mm	10 mm	
Ruta 60-CH Tramo Portillo Pista Externa	1 mm	1 mm	3 mm	5 mm	
Ruta 60-CH Sector Aduana	1 mm	1 mm	3 mm	6 mm	
Ruta 60-CH Sector Guardia Vieja	1 mm	1 mm	1 mm	1,5 mm	
Cauquenes Chanco	0 mm	1 mm	1 mm		
Ruta 5 Talca	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	
Ruta 5 Osorno	1 mm	3 mm	6 mm		
Cerro Sombrero	0 mm	0 mm	1 mm		
La Polvora	0 mm	0 mm			
Sodimac	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
Quellon Yungay	0 mm	0 mm			
Walmart Acceso Principal	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	1 mm
Guatemala Camino Antigua	0 mm	0 mm	0 mm	1 mm	2 mm
Guatemala Cuesta Villalobos	0 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm
G-84	0 mm	0 mm	0 mm		
Mahuidanche	0 mm	0 mm	0 mm		
Cerro Castillo	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	
Ruta 7 El Toqui	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	

El siguiente gráfico muestra la correlación que tiene el modelo de escalonamiento, al compararlo con el escalonamiento observado de los distintos tramos.



La tabla siguiente, muestra los valores obtenidos del proceso de calibración.

Tabla 23: Factores de Calibración modelo de Escalonamiento

Factor	Valor	Factor	Valor
C_1	0,037	C_2	0,03145
C_3	0,0008	C_4	0,00037
C_5	350	C_6	0,83
C_7	0,03	C_8	1
C9	1,5		

3.4- Típ o de Tráfico

La Federal Highway Administration clasifica los vehículos en 13 típos distintos, ver Figura 1.

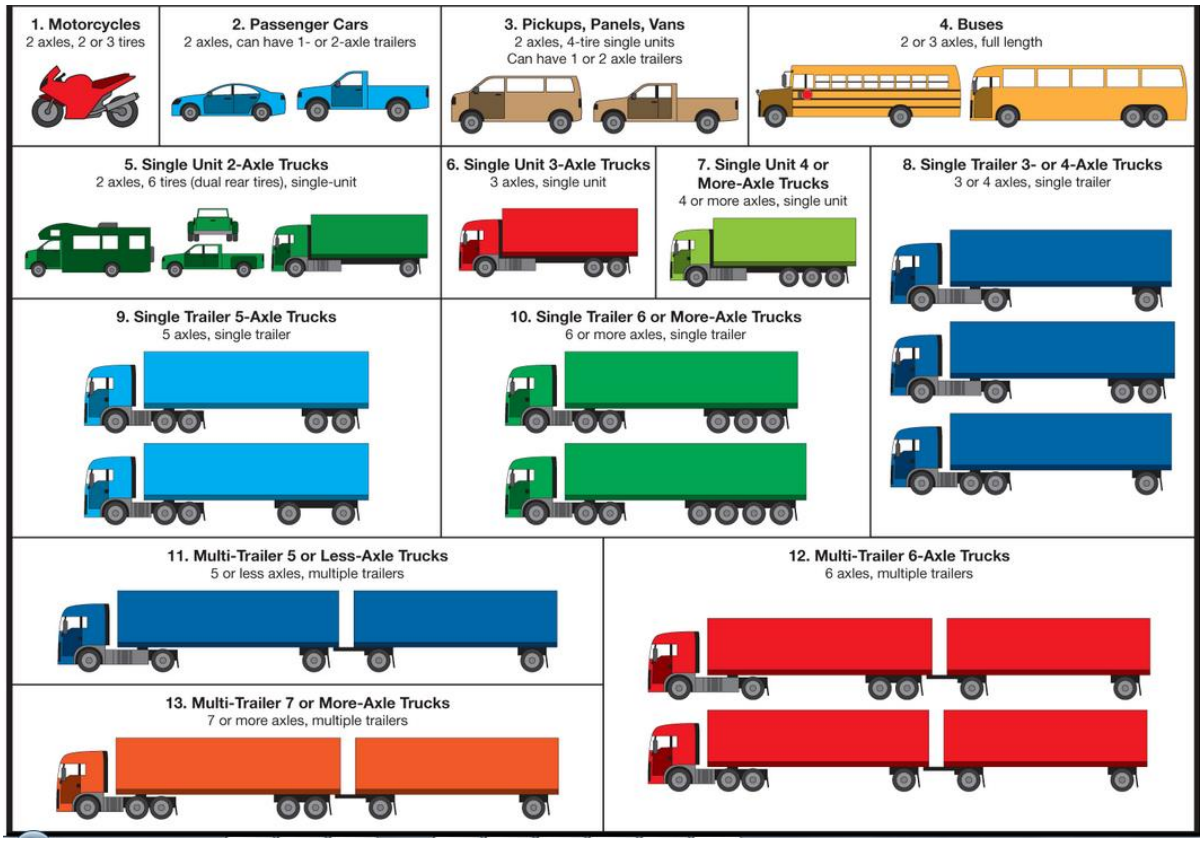


Figura 1: Clasificación de Vehículos de la FHWA.

