

CÁLCULO DE REFUERZO DE FIRMES SEGÚN EL MÉTODO AASHTO

Ramón Crespo del Río
Pedro Aliseda Pérez de Madrid
Pedro Yarza Álvarez
AEPO, Ingenieros Consultores S.A.

1. CONCEPTOS BÁSICOS DEL MÉTODO AASHTO

El método **AASHTO (Guide for Design of Pavement Structures. Edición 1.993)** de dimensionamiento de firmes permite diversas opciones de refuerzo, siendo la que más interesa para los propósitos de este trabajo la denominada: **AC Overlay of AC Pavement**, es decir, refuerzo de un firme bituminoso con mezcla bituminosa.

Todas ellas se basan en el siguiente supuesto general: El espesor de refuerzo se define como: ***DIFERENCIA ENTRE LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL NECESARIA PARA SOPORTAR EL TRÁFICO PREVISTO DURANTE EL PERIODO DE PROYECTO DEL REFUERZO Y LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL ACTUAL DEL FIRME EXISTENTE.***

El procedimiento se basa en: (1) determinar el Número Estructural (SN) necesario para soportar el tráfico previsto y (2) calcular el Número Estructural efectivo del firme existente. La diferencia define el refuerzo necesario expresado como número estructural.

Antes de entrar en la descripción detallada interesa presentar los conceptos básicos del método **AASHTO** de dimensionamiento de firmes.

1.1 NÚMERO ESTRUCTURAL

El método **AASHTO** emplea el concepto de **Número Estructural (SN)** que representa la capacidad de un firme para soportar las solictaciones del tráfico. Tiene unidades de longitud y se expresa en milímetros.

1.2 NIVEL DE SERVICIO

Otro concepto es el de **Nivel de Servicio (SI)**. El número estructural (SN) se calcula entre dos niveles de servicio: (1) Inicial y (2) final. Los valores los determina el ingeniero proyectista dentro de una escala numérica de 0 a 5, donde 5 indica un estado perfecto (ideal) y 0 un estado de ruina del firme. Existen estudios de correlación entre el nivel de servicio y el valor del IRI, la más conocida es la expresión:

$$PSI = 5.0 - 3.17 \log\left(\frac{IRI}{1.04}\right)$$

A efectos prácticos los valores recomendados por la Guía **AASHTO** son: un valor mayor de 4, como valor inicial y entre 2 y 3 como valor final. Una pareja típica es 4.2 y 2.5 (valores empleados durante el conocido ensayo AASHTO¹ de finales de los años 50).

Las actuales recomendaciones **AASHTO** para el nivel de servicio final se recogen en la tabla siguiente:

IMD	NIVEL DE SERVICIO FINAL	IRI FINAL
> 10.000	3.0 - 3.5	3.1 - 2.4
3.000 - 10.000	2.5 - 3.0	3.9 - 3.1
< 3.000	2.0 - 2.5	4.7 - 3.9

1.3 CONFIABILIDAD

El método define un parámetro de control del diseño como medida de la garantía del proceso. La confiabilidad (R) es la probabilidad (expresada como porcentaje) que el firme proyectado aguante el tráfico previsto. La confiabilidad debe ser mayor cuanto más importante sea la carretera y mayor el volumen de tráfico. Valores entre 0.80 y 0.99 son apropiados para carreteras de la red principal.

¹ La AASHO (American Association of State Highway Officials), fue convertida en los años 80 en la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials).

1.4 VARIABILIDAD

Se trata de un coeficiente para tener en cuenta los errores o desviaciones del diseño, incluyendo las variaciones en las propiedades de los materiales, variación en las propiedades de la explanada, en las estimaciones del tráfico, en las condiciones climáticas y en la calidad de la construcción. Para ello se establece un valor de desviación típica. Teóricamente este valor debe ser resultado de las condiciones locales, aunque en la práctica la propia guía **AASHTO** recomienda un valor de 0.44, si no se tienen en cuenta variaciones en la evaluación del tráfico y 0.49 si se tienen.

