

Diseño estructural del pavimento

Juan Palillo B.

Ingeniero Civil, Universidad de Chile. Vaticano 48417. Las Condes, Santiago, Chile.

RESUMEN: Se presenta un análisis reflexivo sobre la situación actual del diseño estructural de pavimentos en nuestro país y se presentan recomendaciones y conclusiones que, a juicio del autor, es necesario considerar para el mejoramiento de la realidad nacional en este campo.

I.ACOTANDO EL PROBLEMA

Dentro del amplio espectro en que son estudiados los problemas de Ingeniería, el que corresponde al diseño estructural de pavimentos es el que da una resolución menos confiable, entregando resultados poco satisfactorios tanto en los aspectos del desarrollo teórico como en los prácticos, obtenidos al aplicar los conceptos que actualmente son utilizados en nuestro país para este tipo de diseño. Es así como diseños efectuados para 20 años de vida útil, una vez construidos tienen una duración estructural, con mucha suerte, de no más allá de 10 años.

De esta manera, una inversión que podía estimarse durante su estudio como un proyecto rentable, en la realidad, no lo es. De lo indicado se encuentran hoy día numerosos ejemplos; lo que nos conduce a una situación de la cual no podemos dejar de investigar a qué se debe esta extrema pobreza técnica que está influyendo directamente a nuestro desarrollo como país. Este atraso es afectado, por una parte, en el gasto directo que representa la inversión de construir pavimentos de alto costo y bajo estándar técnico y por otra parte, la limitación que tiene el usuario al no disponer de un pavimento con un índice de servicio aceptable durante el tiempo de vida útil estimada para la inversión efectuada.

Como una primera reflexión, nos damos cuenta, que un problema de la magnitud e importancia, como es la carencia de conocimientos de ingeniería en el diseño de pavimento, es un problema necesariamente muy complejo.

Sabemos que un pavimento se diseña con dos parámetros solicitantes que son el clima y tránsito y otro resistente que es el suelo de fundación. Para un lugar determinado, el clima es un dato que es parte de nuestro problema y de alguna manera podemos acotarlo dentro de los límites fijados para la vida útil de proyecto de un diseño. Así también podemos decir del suelo de fundación, con una aproximación aceptable, es un dato posible de manejar. Los dos parámetros mencionados, no sufren con el tiempo variaciones que sean relevantes a un diseño de pavimento debido a su corta duración.

Nos está quedando finalmente el estudio del parámetro tránsito, que es a la postre, el culpable de todos los problemas que estamos tratando de analizar. En primer lugar, los vehículos que transitan por la carretera, corresponden en su desarrollo tecnológico a otra área de la Ingeniería como es la Ingeniería Mecánica, que tiene un ritmo de desarrollo impresionante siempre en aumento; de manera que este parámetro está variando constantemente, lo que hace difícil que un diseño efectuado con nuestra tecnología actual pueda ser eficiente. Esto nos lleva a limitar por normas legales y punitivas las condicionantes que son aceptadas para la confección de vehículos que transitan por la carretera, evitando con ello que el pavimento sea destruido en poco tiempo.

El segundo punto que debemos considerar en el parámetro tránsito, es que éste, es controlado en forma aleatoria por la voluntad del hombre, tanto en su presencia como en sus cargas. Por último tenemos el problema más difícil de solucionar, como son distintas combinaciones de clima, tránsito y tipo de suelo en el tiempo, para un proyecto determinado. Esto nos lleva a considerar la verdadera magnitud del problema.

Aún sin desconocer la importancia y complejidad de los datos involucrados en el diseño de un pavimento, se nos hace difícil a los ingenieros proyectistas de caminos pensar que este problema, de tanta relevancia en el desarrollo de un país, no ha sido abordado por otro nivel de investigadores, como ocurre en todas las otras áreas de la Ingeniería. Graneando lo anterior, resulta curioso que hace ya cerca de 20 años, el hombre anduvo en un vehículo en la Luna y hoy día nosotros no podemos asegurarle al usuario que un diseño de un pavimento pueda ser utilizado por él en condiciones de buen servicio por un lapso de tiempo relativamente corto.

