

**EFFECTOS DEL PESO POR EJE SOBRE LA INFRAESTRUCTURA DE
HORMIGÓN DE LAS CARRETERAS CHILENAS**

**Víctor Faraggi y Guillermo Ocaso
Departamento de Ingeniería Civil - Universidad de Chile
Casilla 228/3 Santiago - Chile**

Juan Pattillo. Vaticano Nº 3948 Depto Nº 82

RESUMEN

En el presente estudio se analizan los efectos de variaciones discretas en el peso máximo en el eje simple de ruedas duales sobre los pavimentos de hormigón de las carreteras nacionales. Se evalúa la variación de dicho límite entre 10 y 13 (ton), para 7 tramos con diseños propios, en costos de construcción incluyendo los de conservación del pavimento.

La variación del estado del pavimento se se cuantificó utilizando el modelo de deterioro de la AASHTO, considerando como Índice de Servicialidad final el valor de 2.5, cuyo umbral indica una acción de reconstrucción. Los criterios de conservación del pavimento son tradicionalmente utilizados por la Dirección Nacional de Vialidad.

Se define el concepto de hábito de carga mediante el cual se pudo cuantificar la influencia de la variación de los límites antes mencionados en los factores destructivos de los vehículos comerciales. Así finalmente, se pudo obtener los beneficios por costos de infraestructura, para los distintos límites de pesos por eje simple de ruedas duales, considerados y una evaluación de la vida útil del pavimento considerando una tasa de actualización social del 12%.

1. INTRODUCCION

El objetivo del presente estudio es analizar los efectos, sobre los pavimentos de hormigón, de las variaciones en el peso máximo en el eje simple rueda dual, permitido para los camiones circulantes en las carreteras chilenas.

Si aumentamos el peso máximo permitido se tendrá por un lado un aumento de los costos del pavimento rígido, a causa del aumento en magnitud de las sollicitaciones dinámicas. Es decir, aumentarán los costos de conservación y también deberán aumentar los espesores de losa, con lo cual aumentarán los costos de construcción. Por otro lado, también disminuirá la vida útil de las losas lo que generará un aumento de los costos del pavimento.

En cambio, para los costos de operación de los camiones ocurre lo contrario. Un aumento del peso máximo produce una disminución de los costos de operación.

Así se tendrá que para el costo global del transporte, una componente de él, el costo de pavimento, aumenta con el aumento del peso máximo, mientras que la otra componente, los costos de operación, disminuye ante los mismos aumentos.

La idea del estudio global, es encontrar el peso máximo óptimo que será aquél que haga mínimo el costo global del transporte.

El objetivo del presente estudio es una parte del estudio global, pues sólo se estudiarán las variaciones de una componente del costo global del transporte: la variación en el costo del diseño del pavimento.

2.- METODOLOGIA DEL ESTUDIO

El método que se aplica para el estudio es, en síntesis, una simulación del sistema de transporte carretero, al que se le imponen variaciones discretas del peso máximo en el eje simple. Se simulan variaciones de 1 (ton), para un peso máximo que varía entre 10 y 13 (ton).

En la página subsiguiente se presenta la Figura 1 donde se muestra la metodología del estudio.

Por hábito de carga entenderemos al conjunto de características de la flota nacional que influyen sobre los principales costos involucrados. Entre estas características estarán las estratigrafías actuales de peso bruto total (PBT), el reparto del PBT en los ejes, los límites efectivos de peso por eje y las proyecciones de los niveles de tráfico al horizonte de estudio.

Los factores destructivos de los vehículos cuantifican la capacidad destructiva de un tipo de camión dado, con una cierta estratigrafía de pesos por eje obtenido de los censos de pasaje.

En todo el presente estudio se trabajará con el modelo de la American Association of State Highway Officials (Ref. 1) (AASHTO, 1986). Con él se cuenta con un modelo de deterioro y simultáneamente de diseño. Además dicho modelo AASHTO permitirá definir los factores destructivos de los camiones.

La estimación de la variación de los factores destructivos de los vehículos componentes de la flota solicitante, permitirá determinar la variación de la vida útil de las losas y también la variación de los espesores necesarios para pavimento nuevo.

El estudio de estos últimos dos parámetros permitirá evaluar los efectos buscados.

A continuación se entrega una síntesis del estudio en sus diferentes etapas.