1.5 TRÁFICO

La vida del firme se expresa por el número de ejes de 80 kN que se prevén en el periodo de proyecto. Se calcula el número estructural derivado del cálculo de tráfico, de los niveles de servicio inicial y final, de la confiabilidad, de la variabilidad y del valor del módulo resiliente de la explanada (subgrade). El número estructural del firme debe ser igual o ligeramente superior al número estructural calculado partir del tráfico y la explanada.

2. CÁLCULO DEL REFUERZO

El refuerzo del firme se calcula como diferencia entre el número

estructural necesario para el tráfico futuro y el número estructural efectivo del firme existente.

2.1 NÚMERO ESTRUCTURAL PARA EL TRÁFICO FUTURO

El número estructural para el tráfico futuro se determina con el mismo procedimiento que para un firme nuevo, es decir, calculando el número de ejes de 80 kN estimado para la vida de proyecto (10 o 20 años normalmente) y estableciendo los niveles de servicio inicial (normalmente 4.2) y final (normalmente 2.5) del firme que se pretende reforzar.

El cálculo se asocia a una probabilidad mediante la asignación de un nivel de confianza del diseño (entre el 90 y el 99%, siendo habitual tomar el 95%), y de un coeficiente de desviación típica como medida de la variabilidad de los datos de entrada, (habitualmente 0.44).

Finalmente se necesita determinar un módulo resiliente de la explanada. Lo que se puede realizar mediante ensayos de laboratorio, como el CBR (y establecer el módulo resiliente con la conocida relación $M = 10 \text{ CBR}$), o mejor con el ensayo **AASHTO T294-92** que determina el módulo resiliente del material ensayado. Otro procedimiento más habitual es determinarlo mediante Cálculo Inverso (**BACKCALCULATION**)

a partir de deflexiones obtenidas con deflectómetros de impacto.

2.2 NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO DEL FIRME EXISTENTE

El Número Estructural efectivo (SN_{eff}) es una medida de la capacidad estructural actual (en el momento de la medida) de un firme. Se definen tres métodos alternativos para establecerlo. Se recomienda que el ingeniero emplee los tres y seleccione el valor más adecuado de SN_{eff} atendiendo a experiencias anteriores en la zona y a su propio criterio.

2.2.1 MÉTODO DEL ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES

Se determina la capacidad estructural efectivo (SN_{eff}) del firme asignado coeficientes estructurales a cada capa y sumando todos ellos.

$$SN_{eff} = a_1 d_1^m a_2 d_2^m a_3 d_3^m \dots a_n d_n^m$$

Donde :

a_i = Coeficiente estructural actual de la capa i

d_i = Espesor de la capa i

m_i = Coeficiente de drenaje de la capa i

Normalmente los valores que se asignan a las capas son inferiores a los correspondientes a ese mismo tipo de

material recién construido. El método **AASHTO** proporciona orientaciones y criterios para asignar valores en función de los daños observados o de los ensayos realizados.

2.2.2 MÉTODO DE LA VIDA REMANENTE

Este método se basa en la determinación de la reducción de la capacidad estructural del firme debido a la fatiga acumulada en los materiales. Solo se puede utilizar si se conocen las cargas aplicadas al firme desde la construcción hasta el momento actual. Estas cargas se comparan con las previstas en proyecto hasta el nivel de servicio final. La diferencia a 100 determina el tanto por ciento de vida remanente (RL). Este valor se introduce en la figura 5.2 de la sección III de la Guía **AASHTO** para determinar un factor de condición (CF). El número estructural efectivo (SN_{eff}) es el producto de CF por el número estructural inicial del firme (SN).

2.2.3 MÉTODO UTILIZANDO ENSAYOS CON DEFLECTOMETRO DE IMPACTO FWD (BACKCALCULATION)

Cuando se dispone de ensayos de deflexión realizados con deflectómetro de impacto los datos sirven para determinar las propiedades (módulos) de los materiales necesarias para determinar la capacidad estructural efectiva, actual y futura.

El criterio general es que los ensayos no se realizan sobre zonas deterioradas que se supone serán reparadas.

