

# Diseño Mecánico-Empírico de Pavimentos de Concreto con juntas para Esfuerzo Combinados

J. Rafael Menéndez Acurio, Ingeniero Civil CIP 43670, Ph.D.<sup>1</sup>

José H. Meléndez Palma, Ingeniero Civil CIP 47319, M.S.<sup>2</sup>

Jens E. Monge Zvietcovich, Ingeniero Civil CIP 155838<sup>3</sup>

## 1 RESUMEN

La presente ponencia tiene por objeto presentar una metodología para incorporar los esfuerzos combinados de carga y clima en el diseño mecánico de un pavimento de concreto con juntas. En el diseño de los pavimentos rígidos por lo general se suele considerar solamente los esfuerzos producidos por las cargas. Esta consideración práctica se aplica por que los esfuerzos por carga se presentan millones de repeticiones mientras que los de gradiente térmico una cantidad mucho menor. Adicionalmente, en aquellas carreteras donde el tráfico pesado es principalmente por la noche los esfuerzos por gradiente térmico contribuyen en compensar los esfuerzos por carga.

Dado que en ciertas zonas del país el gradiente térmico es importante el diseño debe considerar la acción de ambos esfuerzos. Para poder sumar estos esfuerzos deben ser calculados en la misma ubicación dentro de la losa. Sin embargo la posición crítica para los esfuerzos de carga es en los bordes de la losa mientras que para los esfuerzos por gradiente térmico es el centro de la losa. Por ende, se deben considerar el zigzageo de los neumáticos en el análisis así como debe considerarse que la ubicación de la carga para el análisis de pavimentos rígidos con juntas es determinante por lo cual se plantea una forma probabilística de considerar la ubicación crítica de la carga considerando el zigzageo de los vehículos, la distribución del tráfico y el efecto del gradiente térmico.

## 2 INTRODUCCIÓN

La aplicación de esfuerzos combinados en el diseño de los pavimentos rígidos con juntas es un tema sobre el cual no hay un enfoque único en las diferentes fuentes bibliográficas. Por una parte, algunos autores indican que el esfuerzo de alabeo por el cambio de temperatura es aliviado en parte por la juntas, asimismo que el esfuerzo por carga se da en millones de repeticiones mientras que el esfuerzo por gradiente se presenta en una cantidad limitada y finalmente que en los esfuerzos de alabeo o por temperatura se suman al esfuerzo por carga en el día pero se sustraen del esfuerzo por carga en las noches (Ref. 1). La Asociación de Cemento Portland PCA (Ref. 2) no considera el esfuerzo de alabeo en el análisis de fatiga. Por otra Thompson y Barenberg plantean que los esfuerzos de alabeo y carga

---

<sup>1</sup> Ingeniero Civil, Doctorado en Pavimentos y Master en Geotecnia, Universidad de Texas A&M. Trabaja en Fugro Roadware Inc., Austin, Texas. Socio fundador de Coniser S.R.Ltda empresa especializada en Pavimentos y Geotecnia. Trabajó en el Instituto de Transportes de Texas A&M, Graña Montero Ingeniería, la Organización Internacional de Trabajo, Provías Nacional, entre otras instituciones. Ha sido docente de maestría de la Universidad Nacional de Ingeniería, así como de otras universidades nacionales tanto en pre grado como post grado  
401 Southwest Pkwy Apt. 202, College Station, TX 77840, USA. Tel. 01.705.9486, 001.979.587.9639, jrmenendez@gmail.com

<sup>2</sup> Ingeniero Civil, Maestría en Transportes, M.S., UNI. Especialista de suelos y pavimentos en CESEL S.A. Socio fundador de Coniser S.R.Ltda empresa especializada en Pavimentos y Geotecnia. Ha sido jefe de proyecto, supervisor y consultor de numerosos proyectos viales en Perú. Ha sido docente de maestría de la Universidad Nacional de Ingeniería y sub director del Instituto de Investigaciones de la Facultad de Ing. Civil de la UNI.  
Calle Fortunato Quezada Nro 109, Of. 402, distrito de San Miguel, Lima. Telf. 01-561-2573, jhmelendez@coniser.com.pe

<sup>3</sup> Ingeniero Civil, Graduado de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Actualmente se desempeña como ingeniero proyectista junior en Coniser S.R.Ltda. Anteriormente trabajo en Lima Airport Partners, Graña y Montero. Con experiencia tanto en etapas de diseño como en construcción en varios proyectos viales y mineros a nivel nacional.

sean combinados para determinar la relación de esfuerzo y por ende el número admisible de repeticiones de carga (Ref. 3):

La experiencia pasada ha demostrado que más grietas aparecen en losas más largas por tener esfuerzos de alabeo mayores que las losas cortas. Al diseñar pavimentos cero-mantenimiento de concreto con juntas, Darter y Barenberg (Ref. 4) sugirió la inclusión de esfuerzos de alabeo con esfuerzos de carga para el análisis de fatiga. El esfuerzo combinado puede ser calculado mediante la siguiente expresión que forma parte del software HDM4 (Ref. 5):

$$\sigma_{combinado} = f_{SB} [f_{ES} f_{WL} \sigma_{b(semicirculo)} + R \sigma_{alabeo}]$$

Donde:  $\sigma_{combinado}$  = esfuerzo combinado por carga y gradiente térmico;  $f_{SB}$  = factor de ajuste por base estabilizada;  $f_{ES}$  = factor de ajuste lateral;  $f_{WL}$  = factor de ajuste por ensanche de los carriles exterior ( $f_{WL}$ );  $\sigma_{b(semicirculo)}$  = esfuerzo actuante es calculado con la expresión desarrollada por Westergaard (Ref. 6) para esfuerzos de borde;  $R$  = coeficiente de correlación del gradiente de temperatura;  $\sigma_{alabeo}$  = esfuerzo de alabeo.

El daño acumulado por fatiga en la losa de concreto como consecuencia de la aplicación de los esfuerzos combinados calculados mediante las expresiones anteriores se calcula con la siguiente expresión:

$$FD = \sum_{Tg=1}^G \frac{n_{tg}}{N_{tg}}$$

Donde:  $FD$  = Factor de daño acumulado;  $tg$  = gradiente térmico durante un determinado periodo;  $n_{tg}$  = número de repeticiones de carga incluido el gradiente térmico,  $n_{tg} = \frac{NE4}{LCR_{tg}} FREQ_{tg}$ ;  $NE4$  = Número acumulado de repeticiones de ejes equivalentes de 18 kips (ESAL) expresado en millones por carril acumulados desde la construcción del pavimento;  $FREQ_{tg}$  = frecuencia de cada gradiente de temperatura  $tg$ ;  $LCR_{tg}$  = radio de cobertura lateral del tráfico para gradiente de temperatura  $tg$ ,  $LCR_{tg} = 418.9 - 1148.6SR_{tg} + 1259.9SR_{tg}^2 - 419.55SR_{tg}^3$ ;  $SR_{tg}$  = relación entre el esfuerzo combinado en la losa y el módulo de rotura del concreto para un determinado gradiente de temperatura  $tg$ ,  $SR_{tg} = \frac{\sigma_{(combinado)tg}}{MR}$ ;  $\sigma_{(combinado)tg}$  = esfuerzo combinado para el gradiente de temperatura  $tg$ ;  $MR$  = módulo de rotura del concreto (psi);  $N_{tg}$  = máximo número de repeticiones de ejes equivalentes de 18 kips (ESAL) expresado en millones por carril, durante el gradiente de temperatura  $tg$  antes que se produzca la falla por flexión,  $\log_{10}(N_{tg}) = 2.13 SR_{tg}^{-1.2}$