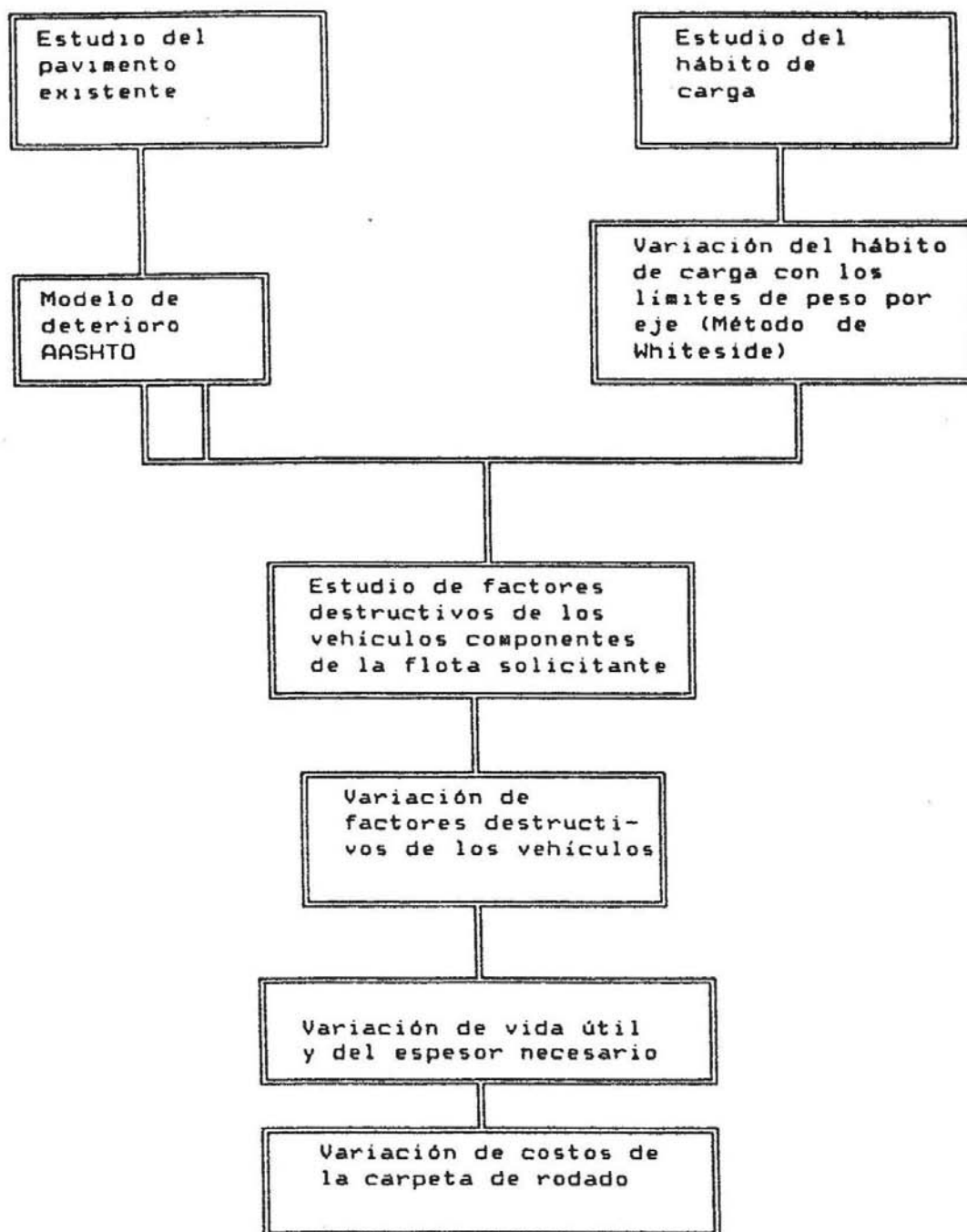


FIGURA Nº 1
Metodología de Análisis del Estudio

3. ESTUDIO DE LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE

Para el estudio, se dividió al país en diversos tramos, denominados corredores de transporte. Estos corredores de transporte quedaron definidos por zonas geográficas en las que existe homogeneidad respecto del TMDA y respecto de la carga transportada.

En esta etapa del estudio, el objetivo fue encontrar un pavimento representativo para cada corredor.

La determinación del pavimento representativo se realizó mediante el estudio de los proyectos de pavimentación más recientes contratados por la Dirección Nacional de Vialidad. Se estudiaron proyectos ejecutados entre los años 1984 y 1988 (Ref. 2).

El deterioro de un pavimento de hormigón es dependiente del espesor de la losa, de manera que este parámetro es el más relevante para el estudio.

En la Tabla 1 se muestra los diferentes pavimentos representativos encontrados para cada corredor de transporte

TABLA Nº 1
Pavimentos Representativos de los Corredores
de Transporte con Pavimentos Rígidos

Corredor	Espesor pav. represent. (cm)	EE de diseño
Santiago - Las Chilcas	24	68.610.000
Santiago - Valparaíso	24	18.255.000
Rancagua - Curicó	22	61.796.000
Curicó - Linares	22	14.994.000
Cabrero - Concepción	20	32.003.000
Linares - Los Angeles	22	14.994.000
Los Angeles - Osorno	22	14.994.000

4. ESTUDIO DEL HABITO DE CARGA

Como se explicó anteriormente, se entiende por hábito de carga al conjunto de características que influyen sobre los principales costos involucrados.

Las características estudiadas son: las estratigrafías de peso bruto total (PBT), los límites efectivos de peso por eje, la repartición del PBT en los ejes y la proyección del tráfico al horizonte de estudio. Todas estas características requieren ser estudiadas para determinar su posible variación ante distintos pesos máximos en el eje simple.

4.1 Fuentes de Información

Todas las características anteriores fueron estudiadas a partir de la información obtenida de los diversos pesajes realizados por la Dirección Nacional de Vialidad desde 1985 en adelante. En total, para los corredores con pavimento de hormigón, el número de camiones y buses pesados ascendió a alrededor de 20.000 vehículos.






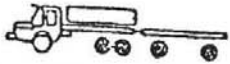
4.2 Tipos de Camiones a los que se Varía el Peso Máximo para el Estudio

Se realizó un estudio de participación de los diversos tipos de camiones en la flota nacional y de acuerdo a él se determinó que camiones estudiar. El criterio utilizado para determinar que camiones estudiar es el de considerar los camiones de mayor presencia relativa, cuyo porcentaje quede dentro del 95% de todos los camiones del parque nacional y cuyo PBT no exceda los límites legales actuales.

De acuerdo al criterio anterior, se determinó que los camiones relevantes son los que se muestran en la Tabla 2; en esta se entrega también el código de dichos camiones utilizado por la Dirección Nacional de Vialidad.