Mediante las ecuaciones que se indican en los apartados siguientes se determina:

- Modulo resiliente de la explanada
- Modulo efectivo de las capas del firme (encima de la explanada)

El valor de el Número Estructural efectivo (SN_{eff}) se determina a partir de la ecuación:

$$SN_{eff}(mm)' 0.0024D @ \sqrt[3]{(E_p)}$$

Donde :

D= Espesor total (mm) de todas las capas del firme

SN_{eff} = Número Estructural efectivo del firme

E_p =Módulo efectivo del firme

El módulo efectivo es una medida de la contribución estructural del firme existente, su cálculo requiere un valor del módulo resiliente de la explanada (que también ser determinado mediante cálculo inverso) y los valores de deflexión bajo carga obtenidos con deflectometro de impacto.

La diferencia entre el Número Estructural efectivo disponible y el Número Estructural necesario para el tráfico futuro determina el espesor de refuerzo.

2.3 CÁLCULO DEL MÓDULO DE LA EXPLANADA Y DEL MÓDULO EQUIVALENTE DEL FIRME SEGÚN EL MÉTODO ASSHTO

Dado su interés se describe y comenta el procedimiento de cálculo inverso simplificado a un modelo bicapa para determinar el modulo de la explanada y el modulo equivalente del firme a partir de las deflexiones obtenidas con deflectómetro de impacto.

Se emplea el método **AASHTO** para la determinación del módulo de resiliencia de la explanada (M_r) y del módulo equivalente del firme (E_p), a partir de los datos de las deflexiones medidas con el deflectómetro de impacto (único permitido ya que simula mejor las características dinámicas de la aplicación de la carga por parte de un vehículo en movimiento que los ensayos con Viga Benkelman o con deflectógrafos derivados de la técnica francesa, como el deflectógrafo Lacroix o el Curviámetro).

2.3.1 ÁREA DEL CUENCO DE DEFLEXIONES

Aunque de mayor empleo en

refuerzo de firmes de hormigón otro de los indicadores de utilidad en el análisis del estado del firme es el ÁREA del cuenco de deflexiones. La guía **AASHTO** utiliza el método desarrollado por Hoffman,

El método se encuentra desarrollado en el trabajo de Hoffman y Thompson ("*Mechanistic Interpretation of Nondestructive Pavement Testing Deflections*" *Transportation Engineering Series N° 32, Illinois Cooperative Highway and Transportation Research Series n°190, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1.981*)

La expresión del área recogida en la guía **AASHTO** es :

$$\text{ÁREA} = 6 \left[1 + 2 \left(\frac{d_{30}}{d_0} \right) + 2 \left(\frac{d_{60}}{d_0} \right) + \frac{d_{90}}{d_0} \right]$$

donde d_0 es la deflexión en el punto de impacto y d_{30} , d_{60} y d_{90} las deflexiones a 30, 60 y 90 cm de dicho punto.

El valor del área es un buen indicador del módulo del pavimento, correspondiendo valores elevados a firmes con buenas características estructurales.

2.3.2 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DE LA EXPLANADA

Para la determinación del módulo de la explanada a partir de las medidas de deflexiones realizadas la guía **AASHTO** recoge las investigaciones realizadas por P. Ulditz (*“Overlay and Stage by Stage Design”, Proceedings, Fourth International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, 1.977. “Pavement Analysis”, Elsevier Science Publishers B.V., 1.987).*

El procedimiento se basa en las hipótesis siguientes que relacionan el módulo resiliente de la explanada y las deflexiones:

Al incrementar la distancia desde donde se miden las deflexiones respecto del punto de aplicación de la carga, disminuye la influencia de las capas del pavimento en el valor de la deflexión obtenida.

Al aumentar esa distancia mayor es la semejanza de la carga distribuida sobre una superficie al efecto de una carga puntual.

La primera hipótesis implica que la deflexión alejada de la carga, medida en la superficie del firme, es similar a la que se obtendría en la fibra superior de la explanada. Por tanto los valores de esas deflexiones dependen exclusivamente de las propiedades de la explanada y son

casi independientes del firme. Se puede obtener la respuesta (deflexiones) a la aplicación de una carga utilizando un modelo monocapa (teoría de Boussinesq), donde la incógnita es el módulo de la capa, en este caso la explanada.