Planteada así la problemática del diseño estructural creo de toda conveniencia abordar en una aproximación general los siguientes puntos:

- Evolución histórica de los caminos.
- "Estado del Arte" del diseño estructural.
- Conclusiones.

II. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS CAMINOS

La evolución de las carreteras puede ser enfocada de distintas perspectivas. El análisis que se hace a continuación se refiere principalmente al desarrollo que ha experimentado el diseño estructural de ellas en Occidente.

Es lógico relacionar el invento de la rueda con el inicio de la construcción de vías de tránsito. Esto nos sitúa a 3500 años A.C. aproximadamente. De esta época no existen antecedentes de construcción de ningún tipo de caminos lo que permite suponer que sólo existieron huellas de poca duración. El primer vestigio de camino data de 1.500 años A.C. pero es sólo 300 años A.C. que ya se puede hablar de camino propiamente tal. Esta época corresponde al desarrollo del Imperio Romano y se pierde 300 años D.C., que corresponde a la invasión de los bárbaros a Europa. De aquí en adelante se habla de la noche negra del viejo continente. En éste durante 1.000 años se perdió la civilización, para renacer en forma paulatina a contar del año 1.300 D.C. hasta nuestros días. Los primeros síntomas de desarrollo de caminos datan de 1.700 y de aquí en adelante podemos analizar su trayectoria.

Veamos qué pasa con nuestro parámetro tránsito. Durante todo el tiempo que el tránsito se mantuvo con baja velocidad de desplazamiento, poco peso y baja frecuencia, la solicitación transmitida por éste al suelo de fundación corresponde sólo a compresión. De esta manera, únicamente varió el diseño de caminos con diferencias poco relevantes hasta la década 1930-1940. En este período, el vehículo de transporte experimentó un cambio importante en cuanto a su velocidad de desplazamiento y a la repetición y peso de la carga que podía transportar.

El desarrollo que se dejó en la época de los 30-40 ha continuado hasta hoy día, incrementándose permanentemente, y presionando para perfeccionar el diseño estructural de los pavimentos a fin de poder enfrentar los desafíos descritos en la primera parte de esta exposición.

El hecho de que durante tantos cientos de años no fuera necesario, más allá de un simple cálculo a la compresión, hizo que gran parte de los investigadores e ingenieros no se interesaran por el diseño de pavimento. De manera que el cambio de solicitación del tránsito produjo una ebullición en los pocos profesionales que se encontraban trabajando en este campo y que no encontraron ningún tipo de apoyo en cómo resolver sus problemas. De aquí en adelante expusieron sus nacientes teorías los ingenieros como PROCTOR - PORTER - HVEEM - BURMISTER y otros. Se dio importancia al estudio del tránsito, de la mecánica de los suelos, materiales de construcción y métodos constructivos. Los estudios avanzaron rápidamente, pero siguieron presentándose fallas en los pavimentos, que reflejaban claramente que el problema aún no se resolvía. Y así llegamos al presente, con investigaciones que se desechan, y con ideas nuevas que aparecen, las que a su vez son reemplazadas por otras sin tener una pauta definida que nos asegure un buen resultado. Hay eso sí, una marcada diferencia entre países que han abordado con más éxito los diseños estructurales y otros que sólo han utilizado, de alguna u otra manera, la tecnología foránea con resultados que varían de regular a malos. Estos últimos pertenecen al grupo de países en desarrollo, por lo cual no disponen de suficientes técnicos y medios económicos que puedan dar una mejor respuesta a la solución del problema.

III. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO ESTRUCTURAL

Se ha tratado de resolver el problema del diseño de la estructura de un camino de tres maneras diferentes. La primera se refiere a una solución matemática, la segunda a mediciones empíricas, y por último el tercer intento se basa en una combinación de la solución matemática y la solución empírica que se ha denominado "Método Analítico" o "Mecanicista".

3.1. Solución Matemática

El primer intento de resolver el diseño de un pavimento en forma matemática corresponde a BOUSSINESQ, en 1885, el cual supuso una capa homogénea, isotrópica e infinita. Este razonamiento está muy alejado de la realidad, razón por lo cual no se siguió perfeccionando.