TABLA Nº 2

Tipos de Camiones a los que se Variará las
Características de Carga

código	perfil
200	
300	
410	
570	
400	
520/523	

4.3 Estudio de los Límites Efectivos de Peso por Eje

Se define como límite efectivo de peso por eje, a aquél sobre el cual sea encontrado sólo el 5% de los ejes de una configuración determinada. En otras palabras, el límite efectivo es el peso por eje igual o superior al 95% de los pesos por eje de esa configuración.

La Tabla 3 muestra los límites efectivos encontrados para las configuraciones simple, tandem y tridem.

TABLA Nº 3
Límites Efectivos en los Corredores de
Pavimento Rígido

Corredor	Límites Efectivos (ton)		
	simple	tándem	tridem
Las Chilcas - Santiago	11,77	18,44	23,93
Santiago - Valparaíso	11,17	18,53	24,64
Rancagua - Curicó	11,42	18,55	24,61
Curicó - Linares	12,47	18,56	24,17
Cabrero - Concepción	11,73	18,28	24,92
Linares - Los Angeles	12,22	18,48	24,53
Los Angeles - Osorno	11,58	17,74	24,54

4.4 Estudio de la Repartición del PBT en los Ejes

Los estudios de deterioro de pavimentos de hormigón se hacen referidos a las cargas axiales, de manera que es importante determinar la forma en que se distribuye el peso bruto total en los distintos ejes.

Además, en el presente estudio se aplicó un método, desarrollado por Whiteside (1973) (Ref. 3), que determina la variación de la estratigrafía de PBT ante cambios en el peso por eje. Se requiere entonces relacionar los cambios en la estratigrafía de PBT con cambios en la estratigrafía de pesos por eje. Para ello se determinaron ecuaciones lineales que relacionan el peso en los diferentes ejes con el peso de un eje tomado como eje de referencia. Este eje de referencia es el segundo eje, contando como primer eje al eje delantero. También se determinaron ecuaciones lineales que relacionan el peso en el eje de referencia con el PBT.

Estas ecuaciones son de la forma:

a) $P_1 = A^1 + B_1 \cdot P_2$

b) $PBT = A + B \cdot P_2$

-273-

Donde P_i es la carga axial en el eje i y las A_i y B_i son constantes lineales de regresión.

En la Tabla 4 se muestran las ecuaciones de regresión determinadas para las estaciones Curacaví y Concepción.

TABLA Nº 4
Ecuaciones de Regresión Características

Estación	Camión	Ecuación
Curacaví	510	$PBT = 4,012 + 3,346 * P_e$ $(r^2 = 0,8855)$ $P_3 = 0,085 + 0,813 * P_e$ $(r^2 = 0,7410)$ $P_4 = 0,025 + 1,314 * P_e$ $(r^2 = 0,7077)$
	410	$PBT = 3,01 + 2,619 * P_e$ $(r^2 = 0,9046)$ $P_3 = 0,2764 + 1,493 * P_e$ $(r^2 = 0,7402)$
	200	$PBT = 1,217 + 1,4179 * P_e$ $(r^2 = 0,8974)$ $P_1 = 1,217 + 0,4179 * P_e$ $(r^2 = 0,4319)$
Concepción	200	$PBT = 1,1755 + 1,2266 * P_e$ $(r^2 = 0,4525)$ $P_1 = 1,873 + 0,317 * P_e$ $(r^2 = 0,4254)$
	300	$PBT = 5,177 + 1,254 * P_e$ $(r^2 = 0,1537)$ $P_1 = 2,616 + 0,169 * P_e$ $(r^2 = 0,1685)$ $P_3 = 0,866 + 1,068 * P_e$ $(r^2 = 0,8181)$
	400	$PBT = 1,376 + 2,509 * P_e$ $(r^2 = 0,2764)$ $P_1 = 2,772 + 0,284$ $(r^2 = 0,5505)$ $P_3 = 1,824 + 1,063 * P_e$ $(r^2 = 0,8072)$ $P_4 = 1,894 + 1,074 * P_e$ $(r^2 = 0,8107)$

4.5 Proyecciones del Tránsito:

Para las proyecciones del TMDA, se contó con la información de los censos de la Dirección Nacional de Vialidad realizados entre los años 1976 y 1986.

La forma de proyectar el TMDA fue mediante correlaciones con los datos de los PGB regionales.

5. VARIACION DEL HABITO DE CARGA CON LOS DIFERENTES LIMITES DE PESO POR EJE

(Aplicación del Método Whiteside)

Un aumento de los límites legales de peso por eje, acarrea un desplazamiento de la distribución del PBT en el sentido de las mayores cargas.

El procedimiento mediante el cual se desplazarán las distribuciones de PBT, fue desarrollado por Whiteside et al (1973). El permite obtener una nueva distribución de PBT a partir de una original, correspondiente a un nuevo límite efectivo de peso por eje.

5.1 Hipótesis del Método Whiteside

1.- El menor PBT detectado representa el menor peso vacío (tara). Ese valor de PBT no se altera ante un eventual cambio en los límites efectivos de peso por eje.

2.- Los vehículos que hoy transitan con un PBT correspondiente al límite efectivo de peso por eje, tenderán a usar el nuevo límite efectivo, elevando así su PBT y manteniendo la misma participación relativa acumulada de tráfico.

3.- En el intervalo comprendido entre el primer PBT detectado y el límite superior del intervalo que contiene PBT efectivo actual, el desplazamiento de la distribución es hecha linealmente.