### 3 MÉTODOLÓGÍA

La metodología planteada comprende los siguientes pasos:

- Realizar un prediseño con el método AASHTO 93 (Ref. 7).
- Calcular de los esfuerzos en la losa para diferentes tipos de ejes y ubicaciones simulando aleatoriamente de las posiciones de carga en base a una función probabilística
- Calcular los esfuerzos por gradiente térmico en diferentes posiciones de la losa
- Calcular el esfuerzo combinado de carga y gradiente térmico
- Calcular de la probabilidad de daño para diferentes espesores
- Obtener el espesor adecuado para el nivel de confiabilidad requerido

### 3.1 Prediseño con el método AASHTO

El espesor de la losa se requiere se obtiene utilizando la ecuación correspondiente.

$$\log W_{18} = Z_R S_o + 7.35 \log(D + 1) - 0.06 + \frac{\log \left[ \frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 p_t) \log \left[ \frac{S'_c C_d (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 J \left[ D^{0.75} - \frac{18.42}{(E_c/k)^{0.25}} \right]} \right]$$

Donde:  $W_{18}$  = número previsto de ejes equivalentes 18 kips (8.2 Tn), a lo largo del periodo de diseño;  $Z_R$  = desviación normal estándar;  $S_o$  = error estándar combinado en la predicción del tránsito y en la variación del comportamiento esperado del pavimento;  $D$  = espesor de pavimento de concreto mm o pulg;  $\Delta PSI$  = diferencia entre los índices de servicio inicial y final,  $p_t$  = índice de serviciabilidad o servicio final;  $S'_c$  = resistencia media del concreto a flexo tracción a los 28 días (método de carga en el tercio central) en MPa o psi;  $C_d$  = coeficiente de drenaje;  $J$  = coeficiente de transmisión de carga en las juntas;  $E_c$  = módulo de elasticidad del concreto en Mpa o psi;  $k$  = módulo de reacción, compuesto de la sub base y la sub rasante Mpa/m o lb/pulg<sup>3</sup>.

El módulo de reacción compuesto fue calculado mediante la siguiente expresión (Ref. 7) considerando que la cimentación rígida (lecho rocoso) se encuentra en un espesor semi-infinito que para efectos prácticos se puede considerar como mayor a 10 pies por debajo de la superficie de la sub rasante.

$$\ln(k_\infty) = -2.807 + 0.1253 (\ln(D_{SB}))^2 + 1.062 \ln(M_R) + 0.1282 \ln(D_{SB}) \ln(E_{SB}) - 0.4114 \ln(D_{SB}) - 0.0581 \ln(E_{SB}) - 0.1317 \ln(D_{SB}) \ln(M_R)$$

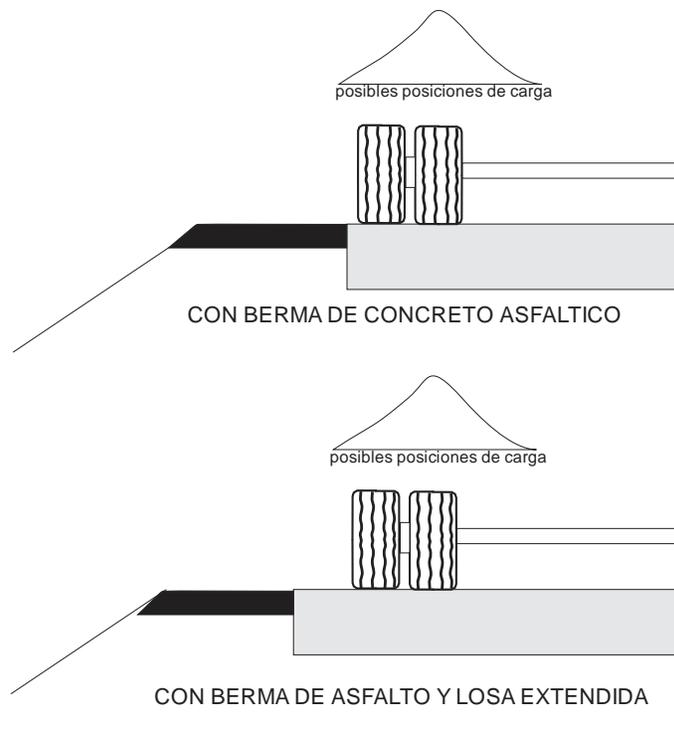
Donde:  $k_\infty$  = módulo de reacción compuesto de la sub rasante considerando que el lecho rocoso está a un espesor semi-infinito (10 pies para efectos prácticos);  $D_{SB}$  = espesor de la sub base (pulg);  $E_{SB}$  = módulo elástico de la sub base (pulg);  $M_R$  = módulo elástico (resiliente) de la sub rasante (psi).

El valor promedio del módulo de reacción fue ajustado por el potencial de pérdida de soporte debido a la erosión de la sub base para LS=0.5. El valor ajustado del módulo de reacción se obtuvo mediante la figura 3.3 parte 2 (Ref. 7).

### 3.2 Cálculo de los esfuerzos en la losa para diferentes tipos de ejes y ubicaciones

Los esfuerzos por carga se calculan para cuatro tipos de ejes (simple, simple dual, tándem y tridem), tres posiciones de carga con respecto al borde (borde externo, 45 cm del borde externo y 90 cm del borde externo), en dos ubicaciones de la carga, en la junta y con la resultante de carga en el medio de la losa. Estos esfuerzos pueden ser calculados empleando las ecuaciones de análisis de losas apoyadas en el suelo (Ref. 8) o mediante algún programa de cómputo de elementos finitos. En el presente caso se empleó el programa KENSLAB (Ref. 1) y el programa EverFe (Ref. 9). En dichas posiciones fueron calculados los esfuerzos máximos mediante los programas de cómputo mencionados. Luego los esfuerzos resultantes fueron combinados con los esfuerzos por gradiente térmico y se calculó el número de repeticiones admisible.

Se debe tomar en cuenta que no todos los vehículos circularán por el borde debido al zigzageo esto hace que se deba simular todas las posibles posiciones. Se consideró lo indicado en la guía MEPDG del NCHRP (Ref. 10) que señala que en las cargas tiene un zigzageo que sigue una distribución normal con una media de 18 pulgadas.