Muchos años después Burmister en 1943 y 1947 ideó un sistema compuesto de dos y tres capas respectivamente, considerando las capas homogéneas, isotrópicas, finitas en espesor e infinitas en superficie. Planteó una fórmula matemática que consideró todas las variables solicitantes y resistentes conocidas a esa fecha. Luego, al tratar de resolver la ecuación planteada tuvo que ir simplificando para poder llegar a una solución. De tanto simplificar, el resultado obtenido no reflejaba la realidad del comportamiento del pavimento bajo tránsito. Así fue como se pensó en buscar un método más representativo, tratando de medir los efectos que ocurrían en el pavimento al ser utilizado.

3.2. Solución Empírica

En su inicio y dado al pobre resultado obtenido con las soluciones matemáticas, se comenzaron a efectuar estudios en pistas de pruebas de laboratorio. Nuevamente los ingenieros se convencieron que los resultados aquí obtenidos, con

Revista Ingeniería de Construcción, N°8, Enero-Junio, 1990

modelos a escala en algunos de sus componentes, no tenían relación con el comportamiento de los mismos materiales en la carretera.

En 1938 el Ingeniero O.J. Porter presenta un método de diseño basado en el estudio comparativo de un enorme número de muestras obtenidas en caminos de distintos comportamientos y diferentes tipo de tránsito. Su método consistió en inventar un ensaye que en alguna forma mide la estabilidad del material, utilizando un tipo de chancado estandarizado. Este ensaye se denominó C.B.R. (Razón Portante Californiana).

El resultado de la medición de la estabilidad de un material cualquiera se relacionó como un porcentaje de la estabilidad de la muestra patrón de C.B.R.=100%. El tránsito lo convirtió a una rueda única equivalente. Finalmente en 1942 entregó un gráfico con curvas de diseño para tránsito A y B. En este gráfico se entraba con el valor C.B.R. del material a utilizar y se obtenía el espesor necesario de este material para la curva A o B. Este método fue ampliado por el cuerpo de ingenieros de U.S.A. durante la Segunda Guerra Mundial y extrapolado para ser utilizado en el diseño de pistas de aterrizaje.

El método fue rechazado por las diversas inquietudes que no se resolvían, principalmente por la influencia del tránsito y condiciones del ensaye C.B.R. De esta forma se pensó en efectuar una pista de prueba tamaño natural; así en 1954, se construyó la pista de prueba de WASHO (Estados del Medio Oeste de U.S.A.). Al poco tiempo se dieron cuenta de que las medidas eran insuficientes, razón por la cual se preparó una nueva pista de prueba (1957-1962). Sus resultados, traducidos a método de diseño, son actualmente muy difundidos desde 1962 a la fecha. Se le ha denominado método AASHTO. Esta pista de prueba ha sido constantemente objetada dado su carácter empírico, de manera que se dá crédito a su buena resolución sólo en la zona en que fue construida. (Estado de Illinois U.S.A.)

Es de toda evidencia que gráficos o fórmulas que son el resultado de relacionar mediciones a determinados materiales en un determinado lugar no pueden ser utilizados en otras condiciones que las originales. El empirismo no es exportable.

El conocimiento tanto de materiales como del comportamiento estructural del pavimento se fue incrementando desde la década de los 30 - 40. Cada uno de los intentos de solución planteados, si bien es cierto, que no resuelven el problema en forma integral, han ido aportando una serie de nuevos elementos de juicio para poder seguir perfeccionando a lo menos la construcción de mejores pavimentos.

3.3. Método Analítico o Mecanicista

Reconocida la deficiencia y debido a la imposibilidad de seguir avanzando para obtener un conocimiento más cabal del comportamiento reológico del pavimento se optó por combinar estudios de análisis matemático, basados en la teoría de la elasticidad de las capas componentes de un diseño y la medición de su comportamiento bajo tránsito que a juicio de los distintos usuarios eran más económicos para una zona determinada. La ecuación matemática que resuelve el sistema multicapa, relaciona su comportamiento de acuerdo a los módulos de elasticidad, coeficientes de Poisson y espesor de los distintos estratos que componen el pavimento.

