

# LOS METODOS EMPIRICOS PARA LA DETERMINACION DEL ESPESOR DE FIRMES FLEXIBLES

Por OLEGARIO LLAMAZARES GOMEZ,  
Ingeniero de Caminos.

*Presenta el autor una interesante información acerca de lo mucho que se trabaja actualmente en Norteamérica para aclarar el problema que se reseña en el epígrafe, y la gran atención que se dedica a tan importante estudio.*

El gran incremento en frecuencia y tonelaje de los transportes por carretera obligó a abandonar el sistema antiguo de fijar el espesor de los afirmados con la generalización rutinaria de las Instrucciones oficiales o el criterio formado en la experiencia del proyectista. Se fueron delimitando las variables que jugaban en el éxito o fracaso de las calzadas y, como consecuencia, se sintió la necesidad de una completa información previa para evaluar estas variables con toda la aproximación posible. Con ello pudo llegarse a la determinación del espesor de firme que corresponde a unas determinadas condiciones de suelo, humedad, temperatura y características de tráfico. Y la nueva técnica se fué acercando a la seguridad y a la economía con los métodos empíricos de beneficiosa evolución, desde las toscas "reglas del pulgar" hasta los precisos ábacos del estabilómetro.

Larga es la serie de los métodos para el cálculo de espesor de afirmados con pavimento flexible; solamente en los Estados Unidos veinte Departamentos de carreteras han desarrollado procedimientos diferentes, basados en las características físicas del suelo, en la penetración, en las placas de carga o en los ensayos triaxiales.

Podemos decir que el de mayor difusión hasta ahora es el bien conocido ensayo de California, determinante del CBR, índice de resistencia del suelo. Pero este método que en sus orígenes pareció racional y definitivo para resolver el problema de la resistencia de los suelos, fué con la práctica desvelando algunas deficiencias; haremos una indicación de las principales, puesto que a ellas vamos a referirnos en comentarios posteriores.

En primer lugar hay una gran diferencia entre la superficie de contacto de la carga, en la calzada y en el ensayo, y si bien esto no falsea el resultado para suelos de arcilla cohesiva, en cambio en terrenos arenosos da valores muy inferiores a la realidad. Otro de los fallos de este método se presenta en las arcillas

finas, de muy poca permeabilidad y por tanto muy lenta imbibición; en ellas el período de inmersión de la probeta puede no ser suficiente para alcanzar la humedad a que llegue a estar sometido el suelo en obra.

Estas imperfecciones del ensayo CBR hacen que cada día gane más adeptos el método del estabilómetro, un ensayo triaxial de sistema cerrado, debido a Mr. Hveem, Director del laboratorio de la California Highway Division, en el que las sollicitaciones de probeta y suelo son más afines. Se complementa este ensayo determinando la cohesión de la capa de rodadura, y el método sigue en vías de perfeccionamiento con la introducción del "resiliómetro", aparato en experimentación que hemos visto funcionar en el laboratorio citado y con el que se pretende estimar la influencia del movimiento elástico en la rotura de pavimentos.

Al lado de estos métodos que exigen un costoso equipo de laboratorio, prohibitivo en muchos casos, existen otros rápidos y económicos que pueden utilizarse como complementarios de aquéllos, determinando correlaciones para zonas homogéneas del terreno, o como único medio para los Servicios que dispongan de un reducido material de ensayos.

A estos métodos, que pudieran llamarse puramente empíricos, son a los que nos referimos principalmente en el presente trabajo. En él se incluyen como más representativos y eficaces los del "índice de grupo" y del "factor de carga".

## Método del índice de grupo.

El método del índice de grupo, debido a Mr. Steele del "Highway Research Board", definió la resistencia del suelo por un índice de calidad o, más propiamente hablando, de mala calidad. Recordemos la expresión de su fórmula definiendo sus factores determinantes que dependen del porcentaje en peso,  $p$ , que pasa por el tamiz núm. 200 (0,074 mm.) y de los

límites de Atterberg: límite líquido,  $LL$ , e índice de plasticidad,  $IP$ :

$$IG = 0,2 a + 0,005 a c + 0,01 b d.$$

Valor de  $a$ :

- Si  $p < 35\%$   $a = 0$   
 Si  $35\% < p < 75\%$   $a = p - 35$   
 Si  $75\% < p$   $a = 40$ .

Valor de  $b$ :

- Si  $p < 15\%$   $b = 0$   
 Si  $15\% < p < 55\%$   $b = p - 15$   
 Si  $55\% < p$   $b = 40$ .

Valor de  $c$ :

- Si  $LL < 40$   $c = 0$   
 Si  $40 < LL < 60$   $c = LL - 40$   
 Si  $60 < LL$   $c = 20$ .