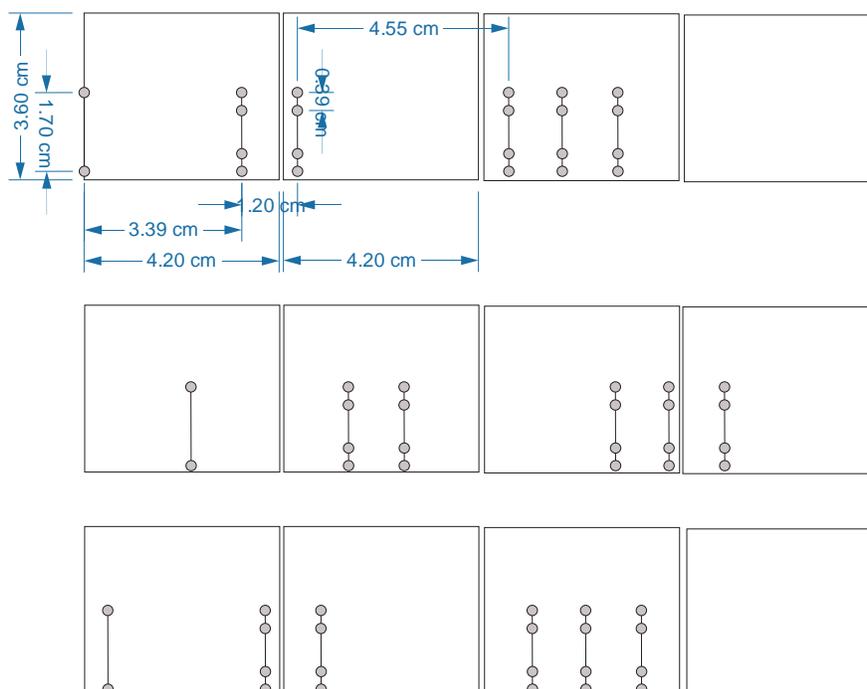
**Figura 1.** Pavimento rígido berma de concreto asfáltico y con losa extendida 30 cm

El modelo para la generación de ubicaciones aleatorias de la carga tiene una distribución normal con promedio de 45 cm del borde de la losa y una desviación estándar de 15 cm. En la siguiente se muestra un esquema de la distribución de posiciones de carga del neumático cercano al borde de la losa considerando berma de asfalto y una losa extendida 30 cm. Las dimensiones de los vehículos fueron obtenidas en base a la bibliografía existente al respecto (Ref. 11, 12) y se resumen en el siguiente cuadro:

**Tabla 1.** Geometría de los ejes analizados

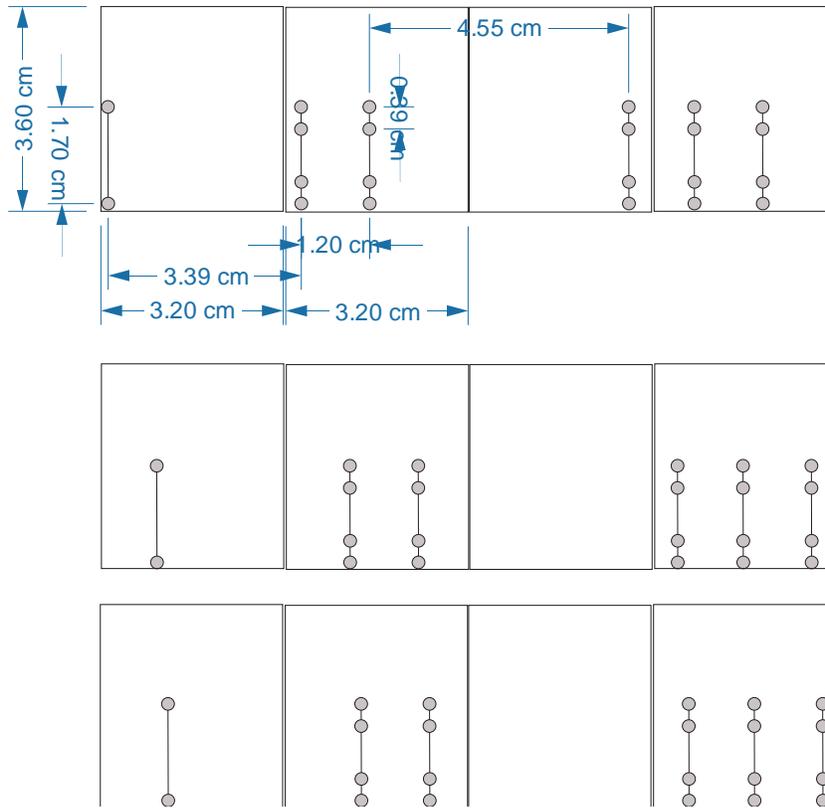
Distancias	cm	pulg	pies
Ancho entre neumaticos	170.0	66.9	5.6
Distancia entre neumáticos eje x	40.0	15.7	1.3
Espaciamiento entre ejes	120.0	47.2	3.9
Distancia eje simple/tandem	340.0	133.9	11.2
Distancia tandem-tridem	460.0	181.1	15.1
Distancia del borde a la carga	45.0	15.7	1.3
Desv. Estandar de la distancia	15.0	5.9	0.5

Las dimensiones de la losa son también críticas al momento de calcular el espesor de la losa puesto que se pueden producir superposición de los ejes, para tal efecto se analizó un vehículo de tipo T3S3 que suele ser el tipo de vehículo pesado que se presenta con mayor frecuencia en el IMD. En la siguiente figura se muestran las tres posiciones críticas: carga en el borde, resultante del eje tandem en el centro, y resultante del eje tridem en el centro en una losa con dimensiones tradicionales de 4.20 m de largo y 3.60 m de ancho.



**Figura 2.** Posiciones de carga críticas losa con berma de asfalto

Con el objeto de evitar la superposición de dos ejes en una losa se estableció que el largo de la losa debe ser como máximo el valor mínimo de distancia entre el eje delantero y el primer eje de carga posterior (de 3.50 m a 5.50 m). Luego de analizar las diferentes posiciones críticas se plantea reducir el largo de la losa de 4.50 m a 3.20 m para evitar que se apoyen simultáneamente en la losa un eje simple y el eje posterior tal como se muestra en el siguiente gráfico que en ninguno de los casos de carga crítica se superponen los ejes.



**Figura 3.** Posiciones de carga críticas en losa ensanchada 30 cm y berma de asfalto

### 3.3 Cálculo de los esfuerzos por gradiente térmico en diferentes posiciones de la losa

Los esfuerzos por gradiente término se suman a los de carga durante el día y se restan de los producidos por la carga en las noches. El esfuerzo térmico en la dirección  $x$  y  $y$  al interior de la losa fue calculado mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_x = \frac{C_x E \alpha_t \Delta t}{2(1 - \mu^2)} + \frac{C_y \mu E \alpha_t \Delta t}{2(1 - \mu^2)} = \frac{E \alpha_t \Delta t}{2(1 - \mu^2)} (C_x + \mu C_y)$$

$$\sigma_y = \frac{C_x E \alpha_t \Delta t}{2(1 - \mu^2)} + \frac{C_y \mu E \alpha_t \Delta t}{2(1 - \mu^2)} = \frac{E \alpha_t \Delta t}{2(1 - \mu^2)} (C_y + \mu C_x)$$

Mientras que el esfuerzo de borde en la mitad de la losa fue calculado con la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{C E \alpha_t \Delta t}{2}$$

Donde:  $\sigma_{x,y}$  = esfuerzos de alabeo por gradiente térmico;  $C$  = factor de corrección calculado mediante la siguiente expresión:

$$C = 1 - \frac{2 \cos(\lambda) \cosh(\lambda)}{[\text{sen}(2\lambda) + 2 \text{senh}(\lambda) \cosh(\lambda)]} \left[ \tan(\lambda) + \frac{\sinh(\lambda)}{\cosh(\lambda)} \right]$$

$\lambda$  = coeficiente que depende de la longitud y rigidez de la losa  $\lambda = \frac{L_{losa}}{\ell\sqrt{8}}$  en sexagesimales;  $L_{losa}$  = longitud de la losa,  $\ell$  = rigidez relativa

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

$E$  = módulo de elasticidad del concreto;  $\alpha_t$ =coeficiente de expansión térmica del concreto (se asume  $5 \times 10^{-6}$  pulg/pulg/ $^{\circ}$ F= $9 \times 10^{-6}$  mm/mm/ $^{\circ}$ C);  $\Delta t$  = gradiente térmico (diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior de la losa de concreto); y  $k$  = módulo de reacción de la subrasante.