4.- Después del intervalo que contiene el límite efectivo, el desplazamiento es obtenido utilizando un factor constante.

5.2 Algoritmo del Método Whiteside

Este método fue aplicado, implementándose en una planilla Lotus 1-2-3 para su resolución. La secuencia en la aplicación del método es la siguiente:

1.- Se calcula el PBT correspondiente al límite efectivo de peso por eje, para cada clase de vehículo. Este valor será obtenido utilizando la ecuación $PBT=f(P_e)$ de la clase de vehículo en estudio.

2.- Se calcula el peso bruto total PBT* referente al valor del nuevo límite en estudio, utilizando la misma ecuación anterior.

3.- Se calcula la razón $k = PBT^*/PBT$

4.- Se divide $(k-1)$ por el número de intervalos existentes entre el menor valor de PBT registrado y el límite superior del intervalo que contiene al PBT efectivo actual. A este coeficiente le denominamos m .

5.- Se multiplica el límite superior de cada intervalo de orden i por $(1+m*i)$ hasta que sea alcanzado el límite superior del intervalo que contiene el PBT efectivo actual. A partir de dicho punto se mantiene el multiplicador constante.

6.- Se obtiene por interpolación, los nuevos valores de porcentaje acumulado correspondiente a los límites superiores de los intervalos de peso de la distribución original de PBT.

En las Figuras 2 y 3, se muestra el aspecto de las estratigrafías de PBT variadas con el método descrito.

6. ESTUDIO DE LOS FACTORES DESTRUCTIVOS ACTUALES DE LOS CAMIONES CIRCULANTES

6.1 El Factor Destructivo de un Camión

Se define el factor destructivo de un camión, como la suma de los ejes equivalentes de cada uno de sus ejes, definidos según la AASHTO.

Para determinar el número de ejes equivalentes correspondientes a un eje se utilizan los factores de equivalencia AASHTO de acuerdo a la versión definitiva del Método AASHTO, 1986 (Ref. 1).

Para el presente estudio, determinamos el factor destructivo medio de un tipo de camión, para la estratigrafía actual y para las estratigrafías variadas para los diferentes límites del estudio.

El factor destructivo medio de un eje k viene dado por:

$$EE_k = \sum_i f_i * E_i$$

donde:

El subíndice i representa a un intervalo de carga.

E_i representa el factor de equivalencia de la carga axial i .

f_i representa la frecuencia relativa observada de ejes dentro del intervalo de carga i .

Con ello el factor destructivo de un camión está dado por la suma de los factores destructivos medios de cada uno de sus ejes.

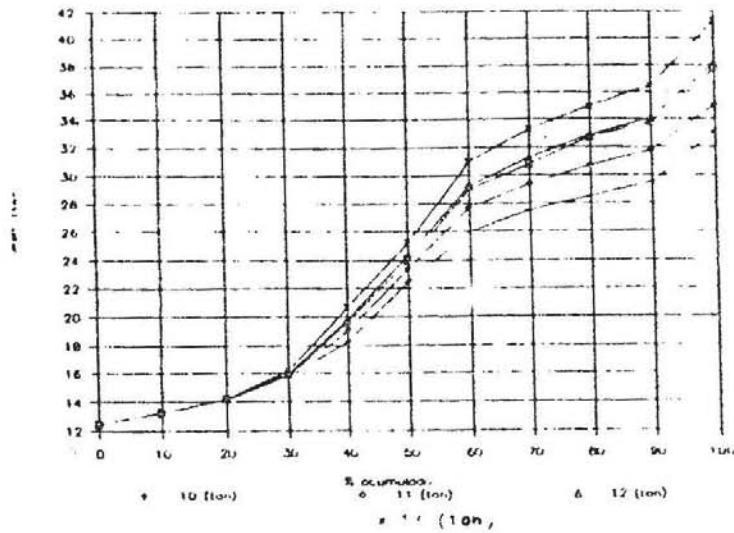


FIGURA Nº 2
Variación de Estratigrafía de PBT
Estación S.F. Mostazal Camión 410

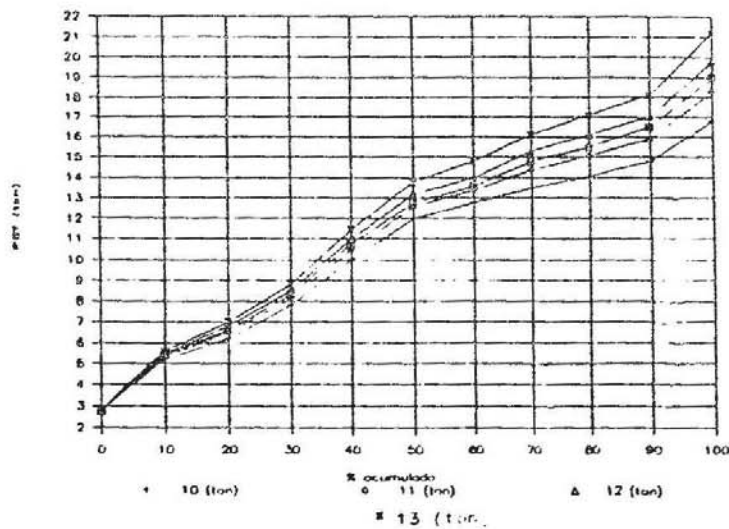


FIGURA Nº 3
Variación de Estratigrafía de PBT
Estación S.F. Mostazal Camión 200

6.2 Los Factores Destructivos Actuales:

Mediante los datos obtenidos de las estaciones de pesaje, que contenían también datos de peso por ejes, es posible calcular los factores destructivos actuales. En la Tabla 5 se muestran los factores destructivos calculados para los tipos de camiones más importantes.