Valor de  $d$ :

- Si  $IP < 10$   $d = 0$   
 Si  $10 < IP < 30$   $d = IP - 10$   
 Si  $30 < IP$   $d = 20$ .

Conocido para cada caso el tráfico diario previsible de vehículos pesados (se prescinde de los coches

En este método se ha considerado que el clima es el clima americano medio, pero no se tienen en cuenta los efectos de penetración de la helada, que es motivo de dimensionamiento por separado y lleva generalmente a espesores superiores. Se supone un buen drenaje y una compactación en la subrasante no inferior al 95 por 100 del Proctor normal.

Respecto a los efectos del tráfico es preciso considerar que la máxima carga por rueda que admite nuestro Código de Circulación es superior a las 4,5 toneladas, tolerada en Norteamérica, que es de la que parte Mr. Steele. Es, pues, preciso tener en cuenta por ello una corrección con aumento de la raíz cuadrada del cociente de las cargas.

Con la policía de limitación de cargas que urge ejercer en nuestras carreteras debe quedar reducida la máxima por eje a 12 toneladas, según fija el Código, o sea 6 por cada rueda, pues aun en el caso de las autorizaciones especiales a que se refiere el artículo 222, con el empleo de ruedas gemelas, en número de 8 para los ejes de gran peso que debe exigirse, se conseguirán menores presiones sobre el pavimento. Fijada la máxima carga por rueda en 6 toneladas, el aumento sobre el espesor de afirmado que nos da el gráfico, será del 15 por 100.

De la comparación de este método con el del CBR han resultado notables divergencias, pudiendo afirmarse que, en general, son superiores los espesores

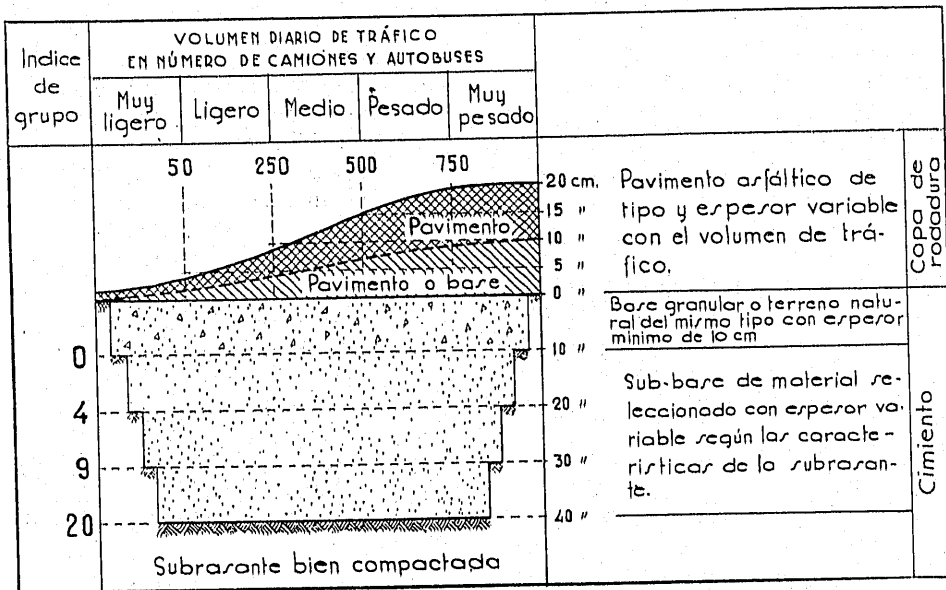


Figura 1.ª

de turismo) y el índice de grupo del suelo, pueden determinarse, respectivamente, el espesor de la capa de rodadura (incluyendo pavimento y parte superior de la base) y el cimiento (incluyendo el resto de la base y la subbase). La fijación de espesores se lleva a cabo con el gráfico de la figura 1.ª.

que se obtienen dimensionando por el índice de grupo, con un aumento de 12 a 15 cm.

Queda, pues, la aplicación de este método como contraste con los resultados obtenidos por el CBR, y así está considerado en las Recomendaciones del Laboratorio del Transporte, en las que se prescribe para

los casos en que se hagan ensayos California *in situ*. En éstos se aceptará el valor obtenido para el espesor, siempre que supere al 75 por 100 del que da el índice de grupo. Si fuera inferior a este porcentaje es preciso asegurarse de que se ha operado con la máxima humedad del terreno, y en tal caso puede adoptarse el menor de los dos valores siguientes: el 125 por 100 del espesor obtenido por el CBR o el 75 por 100 del que da el índice de grupo. Se tomará el valor total de éste en los casos en que no se hizo el ensayo con la máxima humedad.