Para poder simular el efecto diferencia del gradiente térmico entre el día y la noche se analizó la cantidad de vehículos por hora. De tal forma que la distribución del efecto por gradiente térmico seguirá dicha distribución, la misma que para efectos de la generación aleatoria de datos ha sido representada como una distribución de tipo beta. La variación horaria de temperatura se asume que seguirá una trayectoria sinusoidal que solamente depende de la temperatura promedio y máxima. La expresión empleada para dicho cálculo es la siguiente (Ref. 13):

$$T_t = T_{promedio} + (T_{máxima} - T_{promedio}) * \text{seno} \left( \frac{2\pi}{24} * Hora + \frac{10}{8} \pi \right)$$

Donde:  $T_t$ = temperatura horaria;  $T_{promedio}$ = temperatura diaria promedio;  $T_{máxima}$ = temperatura diaria máxima;  $Hora$ = hora del día.

El esfuerzo por temperatura fue calculado en las posiciones en el borde e interior de la losa de acuerdo a la selección aleatoria de la ubicación de los esfuerzos que se realizó mediante el método Montecarlo empleando el programa @Risk (Ref. 14) considerando que la distribución de tráfico a lo largo del día seguirá una distribución de tipo beta.

### 3.4 Calcular el esfuerzo combinado de carga y gradiente térmico

El esfuerzo combinado se obtiene de sumar directamente el esfuerzo de carga con el esfuerzo por gradiente térmico para cada una de las posiciones analizadas.

### 3.5 Calcular de la probabilidad de daño para diferentes espesores

Como la falla por fatiga en los pavimentos de concreto está gobernada por la relación entre el esfuerzo actuante y el resistente. Para lo cual se han desarrollado una serie de expresiones entre las cuales se tiene:

$$\text{PCA (Ref. 2), } \frac{\sigma}{S_c} \geq 0.55 \quad \log N_f = 11.737 - 12.077 \left[ \frac{\sigma}{S_c} \right]$$

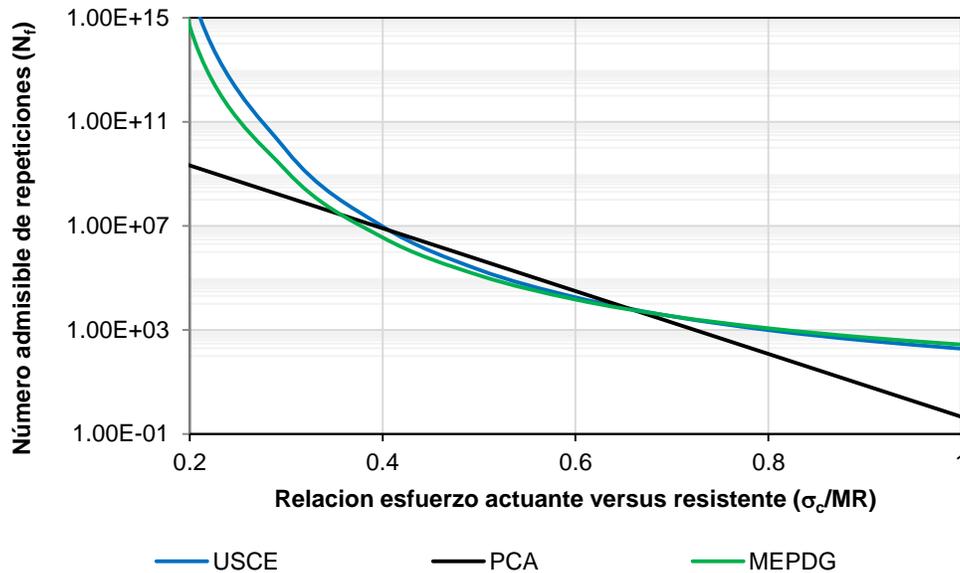
$$\text{MEPDG (Ref. 10) : } \log(N_{i,j,k,l,m,n}) = C_1 \left[ \frac{MR_i}{\sigma_{i,j,k,l,m,n}} \right]^{C_2} + 0.4371$$

USACE (Ref. 15) para una probabilidad (P) de 24% de acuerdo a lo indicado por Darter y Barenberg (Ref. 16):

$$\log N = \left[ \frac{-\left(\frac{\sigma}{S_c}\right) \log(1 - P)}{0.0032} \right]^{-0.2276}$$

Donde:  $N_{i,j,k,l,m,n}$  = número de repeticiones admisibles en la condición  $i, j, k, l, m, n$ ;  $i$  = edad;  $j$  = mes de análisis;  $k$  = tipo de eje;  $l$  = nivel de carga;  $m$  = diferencia de temperatura;  $n$  = ubicación del tráfico;  $MR_i$  o  $S_c$  = módulo de rotura del PCC;  $\sigma_{i,j,k,l,m,n}$  = esfuerzos aplicados en la condición  $i, j, k, l, m, n$ ;  $C_1$  = constante de calibración=2.0;  $C_2$  = constante de calibración=1.22;  $P$  = probabilidad de falla.

En la siguiente figura se muestra una comparación entre los resultados para las tres expresiones anteriores para un rango de relación de esfuerzos de 0.2 a 1.0. Se puede apreciar que la expresión empleada por PCA y aplicada en el programa Kenslab da los resultados menores que las otras expresiones en el rango de 0.7 a 1.0 de relación de esfuerzos y valores similares a los obtenidos por las expresiones del NCHRP y USACE, razón por la cual se optó por emplear la expresión de PCA.



**Figura 4.** Comparación entre las diferentes expresiones para determinar el número de repeticiones admisible (Ref. 2, 10, 15, 16)

Luego de calcular el número de repeticiones admisible para cada una de las combinaciones de carga (cada combinación produce una relación de esfuerzos diferente), se procede a calcular el factor de daño. El cual es resultado de la acumulación del daño producido por la aplicación de las cargas sucesivas:

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_{fi}}$$

Donde :  $\sigma_i$  = esfuerzo combinado del tipo de eje  $i$ ;  $S_c$  = módulo de rotura del concreto;  $m$  = número total de tipos de ejes;  $n_i$  = número previsto de repeticiones para el grupo de carga  $i$ ; y  $N_{fi}$  = número permisible de repeticiones para el grupo de carga  $i$ ;  $D$  = daño.

Luego de calcular el daño para las diferentes combinaciones y posiciones generadas aleatorias se construye la distribución de probabilidades.

## 4 RESULTADOS

A continuación se presenta la aplicación de la metodología indicada a un sección de vía. Este ejemplo corresponde a una carretera en la costa peruana con un alto volumen de tráfico en la cual la opción de diseño de pavimento rígido es analizada y optimizada con este procedimiento.

### 4.1 Prediseño con el método AASHTO

El prediseño se realizó mediante el método AASHTO 93 (Ref. 7) con los parámetros indicados en la guía de diseño del MTC (Ref. 17) para el tráfico proyectado a 20 años. En la siguiente figura se aprecia el ESAL por tipo de vehículo. El vehículo T3S3 es el que tiene mayor cantidad de repeticiones y luego el tipo C2.