TABLA Nº 5
Factores Destructivos Actuales de los Tipos de
Camiones de Mayor Presencia

Tipo de camión	Estación			
	Lampa	Curacavi	Concepción	Gorbea
200	2,10	1,87	2,66	1,88
310	2,09	1,90	2,46	3,37
454	2,54	1,66	2,33	2,96
300	4,70	2,36	2,40	4,76
400	9,21	5,17	7,26	7,74
520	8,77	6,54	6,86	8,51
410	4,58	3,19	3,44	4,94
530	3,62	3,03	3,73	3,70
570	6,89	4,86	6,17	4,76
690	4,16	4,16	4,80	6,21
buses	2,22	2,22	2,65	1,52

7. VARIACION DE LOS FACTORES DESTRUCTIVOS CON LOS DIFERENTES LIMITES EN ESTUDIO

Mediante las ecuaciones de regresión que relacionan el PBT con las cargas en los ejes, se pueden convertir las estratigrafías de cargas axiales variadas. Con estas estratigrafías de cargas axiales variadas para los diferentes límites en estudio se obtuvo la variación de los factores destructivos de los diferentes tipos de camiones.

Este cálculo también se implementó mediante la planilla de Lotus 1-2-3.

En las Figuras 4, 5 y 6 se muestra la variación de los factores destructivos de los tipos de camiones más importantes.

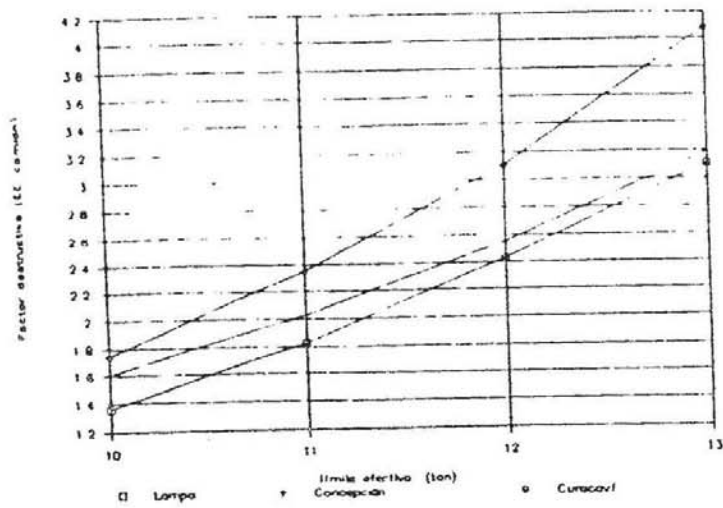


FIGURA Nº 4
Variación del Factor Destructivo
Camión 410

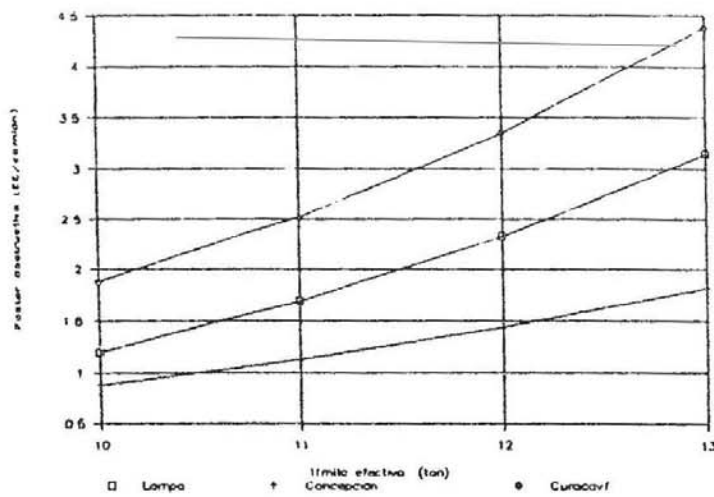


FIGURA Nº 5
Variación del Factor Destructivo
Camión 300

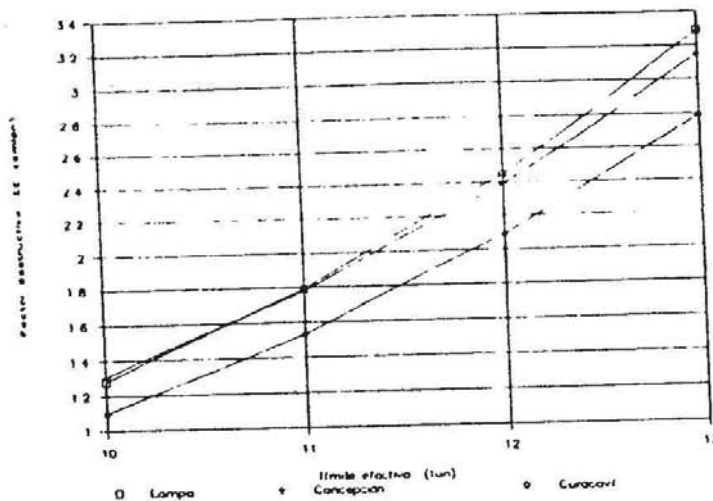


FIGURA Nº 6
Variación del Factor Destructivo
Camión 200

8. VARIACION DEL DETERIORO DE LOS PAVIMENTOS CON LOS DIFERENTES LÍMITES DE PESO EN EL EJE SIMPLE

Como se vio en el punto anterior, un cambio en los pesos máximos en los ejes, provoca variaciones en los factores destructivos medios de los camiones, o lo que es lo mismo, variaciones en la cantidad de ejes equivalentes por camión que solicitan el pavimento. Con ello se produce una variación en la cantidad de ejes equivalentes que solicitan al pavimento por unidad de tiempo. En la Tablas 6, 7 y 8 se puede observar la variación observada de la cantidad total de ejes equivalentes año a año, para los corredores Santiago - Las Chilcas, Santiago - Valparaíso y Cabrero - Concepción.