### El factor de carga.

En las nuevas normas de la Dirección General de Carreteras, para estudio de las condiciones del terreno, se incluye entre los datos de suelos el "factor de carga", base de otro método empírico que estimamos de mayor exactitud que el antes descrito.

Se ha deducido este factor estudiando la correlación entre las características de identificación de un suelo y su índice CBR a través del gran número de ensayos realizados en los últimos años en los laboratorios franceses.

Se partió para ello de los suelos finos que se definen como los que tienen más de un 75 por 100, que pasa por el tamiz núm. 40 (0,42 mm.), o sea más de un 75 por 100 de "suelo-mortero", según la designación americana. Se jugó con los límites de Atterberg para conseguir la correlación, revelando un concienzudo análisis estadístico que existe cierta proporcionalidad entre este valor y la inversa del producto del límite líquido y el índice de plasticidad. Se estableció así la función:

$$Z = \frac{1000}{LL \times IP}$$

y en el Laboratorio Central de Ponts et Chaussées de París se dibujaron diagramas situando los puntos afijos de cada suelo ensayado por sus dos coordenadas: índice CBR y valor  $Z$ . En la figura 2.<sup>a</sup> tenemos uno de estos diagramas con cien puntos correspondientes a otros tantos suelos de diferente naturaleza. Se observa en él que los puntos, en general, no se dispersan mucho de la bisectriz, y dados los valores numéricos correspondientes a abscisas y ordenadas pudo establecerse la fórmula:

$$\text{Índice CBR} = 4,25 Z,$$

con un error medio de  $\pm 33$  por 100.

Existen, sin embargo, dos grupos de puntos que se salen claramente de ese ángulo central. Uno de ellos, el Grupo I con valor  $Z$ , grande, y CBR, pequeño, que corresponde a suelos arenosos, pero ya indicamos al principio de este trabajo que el ensayo California da valores inferiores a la realidad para las arenas.

El Grupo II con CBR grande, y  $Z$  muy pequeño representa suelos arcillosos de gran finura, pero también dijimos que para este tipo de terrenos los índices del ensayo son superiores a aquellos con que puede contarse en obra, porque no se llega a la humedad a que puede estar sometido el suelo en el campo. Vemos, pues, que en ambos casos la ley fijada nos lleva a resultados más concordantes con la realidad.

Se ha fijado para  $Z$  el valor máximo 10, ya que valores superiores corresponden a arenas finas, suelos

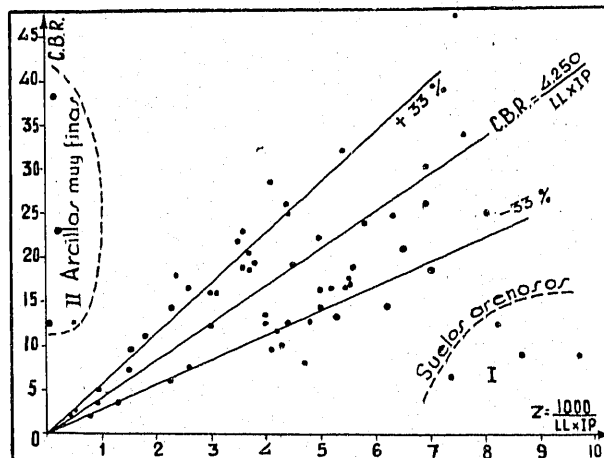


Figura 2.<sup>a</sup>

pulverulentos limpios y de muy poca o ninguna plasticidad; constituyen éstos un excelente material para bases y bien compactados puede asignárseles un índice CBR igual a 20.

Así, pues, y en el caso de suelos finos puede obtenerse de un modo rápido un valor aproximado del índice CBR, correspondiente al óptimo Proctor modificado; se le denomina factor de carga,  $F$ , y se determina por las reglas siguientes:

1.º Para suelos plásticos ( $IP > 5$ ):

$$F = \frac{4250}{LL \times IP}$$

adoptando como valor máximo 20, aunque la fórmula dé un valor superior.

2.º Para los demás suelos se admitirá uniformemente:

$$F = 20.$$

El diagrama de la figura 3.<sup>a</sup>, en el que se ha llevado sobre los ejes de abscisas y ordenadas los espesores de afirmado calculados a partir del factor de carga y del índice CBR, para los mismos suelos representados en la figura 2.<sup>a</sup>, da una idea más satisfactoria de la correlación de ambos métodos, salvo en los dos grupos ya citados, para los que naturalmente vuelve a presentarse la discordancia.