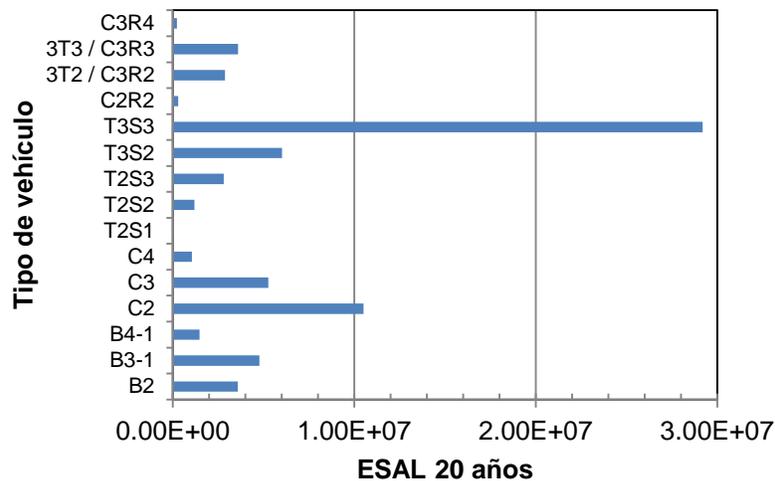
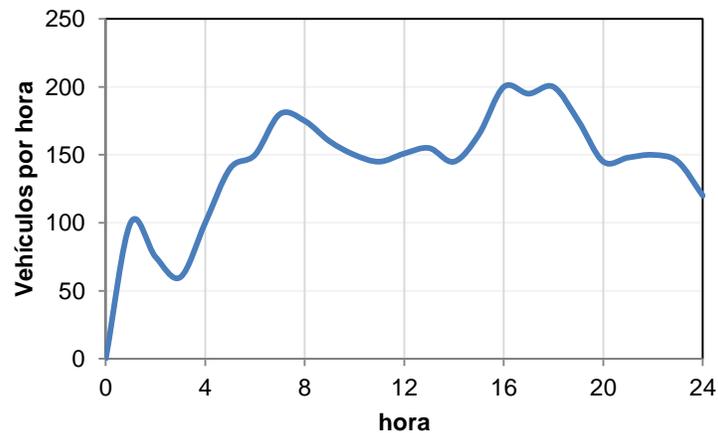


Figura 5. ESAL por tipo de vehículo para 20 años

Es importante conocer como están distribuidos los vehículos a lo largo del día. Esto debido a que se calcula los esfuerzo térmicos y de carga por cada hora para que puedan ser combinados. Se aprecia en la siguiente figura como se distribuye el IMD a lo largo del día existiendo una mayor concentración de vehículos a las 8 de la mañana y cinco de la tarde. Esta distribución varía por cada día de la semana por lo cual se toma el promedio semanal para el cálculo.



**Figura 6. Tráfico horario**

En el siguiente cuadro se presenta el resumen del tráfico y las características del suelo de fundación sub base y concreto hidráulico. Debido a que el trazado es en relleno el suelo de fundación está conformado por la corona del terraplén. Para el cálculo se ha considerado un solo espesor de la sub base en todos los casos.

**.Tabla 2. Propiedades de los materiales de la estructura del pavimento**

Tráfico (ESAL)	Sub rasante		Sub base		CBR (%)	Resistencia a la compresión $f'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Concreto	
	CBR	$k_{compuesto}$ (pci)	pulg	cm			Módulo de rotura $S'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad (MPa)
7.29E+07	25.3	385	6	15	40	350	44	27,854

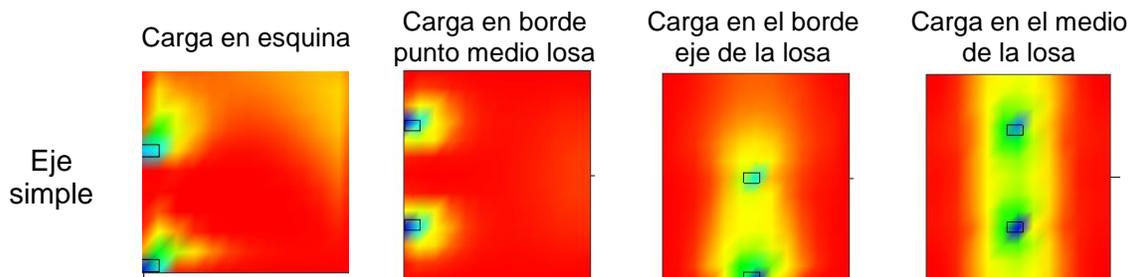
Se ha calculado dos alternativas de geometría de las losas, una primera donde la berma es de asfalto por lo tanto el coeficiente de transmisión de carga en las juntas es de 3.2, la segunda alternativa es considerar un sobrecancho de losa de 30 cm que actuaría como una berma por lo tanto se puede reducir el valor del coeficiente de transmisión de carga a 2.8. Los resultados se muestran en el siguiente cuadro:

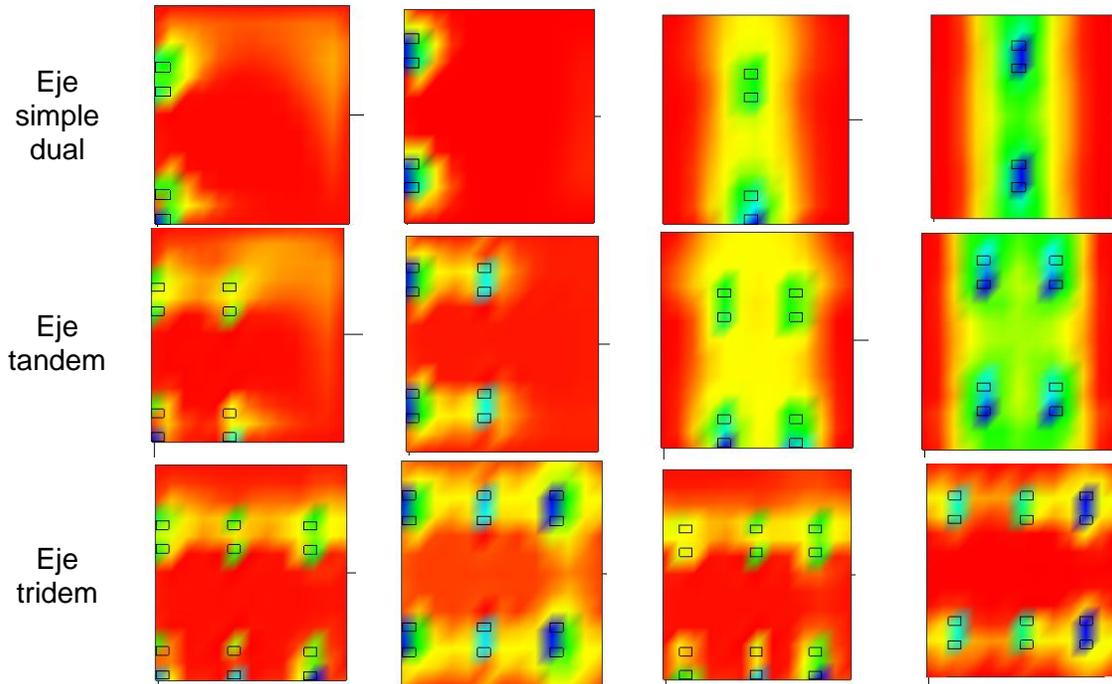
**Tabla 3. Resultados del diseño para un periodo de 20 años**