TABLA Nº 6

Ejes Equivalentes Circulantes para los Distintos Límites en Estudio
Corredor Cabrero - Concepción

	1987	1990	1993	1996	1999	2002	2005	2006
actuales	1.570.770	6.800.915	12.642.262	10.830.487	25.465.302	32.262.503	39.277.440	41.650.061
10 (Ton)	1.150.777	4.978.151	9.253.809	13.625.55	18.634.677	23.606.213	28.735.357	30.476.593
11 (Ton)	1.253.431	5.449.342	10.129.809	15.135.378	20.401.186	25.845.048	31.462.007	33.368.756
12 (Ton)	1.406.907	6.089.383	11.320.006	16.914.770	22.801.021	28.886.418	35.166.087	37.297.560
13 (Ton)	1.559.152	6.748.956	12.546.060	18.748.366	25.274.071	32.020.963	38.983.633	41.347.925

TABLA Nº 7

Ejes Equivalentes Circulantes para los Distintos Límites en Estudio
Corredor Santiago - Las Chilcas

	1987	1990	1993	1996	1999	2002	2005	2006
actuales	7.109.434	13.010.502	19.607.902	26.930.319	35.319.301	44.771.509	55.315.265	59.126.751
10 (Ton)	5.010.500	9.123.004	13.734.590	18.632.917	24.346.679	30.709.719	37.021.007	40.374.797
11 (Ton)	5.676.764	10.339.261	15.565.368	21.150.407	27.640.941	34.903.308	43.017.607	45.933.192
12 (Ton)	6.609.290	12.040.117	18.149.543	24.734.176	32.344.327	40.867.096	50.421.146	53.057.714
13 (Ton)	7.637.136	13.916.574	20.954.910	28.594.077	37.391.458	47.254.966	58.323.073	62.307.270

TABLA Nº 8

Ejes Equivalentes Circulantes para los Distintos Límites en Estudio
Corredor Santiago - Valparaíso

	1987	1990	1993	1996	1999	2002	2005	2006
actuales	1.443.657	4.179.569	7.369.012	10.777.010	14.370.071	18.567.050	22.541.993	23.904.490
10 (Ton)	1.046.032	2.972.000	5.185.252	7.535.916	10.010.497	12.023.375	15.552.951	16.400.125
11 (Ton)	1.256.516	3.509.479	6.200.407	9.143.599	12.150.930	15.617.970	19.946.060	20.006.362
12 (Ton)	1.539.101	4.420.374	7.758.223	11.315.266	15.063.110	19.393.943	23.533.003	24.951.309
13 (Ton)	1.822.701	5.234.971	9.187.515	13.399.599	17.836.656	23.017.123	27.916.590	29.595.189

9. EFECTOS DE LAS VARIACIONES DEL LIMITE DE PESO EN EL EJE SIMPLE SOBRE LA VIDA ÚTIL DE LOS PAVIMENTOS EN ESTUDIO

Los pavimentos se diseñan para una vida útil prefijada (10- 20 años) y deberán soportar los ejes equivalentes a este periodo, generados por la flota solicitante incluyendo su crecimiento estimado. Con la variación de la cantidad de ejes equivalentes que solicitan al pavimento, al variar su peso por eje variará el periodo en el cual se alcanza el número de ejes equivalentes de diseño, es decir, variará la vida útil del pavimento. En la Tabla 9 se muestra la variación de la vida útil de los pavimentos representativos para los diferentes límites de peso en estudio.

TABLA Nº 9

Variación de la Vida Útil para los distintos Límites en Estudio

Corredor	Vida útil (años)					lím. efect. actual (ton)
	Limite en estudio (ton)					
	actual	10	11	12	13	
Las Chilcas- - Santiago	25	33	31	27	25	11,77
Santiago- - Valparaíso	17	23	19	16	14	11,17
Rancagua- - Curicó	27	34	32	29	26	11,42
Curicó- - Linares	8	11	10	8	7	12,47
Cabrero- - Concepción	16	21	20	18	16	11,37
Linares- - Los Angeles	9	13	11	9	8	12,22
Los Angeles- - Osorno	21	27	28	24	20	11,58

De la tabla anterior se pueden obtener las variaciones de la vida útil con respecto a la vida útil que se alcanzarían en las condiciones actuales. Estas variaciones se muestran en la siguiente 10.

TABLA Nº 10
Variación de la Vida Útil con respecto a la Vida Útil
de Condiciones Actuales

Corredor	Variación (años)			
	10	11	12	13
Santiago - Las Chilcas	+8	+6	+1	-1
Santiago - Valparaíso	+6	+2	-1	-3
Rancagua - Curicó	+7	+5	+2	-1
Curicó - Linares	+3	+2	0	-1
Cabrero - Concepción	+5	+4	+2	0
Linares - Los Angeles	+4	+2	0	-1
Los Angeles - Osorno	+6	+5	+3	-1

signo + = aumento de vida útil - signo - = disminución de vida útil

De la tabla anterior, se pueden obtener las variaciones medias de vida útil para los diferentes corredores con pavimento de hormigón predominante. Estas variaciones medias se muestran en la Tabla 11.