Aplicando una carga unitaria (se considerará la carga de un Eje Equivalente) se puede determinar la deformación unitaria producida en el suelo de fundación (ϵ) y luego a través de fórmulas de fatiga se determina el número de repeticiones de ejes equivalentes que puede soportar dicho suelo, antes de experimentar una deformación permanente. También entrega el esfuerzo a la tracción horizontal producido en la interfase entre capas y que son las que originan la fatiga que produce el agrietamiento en la capa superior.

Hoy en día, los estudios en las diversas partes del mundo están orientados, a perfeccionar este método de diseño. Aquí intervienen solamente elementos del área donde se va a construir la carretera, dejando obsoletos los dos métodos antes descritos.

El método mecanicista de diseñar espesores de capas no entrega información sobre la compactación, pérdida de soporte y deterioro superficial que puede experimentar un sistema multicapa determinado. Por esta razón, se deberá tener especificaciones de calidad y de construcción que solucionan los efectos antes mencionados.

Por otra parte, debe estudiarse la ley de fatiga que se utilizará. Esta tiene la siguiente forma general:

$$N = a\epsilon - b$$

donde:

N = Número de repeticiones en E.E.

a y b = Valores numéricos obtenidos de mediciones en terreno y laboratorio.

ϵ = deformación unitaria del suelo de fundación.

De acuerdo a lo expuesto, cada zona deberá determinar su ley de fatiga o en su defecto utilizar en primera instancia una debidamente comprobada y estudiada en una zona de características similares; luego si existen variaciones, retroalimentar el sistema con los nuevos valores obtenidos.

3.4. Resumen del Estado Actual

Revista Ingeniería de Construcción, N°8, Enero-Junio, 1990

El esquema que se entrega en la página siguiente, indica los distintos tipos en que se pueden agrupar todos los diseños de pavimento.

TIPOS DE PAVIMENTOS

PAVIMENTO RIGIDO	PAVIMENTOS FLEXIBLES			
TIPO A	TIPO B	TIPO C	TIPO D	
LOSA HORMIGÓN	RODADO	RODALO	CAPAS	DOBLE TRA-
SUB-BASE GRANULAR	CAPAS INTERMEDI ASFÁLTICA	CAPAS INTERMEDI ASFÁLTICA	ASFÁLTICA	TAMIENTO SUPERFICIAL
TERRENO NATURAL	BASE ASFÁLTICA TERRENO	BASE ASFÁLTICA BASE	CAPAS	BASE ESTABILIZADA
	NATURAL	CAPAS ESTABILIZADA GRANULARES SUB-BASE GRANULAR TERRENO NATURAL	GRANULARES	SUB-BASE GRANULAR MATERIALES DESUB-RAS ANTE TERRENO NATURAL

Descripción de los tipos de diseño:

TIPO A: El pavimento rígido está compuesto por una losa de hormigón, una sub-base granular y las juntas necesarias para que la losa de hormigón trabaje en forma adecuada.

El pavimento flexible puede dividirse en tres grandes grupos:

TIPO B:

Capas asfálticas gruesas sobre terreno natural.

Esta solución es apta para ser usada en países deficitarios en áridos. Las solicitaciones de tránsito son absorbidas en su totalidad por las capas asfálticas. Esto implica un fuerte espesor con el consiguiente costo en asfalto. (Full Depth).

TIPO C:

Capas asfálticas de espesores moderados.

Estas absorben aproximadamente la mitad de las solicitaciones de tránsito. La otra parte es soportada por la base estabilizada y la sub-base granular. Este tipo de solución es utilizado en U.S.A. y Europa, donde el costo del asfalto es relativamente bajo.

TIPO D:

Recubrimiento asfáltico con capa delgada.

Esta puede ser un doble tratamiento asfáltico o una mezcla en caliente de bajo espesor (0,02 m. a 0,03 m) y no aporta estabilidad al sistema. El total de la solicitación del tránsito es absorbido por las capas granulares. Esta solución es utilizada en Nueva Zelandia y en Australia.