Tráfico (ESAL)	Sub rasante		Sub base		Losas de concreto			
	CBR	$k_{compuesto}$ (pci)	pulg	cm	Berma asfalto		Losas extendidas en 30cm	
					pulg	cm	pulg	cm
7.29E+07	25.3	385	6	15	12.4	31.5	11.4	29.0

#### 4.2 Esfuerzos en la losa para diferentes tipos de ejes y ubicaciones

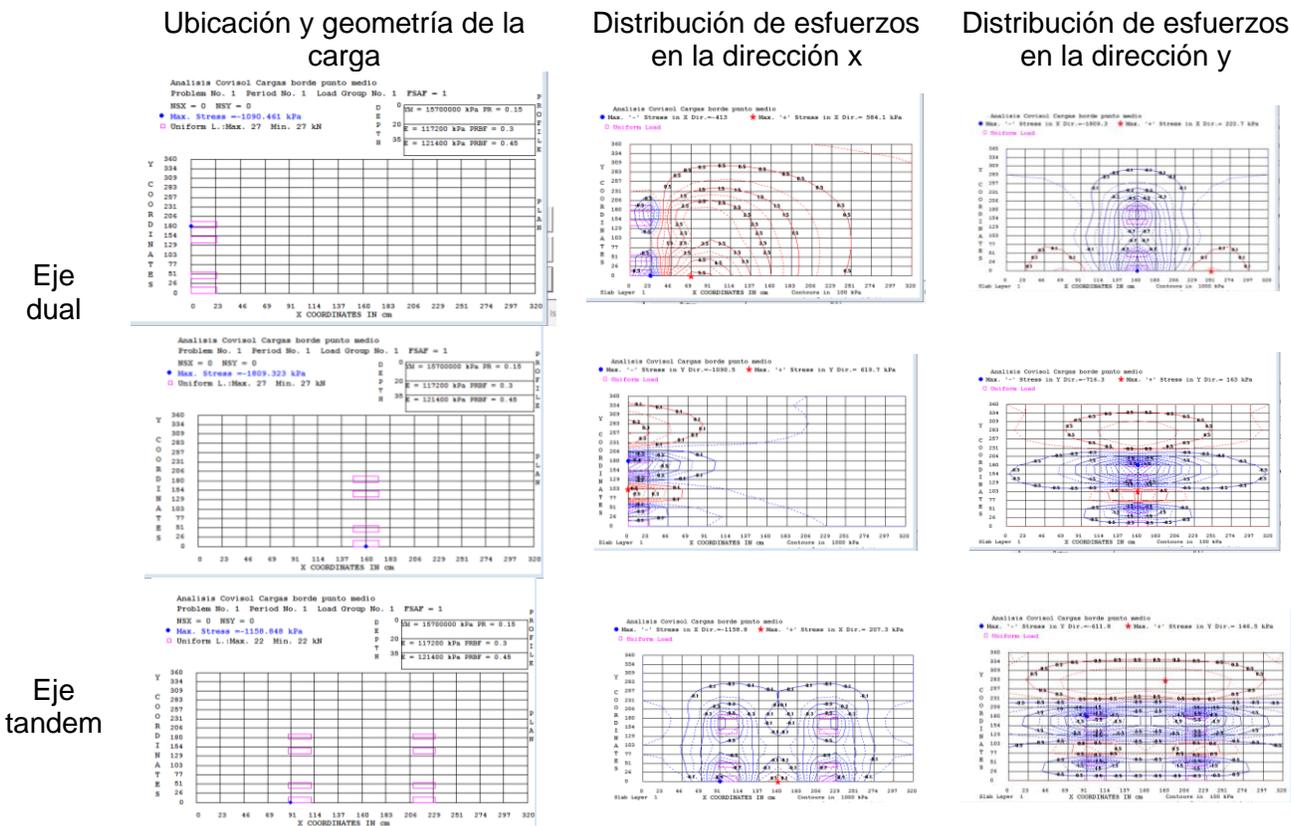
Se efectuaron los cálculos para tres probables espesores de losa: 20 cm, 25 cm y 30 cm. De cada una de las posiciones de carga se obtuvo el esfuerzo máximo. Los esfuerzos por carga fueron obtenidos mediante el programa EverFE y el programa KENSLAB. Las condiciones de tráfico, suelo de fundación sub base se muestran en el siguiente cuadro. En la siguiente figura se presenta una representación gráfica de esfuerzos para los diferentes tipos de ejes y ubicaciones obtenidos mediante el programa EverFe.



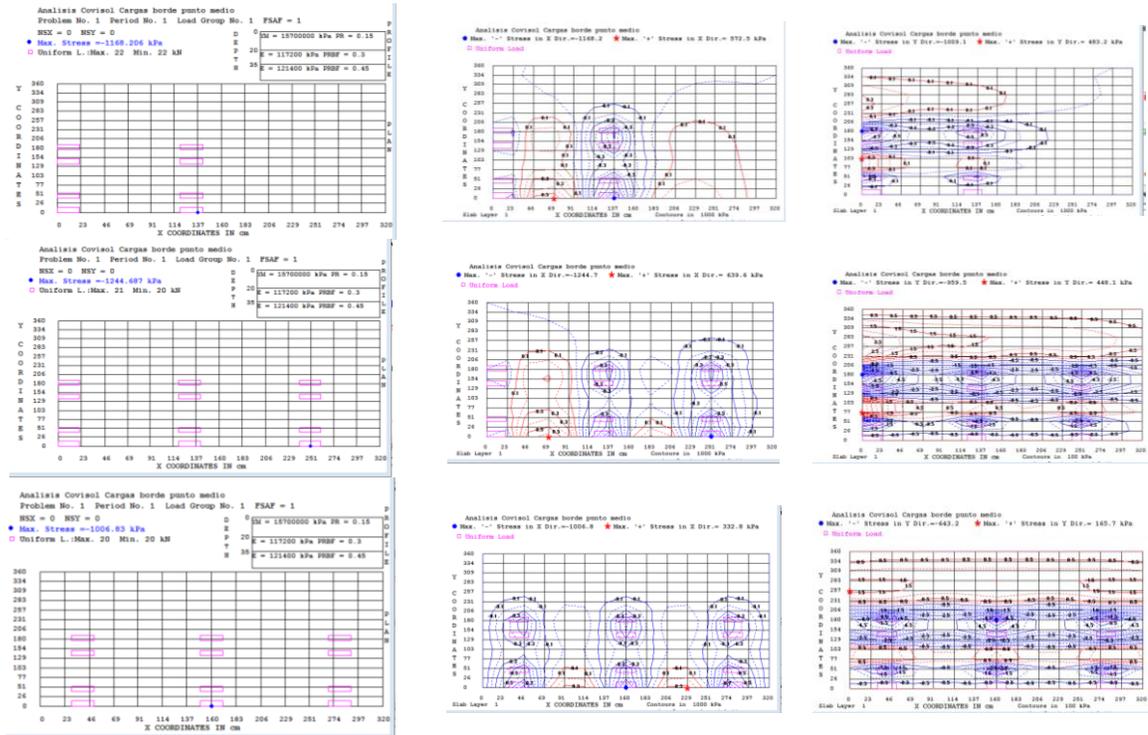


**Figura 7.** Gráfico de distribución de esfuerzos para los diferentes tipos de ejes y posiciones de carga obtenidos con el programa EverFe

En la siguiente figura se muestra la representación gráfica los esfuerzos en ambas direcciones para cada uno de los tipos de ejes. Los mayores esfuerzos en la dirección X se dan para el tipo de eje tridem para el punto de análisis por debajo del tercer eje.