TABLA Nº 11
Variaciones Medias de Vida Útil para el Pavimento
de Hormigón

Límite en estudio (ton)	Variación de vida útil (años)	Aumento o disminución
10	6	aumento
11	4	aumento
12	0	no varía
13	1	disminución

10. ANALISIS DE LA VARIACION DE ESPESORES DE LOSA NECESARIOS PARA PAVIMENTO NUEVO

La variación de las solicitaciones de ejes equivalentes para los diferentes límites en estudio, determinará también la variación de los espesores de losa necesarios para reponer a futuro los pavimentos deteriorados. Así el aumento de solicitaciones de ejes equivalentes hará necesarias losas de mayor espesor.

10.1 Cálculo de los Espesores de Losa necesarios para Pavimentos Nuevos

Para el cálculo de los espesores se utilizó un módulo de reacción de la subrasante constante k de 18 (Kg/cm^3) y una resistencia de diseño a la flexotracción de 40 (Kg/cm^2).

Para determinar el número de ejes equivalentes de diseño se utilizan las tablas anteriores de variación de los ejes equivalentes circulantes para los diferentes límite en estudio.

Se tomó una vida útil esperada de 20 años, para ello se utilizó el número de ejes equivalentes acumulados del año 1986 al año 2006.

los espesores encontrados se muestran en la Tabla 12.

TABLA Nº 12

Variación de los Espesores de Losa Necesarios para Pavimento con Distintos Pesos por Eje

Corredor	espesor de condiciones actuales (cm)	espesor (cm)			
		límite en estudio (ton)			
		10	11	12	13
Las Chilcas - Santiago	27	25	26	26	27
Santiago - Valparaíso	23	22	23	24	24
Rancagua - Curicó	25	24	25	25	26
Curicó - Linares	26	25	25	26	26
Cabrero - Concepción	26	25	25	25	26
Linares - Los Angeles	26	24	25	26	26
Los Angeles - Osorno	21	20	20	21	22

De acuerdo a la tabla anterior, se obtuvieron las variaciones en el espesor de losa con respecto al espesor necesario para las condiciones actuales presentadas en la Tabla 13.

TABLA Nº 13

Variación de los Espesores de Losa con respecto al Espesor de Losa de las Condiciones Actuales

Corredor	variaciones (cm)			
	límite en estudio (ton)			
	10	11	12	13
Las Chilcas - Santiago	-2	-1	-1	0
Santiago - Valparaíso	-1	0	+1	+1
Rancagua - Curicó	-1	0	0	+1
Curicó - Linares	-1	-1	0	0
Cabrero - Concepción	-1	-1	-1	0
Linares - Los Angeles	-2	-1	0	0
Los Angeles - Osorno	-1	-1	0	+1

De acuerdo a la tabla anterior, se pudo encontrar las variaciones medias del espesor de la losa, cualquiera sea el espesor de losa necesario para las condiciones actuales. Estas variaciones medias se entregan en la Tabla 14.

TABLA Nº 14

Variaciones medias del Espesor de Losa con respecto al Espesor de Losa necesario para las Condiciones Actuales

Límite en estudio (ton)	Variación media (cm)	aumento o disminución
10	1	disminución
11	1	disminución
12	0	no varía
13	1	aumento

11. ESTUDIO DE LOS COSTOS DE INFRAESTRUCTURA

En el estudio se realizó un análisis somero de los costos del pavimento. Los costos encontrados para diferentes espesores, de losa de hormigón, para la subbase tratada con cemento y para la subbase granular se muestran en las Tablas 15, 16 y 17, valores a Marzo de 1989.

TABLA Nº 15

Costos de Construcción de Losas de Hormigón

Espesor (cm)	Costo (\$/m ²)
20	2757,3
22	2930,6
23	3033,2
24	3135,8

TABLA Nº 16

Costos de Construcción de Subbase Granular Tratada con Cemento

Espesor (cm)	Costo (\$/m ²)
12	952
15	1190
30	2380

TABLA Nº 17

Costos de Construcción de Subbase Granular

Espesor (cm)	Costo (\$/m ²)
15	208
30	416

Para la evaluación de la variación de los costos que se realizará a continuación, se empleó una estructura compuesta por una subbase granular tratada con cemento de 15 (cm) y una subbase granular también de 15 (cm).

Para dicha estructura los costos en función del espesor de la losa son los que se entregan a continuación.

TABLA Nº 18

Costos la Estructura en función del espesor de la Losas

Espesor (cm)	Costo (\$/m ²)
20	4155,3
22	4328,6
23	4431,2
24	4533,8

Por otro lado también se utilizó un costo de conservación constante para los diferentes límites en estudio, que según los proyectos estudiados fue de 1196 (\$/m²) para los 20 años de vida útil.

12. VARIACION DE LOS COSTOS DE INFRAESTRUCTURA CON LOS DISTINTOS LÍMITES EN ESTUDIO

Para estudiar la variación de los costos del pavimento en función de los distintos límites en estudio, se supuso las variaciones de espesores en relación a una estructura base de 22 (cm) de espesor de losa.

De acuerdo a ello, el espesor que dicha losa tendrá para los distintos límites en estudio, que viene dado por el espesor supuesto más la variación media del límite respectivo, se presentan en la Tabla 19.