La segunda hipótesis permite considerar que la carga a emplear en la ecuación de Boussinesq es puntual, si la deflexión se mide en un punto lo suficientemente alejado del lugar de aplicación de la carga.

A partir de dichas hipótesis se deduce la siguiente fórmula para la determinación del módulo resiliente de la explanada (M_R), a partir del valor de las deflexiones (d_R) obtenidas a una distancia (r), lo suficientemente alejada de la carga (P):

$$M_R = \frac{0,24 P}{d_R r}$$

donde M_R viene expresado en MPa, d_R en centésimas de milímetros, r en centímetros. El coeficiente de Poisson considerado es 0.5.

La guía **AASHTO** recomienda que los valores que se utilicen se hayan determinado mediante un equipo de medida de deflexiones con carga pesada, especialmente con deflectómetros de impacto (FWD), siguiendo las recomendaciones de las normas **ASTMD**

4694 y D 4695.

Al aumentar la distancia disminuyen los valores de deflexión, aumentando el valor de los errores, por lo que no debe determinarse en un punto excesivamente alejado. Por otra parte el punto de medida ha de encontrarse lo suficientemente lejos para que las deflexiones sean independientes del firme. Se considera que esto sucede cuando la distancia es superior a 0,7 veces el radio efectivo de la tensión principal (a_e) en la fibra superior de la explanada, que se determina utilizando la siguiente expresión:

$$a_e = \sqrt{a^2 \left[D \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}} \right]^2}$$

donde a es el radio de la placa que transmite la carga al firme, D el espesor del firme, E_p módulo equivalente del firme y M_R el módulo resiliente de la explanada. (Se ha tomado el valor de la deflexión a 120 cm), siendo $P= 6500$ kg la carga utilizada en el ensayo con el deflectómetro de impacto **KUAB-FWD**

2.3.3 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO EQUIVALENTE DEL FIRME.

El método de determinación del módulo equivalente del firme (E_p) utilizado por la guía **AASHTO** se basa en representar el firme por un modelo

bicapa (la inferior con profundidad infinita y módulo M_R , que representa a la explanada, y otra el propio firme con un espesor total D y un módulo equivalente E_p , por lo que puede utilizarse la ecuación de Boussinesq. Para simplificar las ecuaciones se asume que ambas capas tienen un coeficiente de Poisson de 0,5.

$$\frac{d_0}{1.000} = 1,5 p a \left[\frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^3 \frac{E_p}{M_R}}} \sqrt{1 + \frac{1}{E_p \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right]$$

Con dichas hipótesis la fórmula resultante para la determinación del módulo equivalente del firme es:

donde p es la presión de contacto que es 0.9 MPa, a el radio de la placa del deflectómetro (15 cm), D el espesor del firme, d_0 la medida de la deflexión en centésimas de milímetro, M_R el módulo resiliente de la explanada y E_p el módulo equivalente del firme.

La presión de contacto (p) se obtiene dividiendo la carga aplicada 6.500 Kg (63.765 N) entre el área de la placa del deflectómetro 706.8 cm².

3. RESUMEN

En las páginas anteriores se ha presentado una breve descripción del método **AASHTO** de cálculo de refuerzo

de firmes, preparada como comunicación libre para las “JORNADAS SOBRE AUSCULTACIÓN Y TOMA DE DATOS PARA PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN DE CARRETERAS” a celebrar en Cáceres en Diciembre de 1999, con ella se ha pretendido abrir la Ingeniería de Refuerzo de Firmes a practicas diferentes a las establecidas en la O.C 323 por las siguientes razones, en primer lugar se trata de un método muy utilizado en América Latina por lo se considera que los Ingenieros españoles deben conocerlo, también porque el tráfico se valora por el número de ejes que se estiman van a incidir durante todo el periodo de proyecto y no solo por la IMD de vehículos pesados, además el firme se modela como una estructura, simplificada a un modelo bicapa, y se emplea todo el cuenco de deflexiones (es decir, toda la información que se obtiene con los deflectómetros de impacto), finalmente permite corregir la deflexión por el efecto de temperatura hasta 50° centígrados, lo que para un país tan caluroso como España amplía la época de medida de deflexiones