Todas las soluciones planteadas resuelven con sus diferentes variables las solicitaciones de tránsito que puedan requerirlas, por lo tanto, su elección debe ser considerada en base a:

- Conocimientos que se tengan del comportamiento reológico del sistema multicapa utilizado.
- Criterio económico, que es siempre utilizado cuando hay diferentes soluciones técnicas de un mismo nivel de excelencia.

Revista Ingeniería de Construcción, N°8, Enero-Junio, 1990

Para el caso de los pavimentos flexibles, es importante analizar el comportamiento reológico ya que sus capas asfálticas son termoplásticas y viscoelásticas. El conocimiento de este comportamiento es muy complejo por la fuerte incidencia del clima (variaciones de temperatura) que hacen oscilar su estabilidad en el corto y largo plazo, afectando con ello a la totalidad del sistema multicapa. Esta influencia varía en forma muy relevante para los tipos B (Full Depth) y C, y no tiene ninguna trascendencia para el pavimento flexible con protección de una delgada capa de asfalto (tipo D).

Mirado bajo este punto de vista se eliminan todos los problemas de comportamiento reológico en el pavimento tipo D. Las capas granulares no son afectadas por las deformaciones y escurrimientos en la vida útil del pavimento. El análisis desde el punto de vista económico, es de mayor importancia, por cuanto la componente más cara son las capas asfálticas y presentan fuertes variaciones según se diseñe con métodos empíricos o mecanicistas.

Ejemplo: Para un tránsito de 7.000.000 de Ejes Equivalentes por pista de diseño y sobre un terreno natural de C.B.R. 5% tenemos:

		TIPO DE SOLUCIÓN		
SEGÚN METODO AASHTO		B	C	
SEGÚN METODO MECANICISTA				D
CAPAS ASFÁLTICAS	RODADO	0,05M	0,05M	0,02M
	BASE ASFALTICA	0,26M	0,12M	-
CAPAS GRANULARES	BASES	-	0,15M	0.15M
	SUB-BASES	-	0.24M	0.44M

Si comparamos la solución C, actualmente usada en Chile, con la D, podemos ver que la diferencia en costo es el valor de una capa asfáltica de 0,15 m. menos el valor de 0,20 m. de espesor de sub-base.

Costo aproximado de capa asfáltica (Antes del problema del Golfo Pérsico) $\$30.000 \times m^3 \times 0,15 = \$ 4.500$ por m^2 de pavimento.

Costo aproximado de sub-base $\$ 2.000 \times m^3 \times 0,20 = \$ 400$ por m^2 de pavimento

Diferencia por m^2 $\$ 4.100.-$

Mayor inversión por km. $4.100 \times 7 \times 1.000 = \$28.700.000.-$

En otras palabras, en la construcción de un km. de las características descritas, dejamos enterrados \$28.700.000 (veintiocho millones setecientos mil pesos) que a nadie benefician. Es sorprendente lo que resulta al saber elegir el método adecuado. Se aprovecha en mejor forma nuestra formación árida a lo largo de todo el país.

IV. CONCLUSIONES

Las conclusiones y recomendaciones obtenidas del análisis, por orden de importancia, son las siguientes:

1. Utilizar como método de diseño el "Analítico o Mecanicista", eliminando el método empírico actualmente en uso.
2. Preparar a nuestros técnicos con cursos de postgrado en Universidades de países que tengan características similares a las nuestras (Nueva Zelandia o Australia).
3. Eliminar todo diseño (empírico actualmente o mecanicista después) que no está basado en parámetros ajustados a nuestra realidad.
4. Reorganizar el sistema de asesorías, para que ellas también dispongan de ingenieros con estudios de postgrado en caminos.
5. Pedir a las Universidades, que tienen en su plan de enseñanza cursos de caminos, que los orienten en la dirección propuesta.
6. Revisar las especificaciones en uso, considerando que nuestro país presenta diferencias de clima y tránsito debido a su longitud territorial.
- 7.