TABLA Nº 19

Variaciones del Espesor de la Losa

límite en estudio	espesor de losa
10 (ton).....	21 (cm)
11 (ton).....	21 (cm)
12 (ton).....	22 (cm)
13 (ton).....	23 (cm)

Para estos espesores, las variaciones de los costos de infraestructura, de acuerdo al estudio de costos antes citado, son las siguientes:

TABLA Nº 20
Variación del Costo de Infraestructura con los Diferentes Límites de Peso en el Eje Simple

límite en estudio (ton)	espesor de losa (cm)	costo de infraestructura (\$/m ²)
10	21	5400,2
11	21	5400,2
12	22	5524,6
13	23	5627,2

Con la variación de los costos presentada en la tabla anterior, se estimaron los beneficios de variar las condiciones actuales a cualquiera de los límites en estudio. Los beneficios, que se entregan en la Tabla 21, se dan en (\$/Km) suponiendo una calzada de 3,5 (m) de ancho por pista. También se presentan los beneficios porcentuales suponiendo un costo actual de 5524,6 (\$/m²) = 38.672.200 (\$/Km).

TABLA Nº 21
Beneficios por Costos de Infraestructura para los diferentes Límites de Peso en el Eje Simple

límite en estudio (ton)	beneficio (\$/Km)	beneficio porcentual
10	+ 870800	+ 2,3 %
11	+ 870800	+ 2,3 %
12	0	0
13	- 718200	- 1,9 %

13. EVALUACION DE LA VARIACION DE LA VIDA ÚTIL CONSIDERANDO UNA TASA DE ACTUALIZACION SOCIAL DE 12 %

Para considerar las variaciones de la vida útil, se supuso que el costo del pavimento estudiado en el punto anterior es devengado en diversos años. Se supondrá que si un pavimento tiene "n" años de vida útil, entonces el costo se devengará en el año "n". El costo económico se descuenta a su valor presente con la tasa de actualización social.

El costo económico de construir un pavimento el año "n" viene dado por:

$$\text{costo actualizado} = \frac{\text{costo}}{(1 + r)^n}$$

donde r = tasa de actualización social.
 n = años de vida útil.

Se consideró que la losa en estudio tiene una vida útil, en las condiciones actuales, de 23 años. Se supuso que dicha vida útil cambia con las variaciones medias encontradas en el punto anterior.

De acuerdo a ello, la vida útil para los diversos límites en estudio será:

límite en estudio (ton)	vida útil (años)
10 (ton).....	29
11 (ton).....	27
12 (ton).....	23
13 (ton).....	22

14. VARIACION DE LOS COSTOS DEBIDO A LOS CAMBIOS EN EL ESPESOR DE PAVIMENTO NUEVO Y A LOS CAMBIOS DE VIDA ÚTIL PARA UNA TASA DE ACTUALIZACION DE 12 %

Para la estructura considerada en la evaluación, los costos de infraestructura varían según muestra la Tabla 22:

TABLA Nº 22

Variación del Costo Económico de Infraestructura de un Pavimento Representativo para los Diferentes Límites en Estudio

límite en estudio (ton)	espesor de losa (cm)	vida útil (años)	costo de infraestr. (\$/m ²)	costo económico actualiz. (\$/m ²)
10	21	29	5400,2	201,9
11	21	27	5400,2	253,2
12	22	23	5524,6	407,6
13	22	22	5627,2	465,0

Según la tabla anterior, los beneficios económicos en (\$/Km) y porcentuales respecto de los costos de las condiciones actuales, son los que muestra la Tabla 23.

El costo de las condiciones actuales es de 407 (\$/m²) = 2.853.200 (\$/Km) (costo actualizado con tasa de 12 %).

TABLA Nº 23

Beneficios Económicos por Costos de Infraestructura para los Diferentes Límites de Peso en el Eje Simple para los Pavimentos de Hormigón

límite en estudio (ton)	beneficios (\$/Km)	beneficios porcentuales
10	1439900	+ 50,5 %
11	1080800	+ 37,9 %
12	0	0
13	-404800	- 14,1 %

15. CONCLUSIONES:

Del análisis realizado se puede concluir que:

- Las condiciones actuales de tránsito presentan en promedio cargas por eje más altas que las legales, especialmente en los ejes simples, observándose valores cercanos a las 12 ton.
- La vida útil de los pavimentos aumenta, para límites inferiores a los actuales, hasta en 6 años, y disminuye en 1 año para un límite de 13 Ton.
- Los espesores de losa aumentan en 1 cm, para un límite superior al actual, y disminuyen en el mismo espesor para límites inferiores.
- Los costos de infraestructura disminuyen hasta en un 2%, para límites inferiores a los actuales, y aumentan en la misma proporción para un límite de 13 Ton.
- Evaluando también el efecto de la variación de la vida útil, se concluye que se generan beneficios de hasta un 50%, para límites inferiores a los actuales, y costos adicionales de un 14% para un límite de 13 Ton.

16. REFERENCIAS

- (1) A.A.S.H.T.O. "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures", 1986.
- (2) Proyectos de Rehabilitación de Carreteras Chilenas, Contratadas por la Dirección Nacional de Vialidad entre los años 1984 y 1988.
- (3) Whiteside, R.E., Chu, T. Y., Casby, J.C., Whitaker, R.L., y Winfrey, R. "Changes in Legal Vehicle Weights and Dimensions - Some Economic Effects on High Ways" Highway Research Board, NCHRP 141, Washington, 1973.