Los vcehículos 1 a 3 son considerados como tráfico ligero y por lo tanto no son considerados. Los restantes (clase 4 a 12) son distribuidos según el tipo de vía usando la Tabla 24:

Tabla 24: Clasificación del Tipo de Tráfico

		Distribución por tipo de vehículo (Porcentaje)									
Grupo TTC	**Descripción TTC**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
1	Ruta con mayoría de camiones de remolque simple (Tipo I)	1,3	8,5	2,8	0,3	7,6	74,0	1,2	3,4	0,6	0,3
2	Ruta con mayoría de camiones de remolque simple (Tipo II)	2.4	14.1	4.5	0.7	7.9	66.3	1.4	2.2	0.3	0.2
3	Ruta con mayoría de camiones de remolque simple y remolque múltiple (Tipo I)	0.9	11.6	3.6	0.2	6.7	62.0	4.8	2.6	1.4	6.2
4	Ruta con mayoría de camiones de remolque simple (Tipo III)	2.4	22.7	5.7	1.4	8.1	55.5	1.7	2.2	0.2	0.4
5	Ruta con mayoría de camiones de remolque simple y remolque múltiple (Tipo II)	0.9	14.2	3.5	0.6	6.9	54.0	5.0	2.7	1.2	11.0
6	Ruta intermedia camiones livianos y camiones de remolque simple (Tipo I)	2.8	31.0	7.3	0.8	9.3	44.8	2.3	1.0	0.4	0.3
7	Ruta Principalmente camiones mixtos (Tipo I)	1.0	23.8	4.2	0.5	10.2	42.2	5.8	2.6	1.3	8.4
8	Ruta principalmente camiones con remolques múltiples (Tipo I)	1.7	19.3	4.6	0.9	6.7	44.8	6.0	2.6	1.6	11.8
9	Ruta intermedia camiones livianos y camiones de remolque simple (Tipo II)	3.3	34.0	11.7	1.6	9.9	36.2	1.0	1.8	0.2	0.3
10	Ruta Principalmente camiones mixtos (Tipo II)	0.8	30.8	6.9	0.1	7.8	37.5	3.7	1.2	4.5	6.7
11	Ruta Principalmente camiones con remolques múltiples (Tipo II)	1.8	24.6	7.6	0.5	5.0	31.3	9.8	0.8	3.3	15.3
12	Ruta intermedia camiones livianos y camiones de remolque simple (Tipo III)	3.9	40.8	11.7	1.5	12.2	25.0	2.7	0.6	0.3	1.3
13	Ruta Principalmente camiones mixtos (Tipo III)	0.8	33.6	6.2	0.1	7.9	26.0	10.5	1.4	3.2	10.3
14	Ruta Principalmente de camiones livianos (Tipo I)	2.9	56.9	10.4	3.7	9.2	15.3	0.6	0.3	0.4	0.3
15	Ruta Principalmente de camiones livianos (Tipo II)	1.8	56.5	8.5	1.8	6.2	14.1	5.4	0.0	0.0	5.7
16	Ruta principlamente camiones livianos y múltiples remolques.	1.3	48.4	10.8	1.9	6.7	13.4	4.3	0.5	0.1	12.6
17	Ruta Predominada por Buses	36.2	14.6	13.4	0.5	14.6	17.8	0.5	0.8	0.1	1.5

Tabla 25: Distribución del Peso de Eje Simple para distinto tipo de tráfico

	Típo de Vehículo									
Carga (Ton)	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
2,041	9,66	50,31	11,65	7,81	31,78	9,48	10,62	16,92	19,7	20,59
3,878	40,57	30,42	40,62	21,66	36,14	44,68	44,69	31,06	34,34	33,17

5,606	31,26	12,47	33,45	31,4	19,02	37,93	36,95	28,63	28,12	32,92
7,444	11,86	4,31	8,75	24,91	8,28	5,43	5,68	15,7	12,74	8,52
9,281	4,54	1,54	3,02	9,35	3,29	1,89	1,33	5,72	3,74	2,85
11,013	1,42	0,59	1,01	3,25	0,97	0,44	0,46	1,39	0,9	1,13
12,848	0,45	0,2	0,34	0,68	0,28	0,1	0,1	0,43	0,31	0,58
14,683	0,15	0,08	0,11	0,84	0,19	0,04	0,07	0,09	0,06	0,21
16,520	0,05	0,06	0,04	0,06	0,04	0,01	0,04	0,04	0,04	0,04
18,151	0,02	0	0,02	0,02	0,01	0	0,05	0,03	0	0,01