Eje tridem



**Figura 8.** Resultados del programa Kenslab, mostrando: la geometría y ubicación de las cargas; distribución de esfuerzos en x; y distribución de esfuerzos en y.

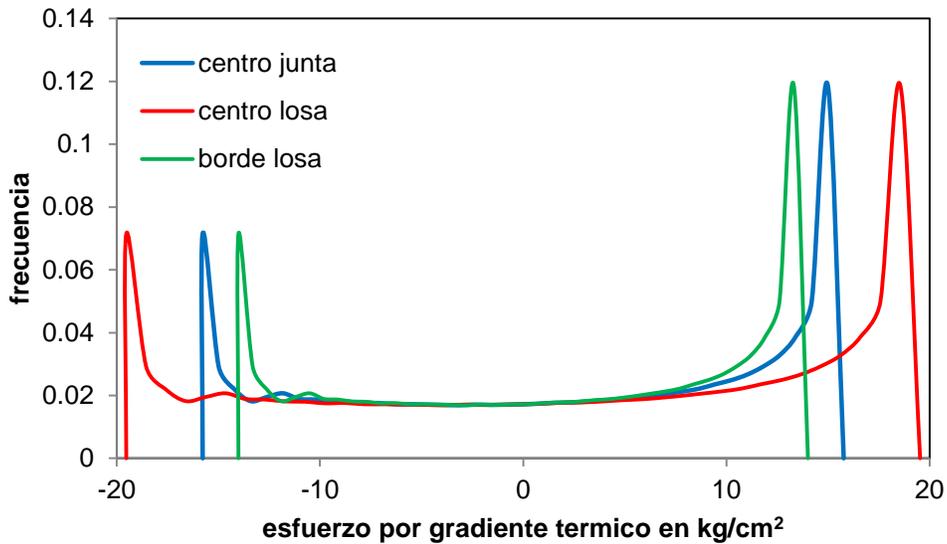
En la siguiente tabla se presenta el resumen de los esfuerzos por carga por cada tipo de eje. Para cada posición de carga y para diferentes espesores de losa. El mayor esfuerzo es producido por el eje dual cuando la carga se ubica en el borde de la losa.

**Tabla 4.** Esfuerzos en la losa en diferentes posiciones de carga

Espesor losa (cm)	Posicion carga		Esfuerzo en kPa por tipo de eje			
			simple	simple dual	tandem	tridem
30	junta	borde	1,250.0	1,510.0	956.0	885.0
		medio	915.0	840.0	845.0	785.0
		interior	1,030.0	885.0	808.0	782.0
	centro	borde	1,240.0	1,680.0	1,050.0	876.0
		medio	797.0	1,110.0	785.0	689.0
		interior	783.0	1,150.0	782.0	684.0
25	junta	borde	1,240.0	1,540.0	973.0	906.4
		medio	1,130.0	1,080.0	1,100.0	948.0
		interior	1,340.0	1,150.0	994.0	941.0
	centro	borde	1,550.0	2,150.0	1,300.0	1,080.0
		medio	978.0	1,370.0	948.0	836.0
		interior	952.0	1,430.0	941.0	820.0
20	junta	borde	1,660.0	1,570.0	1,030.0	1,177.6
		medio	1,540.0	1,480.0	1,500.0	1,150.0
		interior	1,870.0	1,570.0	1,300.0	1,140.0
	centro	borde	2,030.0	2,830.0	1,620.0	1,370.0
		medio	1,230.0	1,720.0	1,150.0	1,020.0
		interior	1,200.0	1,810.0	1,140.0	996.0

### 4.3 Esfuerzos por gradiente térmico en diferentes posiciones de la losa

El esfuerzo por temperatura fue calculado en las posiciones en el borde e interior de la losa de acuerdo a la selección aleatoria de la ubicación de los esfuerzos que se realizó mediante el método Montecarlo empleando el programa @Risk (Ref. 14) considerando que la distribución de tráfico a lo largo del día seguirá una distribución de tipo beta. La siguiente figura muestra la distribución de probabilidades de los esfuerzos por gradiente térmico en tres ubicaciones de la losa. Tal como se aprecia la magnitud de los esfuerzos es mayor en el centro de la losa tanto para los valores mínimos como máximos. En el caso del borde de la losa los esfuerzos son los menores en el rango de -14 a 14 kg/cm<sup>2</sup>.



**Figura 9.** Distribución probabilística de los esfuerzos por gradiente térmico para tres ubicaciones en la losa

Los esfuerzos por carga se sumaron a los esfuerzos por gradiente y se procedió a calcular el número de repeticiones por tipo de carga que producirán la falla por fatiga.

#### 4.4 Calcular de la probabilidad de daño para diferentes espesores

Luego mediante el Método de Monte Carlo (Ref. 18) empleando el programa @Risk (Ref. 14) se simularon las diferentes posiciones de carga, esfuerzos por carga y temperatura y con la ecuación de deterioro se obtuvo los espesores requeridos a diferentes niveles de confiabilidad. Los resultados a una confiabilidad del 90% se presentan en la siguiente figura. En ella se aprecia que en los casos de losa de ancho 3.60 el espesor requerido está gobernado por el daño producido por la carga cuya resultante se ubica en el centro de la losa, mientras que para las losas ensanchadas el espesor está gobernado por el daño producido en la esquina (formada en la junta).

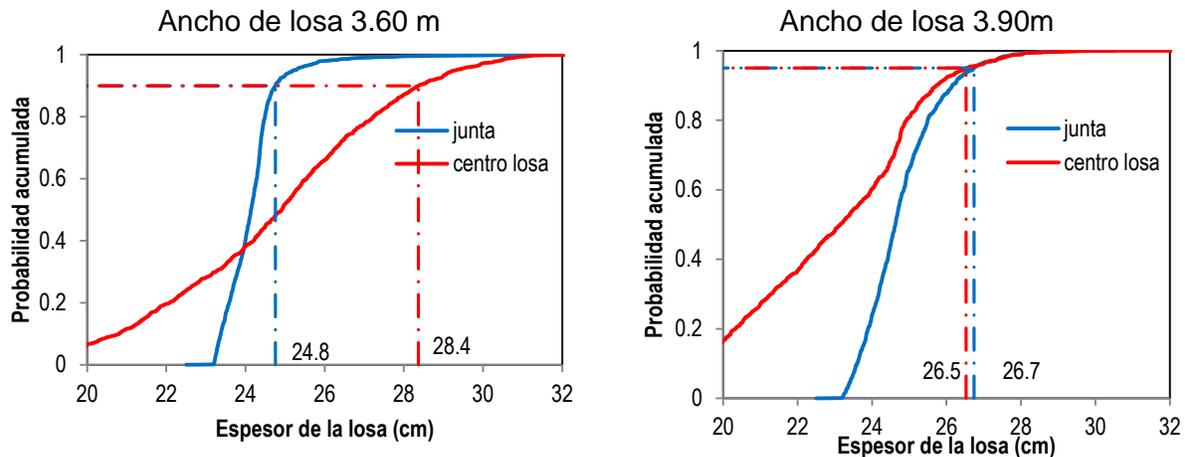


Figura 10. Distribución de probabilidades de falla para la posición de carga de junta y centro de losa

El espesor resultante estará dado por el mayor espesor requerido entre la carga en esquina (formada en la junta) y la carga al medio de la losa. En el siguiente cuadro se presentan los espesores resultantes. Se puede apreciar que el espesor requerido cuando la losa es de 3.60 m de ancho es mayor que cuando la losa se extiende a 3.90 m. Este debido a que como se indicó anteriormente las cargas se alejan del borde de la losa dejando de ser crítica la posición al borde y pasando a ser crítica la posición en las juntas y esquina.