Para completar el método que exponemos, buscando su aplicación para suelos de granulometría gruesa, se prosiguió el análisis estadístico en una larga serie de ensayos de suelos de este tipo, contrastados también con los resultados del ensayo California.

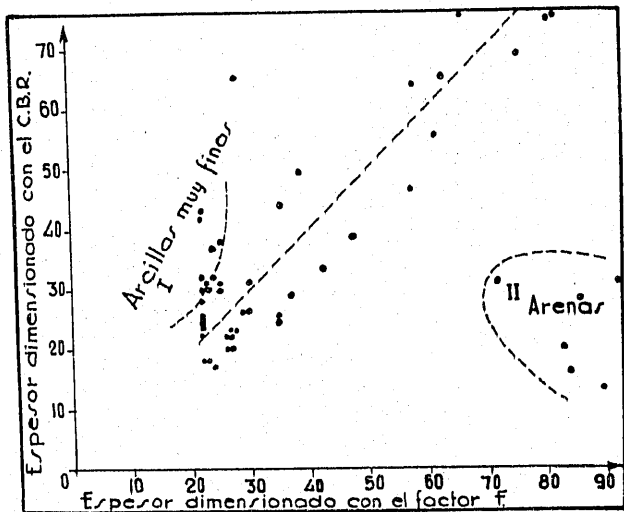


Figura 3.ª.

Se obtuvieron así unas fórmulas que dan el valor  $F$  de un suelo en función del que corresponde a su parte fina, o sea su mortero, según la definición citada. Si llamamos  $F_m$  al factor de carga del mortero y  $m$  al porcentaje de éste que contiene el suelo a estudiar, las fórmulas que deben aplicarse son:

$$\text{Si } m > 25 \% \quad F = F_m \left( 2,5 - \frac{m}{50} \right).$$

$$\text{Si } m < 25 \% \quad F = 40 - \frac{2m}{25} (20 - F_m).$$

El factor de carga nos proporciona valores más aproximados al índice CBR en el caso de suelos finos. Para los suelos gruesos da valores inferiores a los de este índice, con lo que quedamos del lado de la seguridad al dimensionar el espesor del firme. En algunos casos se han aplicado a los factores obtenidos coeficientes de corrección dependientes del tamaño medio de los granos o de su configuración angulosa o redondeada, condición que también influye en la capacidad de carga debido a la mayor o menor fricción interna.

Ahora bien, es preciso olvidar que los valores del

factor de carga se han deducido por correlación con el ensayo California para la compacidad óptima del Proctor modificado, y habrá que hacer la reducción que corresponda a la compacidad que se vaya a exigir en obra. Se aplican para ello los siguientes coeficientes:

|   |      |
|---|------|
| Para el 95 % del Proctor modificado . . . | 0,60 |
| » 90 % » . . .                            | 0,40 |
| » 85 % » . . .                            | 0,25 |

lo que nos muestra el gran descenso en la resistencia de un suelo cuando disminuye la compacidad.

Asignado un valor definitivo al factor  $F$ , el espesor de un firme de carretera puede calcularse con bastante aproximación por la fórmula:

$$e = \frac{100 + 150 \sqrt{P}}{5 + F},$$

en la que  $P$  es la carga máxima por rueda, expresada en toneladas. Pueden utilizarse también los ábacos americanos del CBR, eligiendo en la familia de curvas la que corresponde al caso, de acuerdo con el volumen de tráfico, carga por rueda, precipitación anual y profundidad de la capa freática.

Resaltamos la utilidad del método que acabamos de definir, que con un equipo mínimo de laboratorio puede conducirnos a valores bastante aproximados de la resistencia de un suelo y, como consecuencia, del espesor del firme que debe establecerse sobre él. Por ello no dudamos será de gran aplicación en nuestro país, en la nueva era que para la construcción de carreteras va a iniciarse con la introducción de la técnica americana.

Y quedemos esperanzados, pensando que quizá pronto pueda disponerse de otro método de tan puro empirismo, pero más perfeccionado, al que podría llegarse por la correlación entre las características de identificación y el ensayo del estabilómetro, sobre el análisis estadístico de una larga serie de resultados, como se hizo con el CBR para determinar el "factor de carga". Acaso este método u otro de gran exactitud sea uno de los frutos del más completo ensayo de carreteras de todos los tiempos: las pistas de experimentación de la A.A.S.H.O. en el estado de Illinois, que con un coste de 14 millones de dólares — total el 0,2 por 100 de la inversión de la USA en construcción y conservación de carreteras —, someterán durante dos años a un tráfico rigurosamente controlado 468 tipos diferentes de calzadas flexibles.