Tabla 26: Distribución del Peso de Eje Doble para distinto tipo de tráfico

	Típo de Vehículo									
Carga (Ton))	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
4,082	11,99	62,03	33,5	30,4	50,07	20,82	13,69	24,53	16,22	21,5
7,757	28,12	18,86	28,03	21,44	30,85	26,15	28,01	29,9	37,7	20,7
11,213	45,56	8,08	19,36	17,61	11,41	21,02	24,91	21,23	29,09	21,19
14,887	11,37	7,6	10,98	12,09	4,77	22,6	20,78	18,57	11,49	20,37
18,561	2,11	2,6	4,54	8,26	1,76	7,61	7,98	4,47	3,48	11,47
22,027	0,56	0,6	2,22	6,26	0,86	1,41	3,24	0,81	1,1	3,11
25,696	0,15	0,16	0,94	2,64	0,16	0,27	0,94	0,4	0,58	1,12
29,366	0,14	0,03	0,34	0,93	0,02	0,08	0,28	0,09	0,19	0,32
33,040	0,01	0,03	0,11	0,31	0	0,03	0,17	0	0,15	0,11
36,302	0	0	0	0,04	0	0	0,01	0	0,01	0,1

Tabla 27: Distribución del Peso de Eje Triple para distinto tipo de tráfico

	Típo de Vehículo									
Carga (Ton)	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
6,124	66,67	49,79	46,31	11,39	26,56	80,11	33,02	60,08	26,4	20,01
11,635	0	4,01	18,63	10,51	12,29	11,16	16,68	20,41	14,9	11,52
16,819	0	20,12	12,56	16,6	14,04	4,19	17,49	7,08	19,87	15,32
22,331	33,33	7,11	5,71	21,16	13,52	1,98	18,75	6,03	20,82	17,21
27,842	0	9,59	5,27	18,67	15,92	1,09	9,15	3,86	11,51	16,99
33,040	0	0	2,19	14,19	9,61	0,67	2,92	0,97	2,83	9,4
38,545	0	6,25	6,37	5,51	4,15	0,47	1,21	1,57	1,88	5,03
44,049	0	0	1,49	1,37	3,53	0,21	0,52	0	0,51	2,85
49,560	0	3,13	0,45	0,45	0,21	0,08	0,18	0	0,57	1,07
54,452	0	0	1,02	0,15	0,17	0,04	0,08	0	0,71	0,6

Tabla 28: Valores por defecto del promedio de ejes simple, doble y triple por tipo de vehículo

Típo de Tráfico	Ejes Simples	Ejes Dobles	Ejes Tríples
4	1,62	0,39	0,00
5	2,00	0,00	0,00
6	1,02	0,99	0,00
7	1,00	0,26	0,83
8	2,38	0,67	0,00
9	1,13	1,93	0,00
10	1,19	1,09	0,89
11	4,29	0,26	0,06
12	3,52	1,14	0,06
13	2,15	2,13	0,35

Load spectra distribution for single axles

Tabla 29: Espectro de Tráfico (Ejes Simples)

	Ejes Simples cada 1000 vehículos																
Carga (Ton)	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**
2,041	260	303	302	382	342	458	441	391	493	493	440	566	526	685	677	634	363
3,878	573	566	584	574	596	578	612	603	582	616	607	592	621	587	589	598	624
5,606	445	422	453	406	461	382	437	455	377	424	449	360	424	323	337	373	433
7,444	100	96	105	100	112	97	116	117	106	116	117	106	118	105	99	110	144
9,281	36	35	37	36	39	35	41	41	39	40	40	38	40	38	35	39	54
11,013	9	10	10	10	12	11	12	12	12	12	13	12	13	13	12	14	17
12,848	3	3	3	3	4	3	4	4	4	4	5	4	4	4	4	5	5
14,683	1	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
16,520	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
18,151	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 30: Espectro de Tráfico (Ejes Dobles)

	Ejes Dobles cada 1000 vehículos																
Carga (Ton)	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**
4,082	339	314	324	277	314	244	270	287	225	245	260	194	222	134	142	179	191
7,757	409	375	388	326	369	280	309	334	247	287	304	205	258	135	152	183	206
11,213	322	295	312	255	302	218	248	275	189	229	256	155	211	100	123	153	183
14,887	335	303	318	259	304	215	245	272	180	218	241	140	196	87	111	138	121
18,561	113	103	114	88	114	74	92	104	62	81	98	50	78	31	44	60	41
22,027	22	20	24	18	25	16	21	24	14	19	25	12	20	8	12	17	11
25,696	4	4	6	4	7	4	5	6	3	5	7	3	6	2	4	5	3
29,366	1	1	2	1	2	1	2	2	1	1	2	1	2	1	1	2	1
33,040	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0

36,302	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 31: Espectro de Tráfico (Ejes Triples)

	Ejes Triples cada 1000 vehículos																
Carga (Ton)	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**
6,124	5	6	20	7	24	8	25	28	5	17	41	11	39	6	22	23	3
11,635	3	3	10	4	13	4	13	15	3	9	22	6	20	4	12	13	2
16,819	3	3	11	5	15	5	14	17	4	10	25	7	22	6	14	16	2
22,331	3	4	12	6	16	6	16	19	5	11	27	8	24	8	16	18	3
27,842	2	2	8	4	12	3	11	13	4	7	18	5	15	6	11	14	2
33,040	1	1	4	2	6	2	5	7	2	3	8	3	6	5	5	8	1
38,545	0	1	2	1	3	1	2	3	1	2	4	1	3	2	2	4	1
44,049	0	0	1	0	1	0	1	2	0	1	2	0	2	0	1	2	0
49,560	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
54,452	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4. Bibliografía

AASHTO (1993). "Guide for Design of Pavement Structures." American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.