Tabla 5. Espesores resultantes con el método mecanístico-empírico y AASHTO

Sub rasante		sub base		Concreto		Espesor de la losa método AASHTO (cm)		Espesor de la losa método mecanístico (cm)	
CBR	kcompuesto (pci)	espesor	CBR	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	S'c (kg/cm <sup>2</sup> )	Berma asfalto	Losa extendida 30cm	Berma asfalto	Losa extendida 30cm
25.34	385	20	40	350	44	31.5	29	28	27

Se considera como espesor final el obtenido por el método mecanístico con respecto al método AASHTO tanto cuando la berma es de asfalto como cuando se extiende la losa una distancia de 30 cm. Debido a que el método mecanístico considera adecuadamente el efecto de las dimensiones de la losa en la posición de carga, el efecto de gradiente térmico, pero principalmente porque este método analiza las cargas para cada tipo de eje a diferencia del método AASHTO que las agrupa en un parámetro denominado ESAL

## 5 CONCLUSIONES

- Se presenta una metodología para incorporar los esfuerzos combinados de carga y gradiente térmico en el diseño mecanístico de un pavimentos de concreto con juntas.
- Se realizó un prediseño de la losa mediante el método AASHTO 93. Se efectuaron los cálculos para tres probables espesores de losa: 20 cm, 25 cm y 30 cm. De cada una de las posiciones de carga se obtuvo el esfuerzo máximo. Los esfuerzos por carga fueron obtenidas mediante el programa EverFE y el programa Kenslab.

- Luego mediante el Método de Monte Carlo (Ref. 18) empleando el programa @Risk (Ref. 14) se simularon las diferentes posiciones de carga, esfuerzos por carga y temperatura y con la ecuación de deterioro se obtuvo los espesores requeridos a diferentes niveles de confiabilidad.
- En los casos de losa de ancho 3.60 el espesor requerido está gobernado por el daño producido por la carga cuya resultante se ubica en el centro de la losa, mientras que para las losas ensanchadas el espesor está gobernado por el daño producido en la esquina.
- El espesor resultante estará dado por el mayor espesor requerido entre la carga en esquina (formada en la junta) y la carga al medio de la losa. El espesor requerido cuando la losa es de 3.60 m de ancho es mayor que cuando la losa se extiende a 3.90m. Debido a que las cargas se alejan del borde de la losa dejando de ser crítica la posición al borde y pasando a ser crítica la posición en las juntas y esquina.
- El diseño del pavimento rígido fue efectuado mediante dos métodos: AASHTO 93 y mecanístico. Los resultados se muestran en el siguiente cuadro. Se ha considerado como espesor final el obtenido por el método mecanístico por cuanto este si considera el efecto de la geometría de la losa, las ubicaciones críticas de carga, así como el efecto ambiental.

Sub rasante	sub base		Concreto		Espesor de la losa en cm					
					Método AASHTO		Método Mecanístico		Espesor Final	
					Berma asfalto	Losa extendida 30cm	Berma asfalto	Losa extendida 30cm	Berma asfalto	Losa extendida 30cm
CBR	espesor	CBR	f'c (kg/cm2)	S'c (kg/cm2)						
25.34	15	40	350	44	30	28	28	26.5	28	26.5

## 6 REFERENCIAS

- [1] Huang, Y. H. *Pavement Analysis and Design*. Pearson/Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2004.
- [2] Packard, R. G. *Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements*. Portland Cement Association, Skokie, IL, 1984.
- [3] Thompson, M. R., and E. J. Barenberg. *NCHRP Report 1-26: Calibrated Mechanistic Structural Analysis Procedure for Pavements-Phase 2*. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1992.
- [4] Darter, M. I. *Design of a Zero-Maintenance Plain Jointed Concrete Pavement, Volume I- Development of Design Procedures*. FHWA-RD-77-111 Final Rpt., University of Illinois, Urbana-Champaign, Urbana, IL, 1977.
- [5] Wightman, D. C., E. E. Stannard, and J. Dakin. *HDM-4 Software User Guide*. Birmingham University, Birmingham, UK, 2002.
- [6] Westergaard, H. M. New Formulas for Stress in Concrete Pavements of Airfields. *American Society of Civil Engineers Transactions*, Vol. 113, No. 1, 1948, pp. 425-444.
- [7] AASHTO. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1993.
- [8] Timoshenko, S. P., and J. N. Goodier. *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill, New York, NY, 1970.
- [9] Davids, W. G., Z. Wang, G. Turkiyyah, J. P. Mahoney, and D. Bush. Three-Dimensional Finite Element Analysis of Jointed Plain Concrete Pavement with EverFE2. 2. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1853, No. 1, 2003, pp. 92-99.

- [10] ARA Inc., and ERES Consultant Division. *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. Final Report NCHRP Study 1-37A, National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C., 2004.
- [11] Mendoza, A., A. Cadena, O. Richkarday, L. Dominguez, and A. Rico. *Estudio De Pesos Y Dimensiones De Los Vehículos Que Circulan Sobre Las Carreteras Mexicanas*. Documento Técnico N°8, Instituto Mexicano del Transporte, Sandandila, Qro., 1992.
- [12] Sivakumar, B., F. Moses, G. Fu, and M. Ghosn. *Legal Truck Loads and AASHTO Legal Loads for Posting*. NCHRP Report 575, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2007.
- [13] Menéndez, J. R. *Ingeniería De Pavimentos, Tomos 1 Y 2*. Instituto de la Construcción y Gerencia ICG, Lima, Perú, 2013.
- [14] Palisade Corporation. *Guide to using @Risk, Risk Analysis and Simulation Add-in for Microsoft Excel*. Palisade Corporation, Ithaca, NY., 2012.
- [15] Salsilli, R. A. *Calibrated Mechanistic Design Procedure to Prevent Transverse Cracking of Jointed Plain Concrete Pavements*. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, 1991.
- [16] Darter, M. I., and E. J. Barenberg. *Zero-Maintenance Pavement: Results of Field Studies on the Performance Requirements and Capabilities of Conventional Pavement Systems*. FHWA-RD-76-105 Interim Report, University of Illinois, Urbana-Champaign, Urbana, IL, 1976.
- [17] MTC. *Sección De Suelos Y Pavimentos, R.D.N°10-2014-MTC/14*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, Lima, Perú, 2014, Vol. R.D. N°10-2014-MTC/14, pp. 1-302.
- [18] Rubinstein, R. Y., and D. P. Kroese. *Simulation and the Monte Carlo Method*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2011.