ARA, Inc. (2007). Interim Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Manual of Practice. Final Draft. National Cooperative Highway Research Program Project 1-37A.

BORDELON, A., ROESLER, J.R., AND HILLER, J.E., Mechanistic-Empirical Design Concepts for Jointed Plain Concrete Pavements in Illinois, Final Report, FHWA-ICT-09-052, Illinois Center for Transportation, University of Illinois, Urbana, IL, July 2009, 255 pp.Cervantes, V., and Roesler, J. (2009). "Performance of Concrete Pavements with Optimized Slab Geometry."Urbana Illinois.

CONTROLES Y MEDICIONES SA, Reporte Evaluación de la calidad de la superficie del pavimento, Guatemala 2006

COVARRUBIAS T. Juan Pablo, Andahur, Daniel. Análisis del Comportamiento de Pavimentos Delgados en Condiciones de Carga Pesada Modelación con Software de Elementos Finitos ISLAB 2000, Enero, 2006

COVARRUBIAS V, JUAN PABLO, COVARRUBIAS, T and ROESLER, J.R. Design of concrete slabs with optimized geometry, Seville 2010

Covarrubias, J. P. T., and Covarrubias, J. P. ""TC" Design for Thin Concrete Pavements." Proc., 9th International Conference on Concrete Pavements: The Golden Gate to Tomorrow's Concrete Pavements, 905-917.

ERES CONSULTANTS, ISLAB 2000. Finite Element Program for the Analysis of Rigid Pavements, Version 1.1, USA, 1999.FHWA (2009). "Long Term Pavement Performance Database." Federal Highway Administration.

Ioannides, A. M., and Khazanovich, L. (1998). "General Formulation for Multilayered Pavement Systems." Journal of Transportation Engineering, 124(1), 82-90.

Ioannides, A. M., Khazanovich, L., and Becque, J. L. (1992). "Structural Evaluation of Base Layers in Concrete Pavement Systems." Transportation Research Record(1370), 20-28.

Khazanovich, L. (1994). "Structural Analysis of Multi-Layered Concrete Pavement Systems." Ph.D., University of Illinois Urbana-Champaign, Urbana.

Khazanovich, L., Darter, M. I., and Yu, H. T. (2004). "Mechanistic-Empirical Model to Predict Transverse Joint Faulting." Transportation Research Record(1896), 34-45.

Khazanovich, L., Selezneva, O., Yu, H. T., and Darter, M. I. (2001). "Development of Rapid Solutions for Prediction of Critical Continuously Reinforced Concrete Pavement Stresses." Transportation Research Record(1778), 64-72.

Khazanovich, L., Yu, H. T., Rao, S., Galasova, K., Shats, E., and Jones, R. 2000. ISLAB2000 - Finite Element Analysis Program for Rigid and Composite PavementsERES Consultants, Champaign, Illinois.

Korenev, B. G., and Chernigovskaya, E. I. (1962). "Analysis of Plates on Elastic Foundation." Gosstroiizdat.

LARRAIN, C. Análisis Teórico-Experimental del Comportamiento de Losas de Hormigón de Pavimentos, MSc Thesis, School of Engineering, Catholic University of Chile, 1985, 280 pp. Miner, M. (1945). "Cumulative Damage in Fatigue." Transactions of the ASME, 67, A159-A164.

NCHRP. 2006. Mechanistic Empirical Pavement Design Guide, version 1.1Transportation Research Board, Washington DC.

Westergaard, H. M. (1927). "Theory of Concrete Pavement Design." Proceedings of the Highway Research Board.

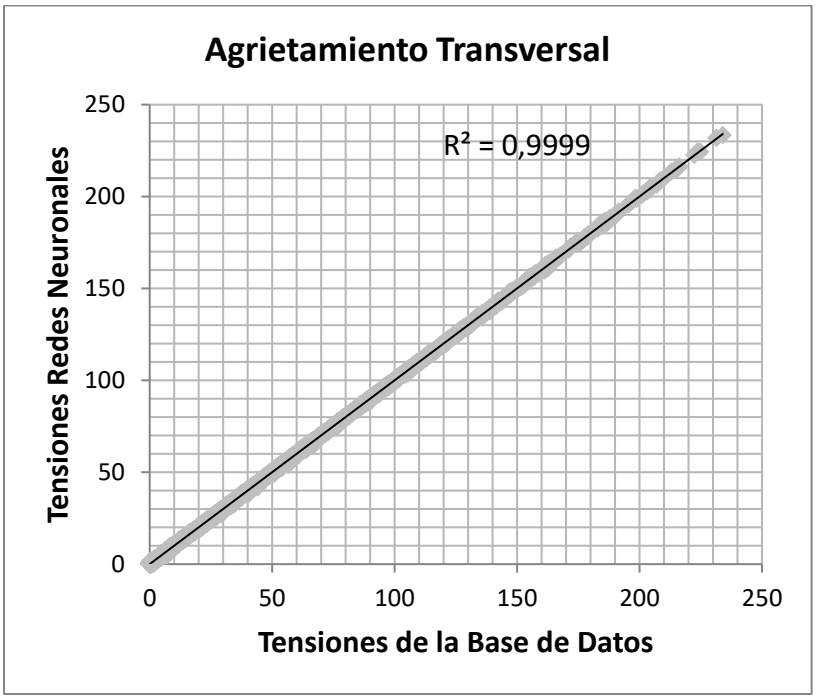
OptiPave 2 TCPavements

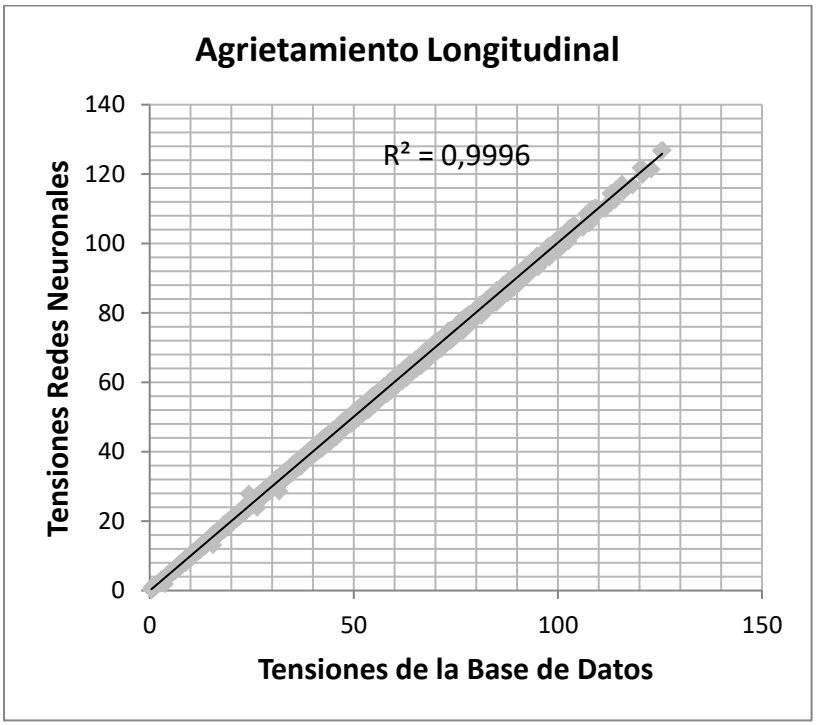
TCPavements®
innovación en pavimentos

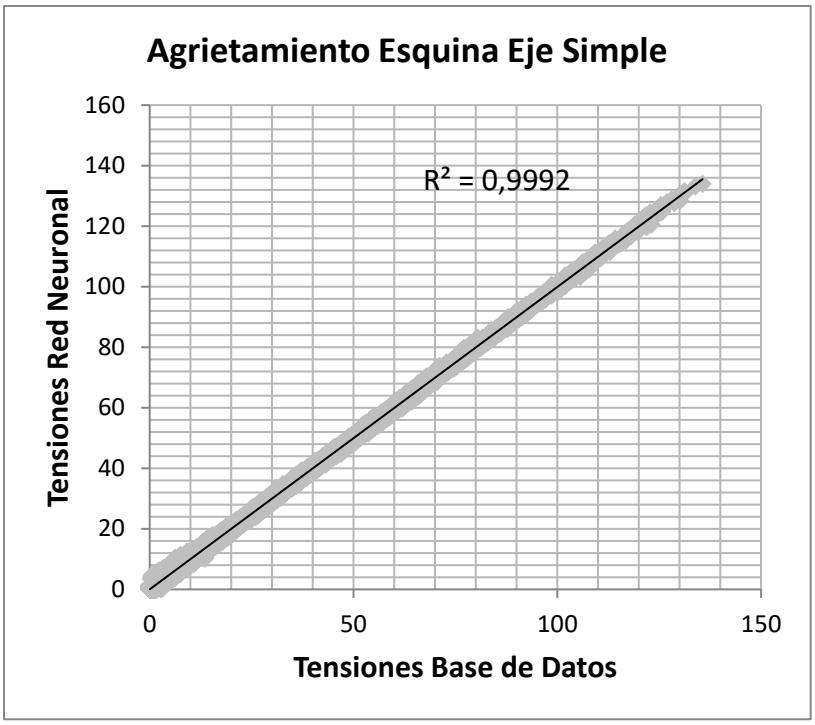
5. Anexos

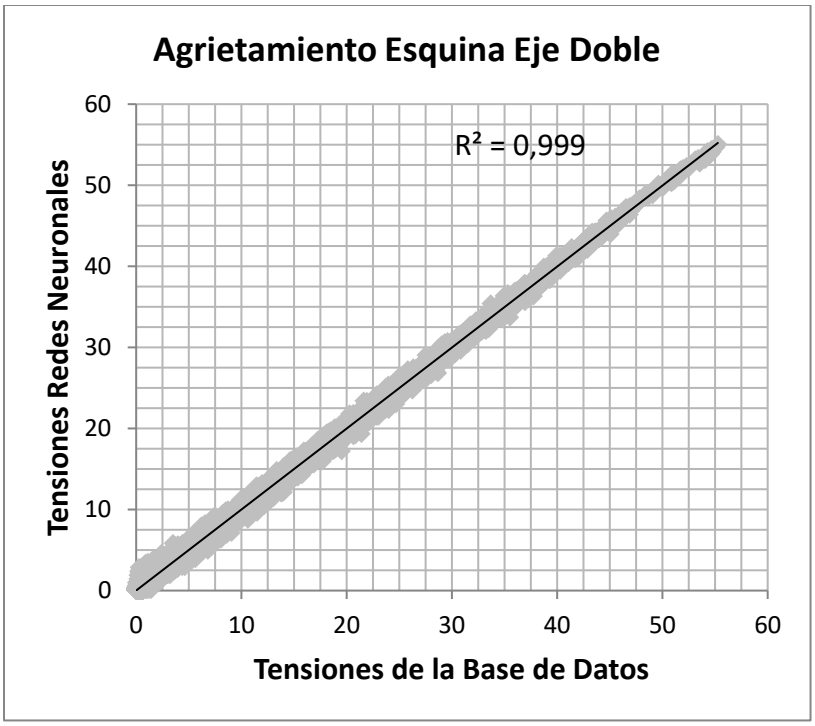
5.1- Comprobación de Redes Neuronales

5.1-1. Entrenamiento de las redes Neuronales



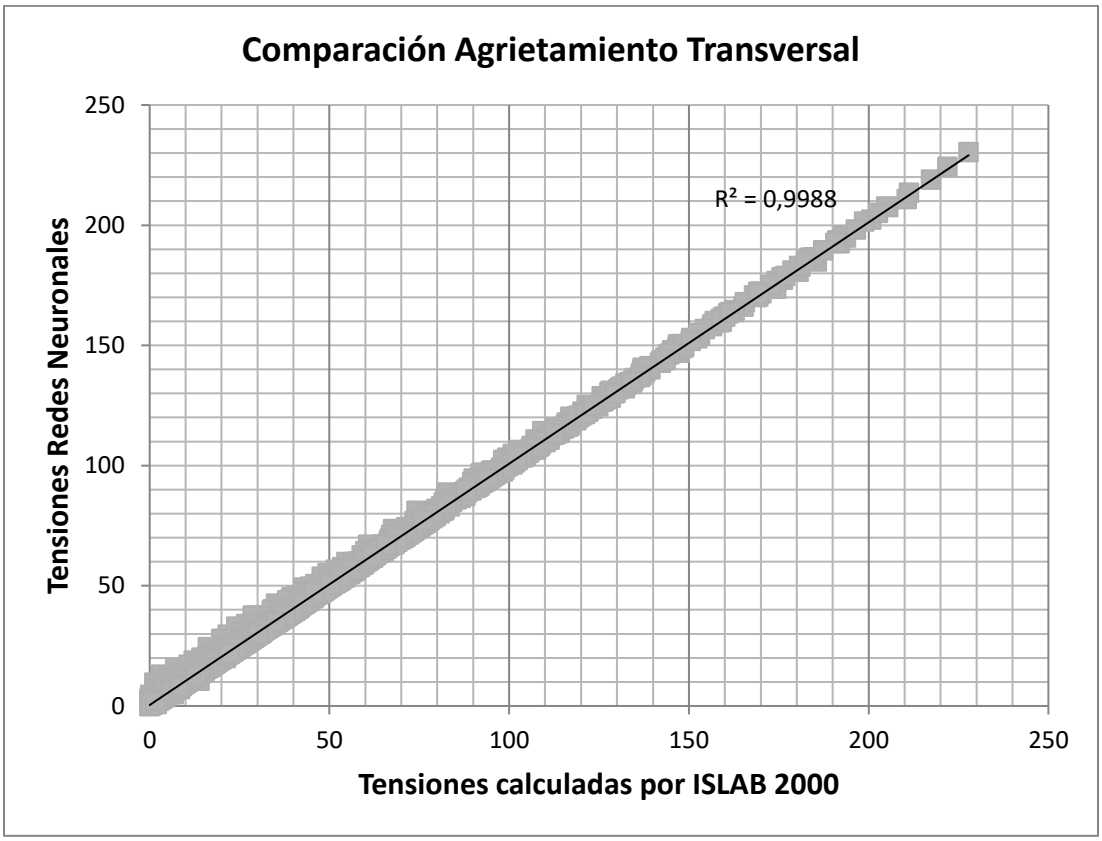


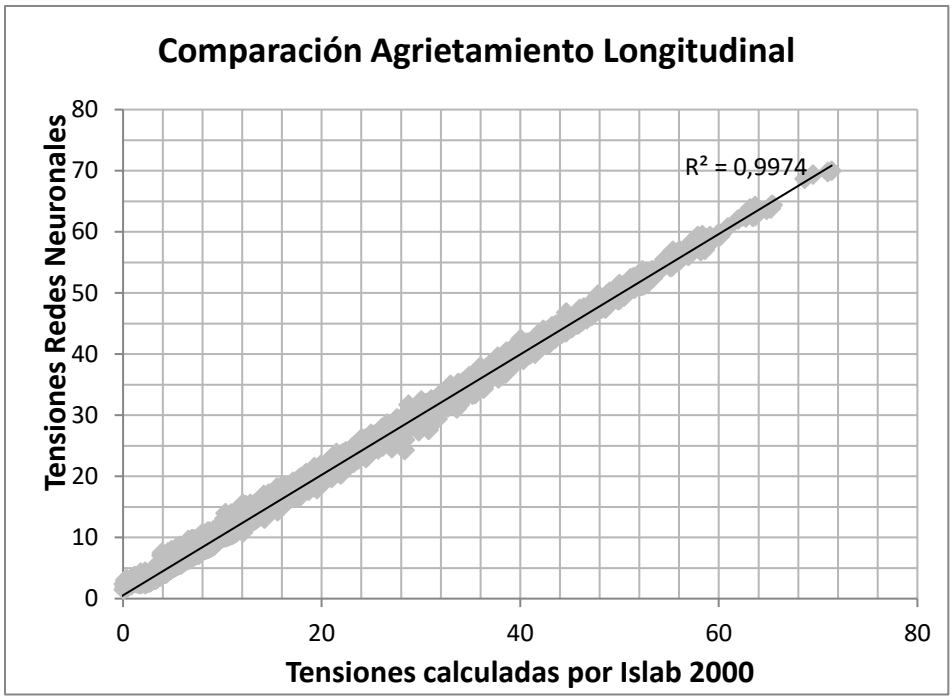

Agrietamiento Esquina Eje Simple
R² = 0,9992
Tensiones Red Neuronal
Tensiones Base de Datos
0
20
40
60
80
100
120
140
160
0
50
100
150

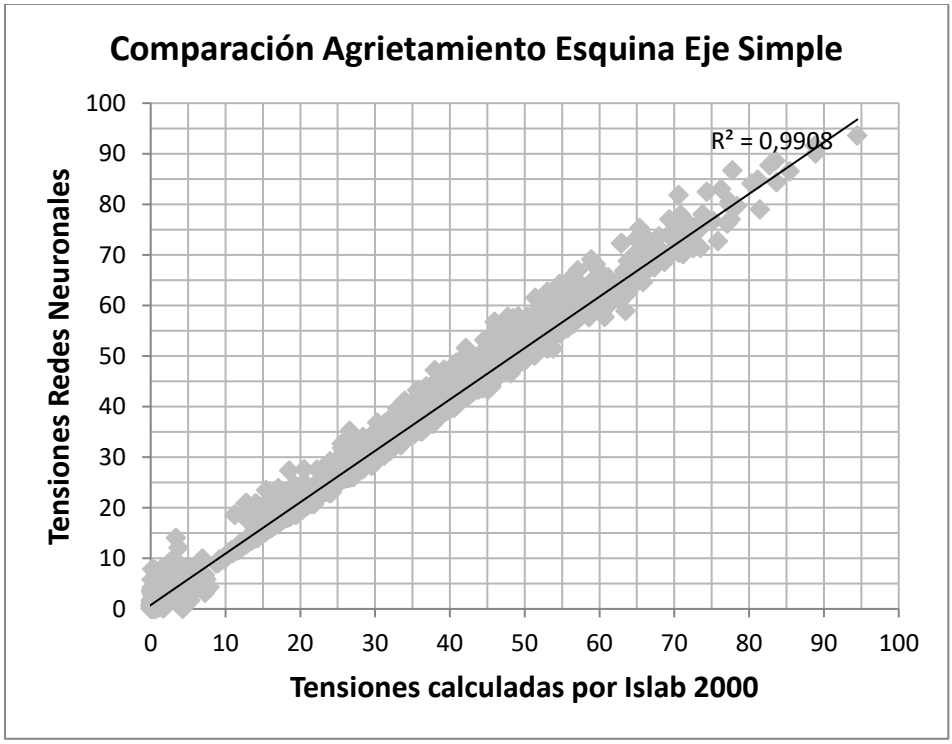

Agrietamiento Esquina Eje Doble
R² = 0,999
Tensiones Redes Neuronales
Tensiones de la Base de Datos
0
10
20
30
40
50
60
0
10
20
30
40
50
60

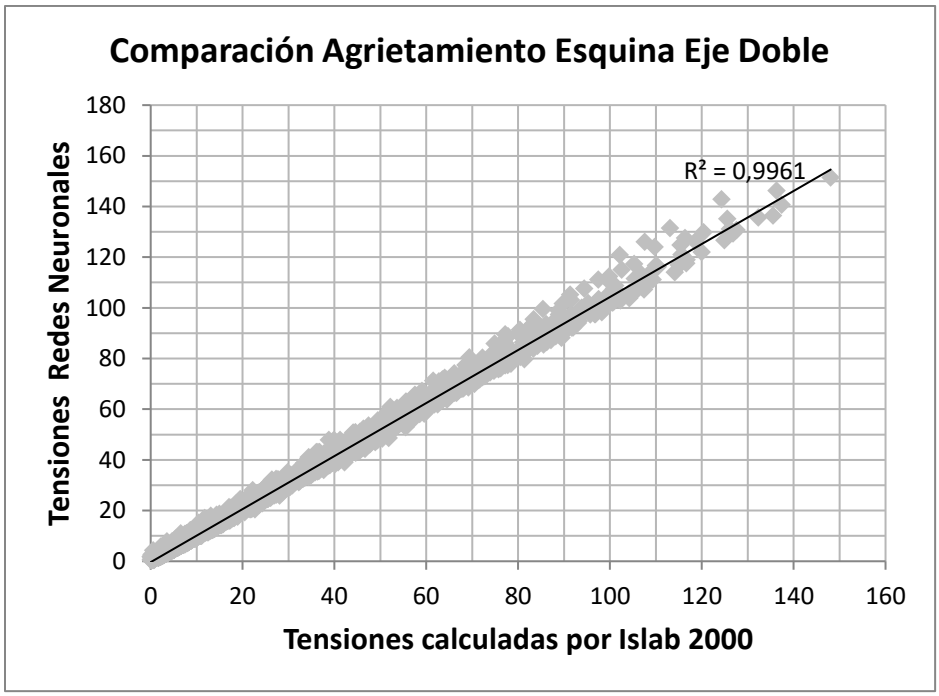
Se verificó en un gran número de casos,la precisión de la red versus casos reales en términos de tensiones para determinar el nivel de grietas del pavimento en el tiempo y deformaciones, para determinar el nivel de escalonamiento en el pavimento.

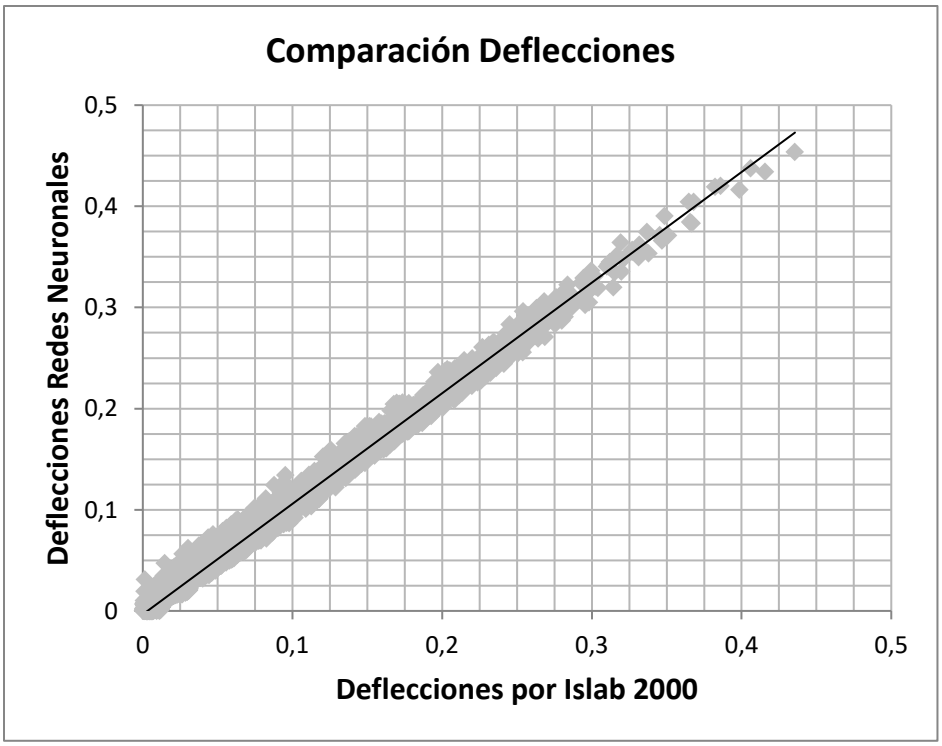
Espesor Hormigón	Espesor base	k-Subrasante	Diferencial de Temperatura	Transferencia de Carga en el Borde	Posición del Eje	Carga por Eje
6 cm	5 cm	5	-15°C	1%	0 cm	4.000 Kg
10 cm	15 cm	8	-5°C	20%	10 cm	10.000 Kg
15 cm	20 cm	10	0°C		40 cm	16.000Kg
20 cm		20	5°C		65 cm	




Comparación Agrietamiento Longitudinal
Tensiones Redes Neuronales
Tensiones calculadas por Islab 2000
R² = 0,9974
0
10
20
30
40
50
60
70
80
0
20
40
60
80


Comparación Agrietamiento Esquina Eje Simple
Tensiones Redes Neuronales
Tensiones calculadas por Islab 2000
R² = 0,9908
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100


Comparación Agrietamiento Esquina Eje Doble
Tensiones Redes Neuronales
Tensiones calculadas por Islab 2000
R² = 0,9961
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180


Comparación Deflecciones
Deflecciones Redes Neuronales
Deflecciones por Islab 2000
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5