

ESTUDIO COMPARATIVO DEL CALCULO DEL FACTOR DE EQUIVALENCIA DE VEHICULOS PESADOS POR EL METODO DE LA 6.1.I.C. Y EL METODO DE LA OCDE

RAMON CRESPO DEL RIO
JORGE GOMEZ FERNANDEZ
ANTONIO ISIDORO CRUZ

Centro de Estudios de Carreteras (CEDEX)

1. INTRODUCCION

A efectos de estudios del tráfico pesado en su incidencia sobre el dimensionamiento de firmes de carreteras, el tráfico real que va a circular por una carretera durante un período de proyecto se asimila a un tráfico expresado en el número de ejes equivalentes de un eje tipo (13 t en España). La norma española 6.1.I.C., basándose en los resultados obtenidos en el ensayo ASSHO, establece la equivalencia entre el daño causado al firme por un eje peso P cualquiera y el que causa el eje patrón de 13 t. Estas equivalencias se establecen para eje simple y para eje tandem.

En el estudio de la OCDE denominado "Effets des véhicules lourds de marchandises (Paris 1983)", se expone un método de cálculo de la agresividad de los ejes teniendo en cuenta algunas de las nuevas características de los vehículos pesados.

En este artículo se comparan ambos métodos, estableciendo una relación, que permita conocer el número de ejes equivalentes que corresponden al total de ejes que circulan por una carretera.

2. METODO DE CALCULO DEL F.E. SEGUN LA NORMA 6.1.I.C.

La norma 6.1.I.C. sólo contempla dos tipos de ejes: simple y tandem.

2.1. EJE SIMPLE

La equivalencia de eje simple de peso P en ejes de 13 t se obtiene mediante la fórmula:

$$E.E. = K_a \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^4$$

P = Peso del eje en t;

P_0 = Peso del eje de referencia (13 t)

$K_a = 1$

2.2. EJE TANDEM

Cada eje tandem de peso P se considerará como equivalente a 1,4 ejes simples de peso $P/2$.

$$E.E. = 1,4 \left(\frac{P/2}{P_0}\right)^4 = 1,4 \cdot (1/2)^4 \left(\frac{P}{P_0}\right)^4 =$$

$$= K_b \left(\frac{P}{P_0}\right)^4;$$

$K_b = 0,09$

2.3. EJE TRIDEM

Aunque la norma no contempla este tipo de eje, en los trabajos realizados en el Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX, se ha aplicado la equivalencia obtenida por investigadores extranjeros, según la cual un eje tridem de peso P equivale a 2,3 ejes simples de peso $P/3$.

$$E.E. = 2,3 \left(\frac{P/3}{P_0}\right)^4 = 2,3 \cdot (1/3)^4 \left(\frac{P}{P_0}\right)^4 =$$

$$= K_c \left(\frac{P}{P_0}\right)^4;$$

$K_c = 0,03$

3. METODO DE CALCULO DE LA OCDE

Según este método la equivalencia en ejes tipo viene dada en función de tres variables:

- A. El tipo de agrupamiento de ejes.
- B. El tipo de ejes en función de las ruedas.
- C. El tipo de suspensión del vehículo. La forma utilizada es:

$$E.E. = \left(K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \frac{P}{P_0} \right)^\alpha$$

K_1 , K_2 , y K_3 : Coeficientes de las variables citadas.

P : Peso del eje considerado, en t.

P_0 : Peso del eje de referencia (en España, 13 t). Separación de las ruedas de los ejes tandem o triéjem: 1,35 a 1,50 m.

Los valores de los coeficientes K_1 , K_2 y K_3 son los expresados en la Tabla 1.

Para la obtención de fórmulas comparables a las de la norma española se supone que la suspensión de los vehículos es la tradicional, por tanto $k_3 = 1$.

3.1. EQUIVALENCIA DE UN EJE SIMPLE

3.1.1. Eje simple con ruedas gemelas

$$\begin{aligned} E.E. &= (K_1 \cdot K_2 \cdot K_3)^4 \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 = K_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 = \\ &= (1 \cdot 1 \cdot 1)^4 \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right)^4; \end{aligned}$$

K_1	TIPO DE AGRUPACION DE EJES	1 0,6 0,45
	- Simple	
	- Tandem - Triéjem	
K_2	TIPOS DE EJES (SEGUN RUEDAS)	1 1,2 1,3
	- Ruedas gemelas	
	- Ruedas anchas	
	- Ruedas sencillas	
K_3	TIPO DE SUSPENSION	1 0,95
	- Tradicional - Mejorado	
α	Exponente de la ley de agresividad	4

TABLA 1.

$$K_0 = 1$$

3.1.2. Eje simple con ruedas anchas

$$\begin{aligned} E.E. &= (K_1 \cdot K_2 \cdot K_3)^4 \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 = K_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 = \\ &= (1 \cdot 1,2 \cdot 1)^4 \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 = 2,0736 \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 \end{aligned}$$

$$K_0 = 2,07$$

3.1.3. Eje simple con ruedas normales

$$\begin{aligned} E.E. &= (K_1 \cdot K_2 \cdot K_3)^4 \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 = K_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 = \\ &= (1 \cdot 1,3 \cdot 1)^4 \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 = 2,8561 \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 \end{aligned}$$

$$K_0 = 2,86$$

3.2. EQUIVALENCIA DE UN EJE TANDEM

3.2.1. Eje tandem con ruedas gemelas

$$\begin{aligned} E.E. &= (K_1 \cdot K_2 \cdot K_3)^4 \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 = K_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 = \\ &= (0,6 \cdot 1 \cdot 1)^4 \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 = 0,1296 \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 \end{aligned}$$

$$K_0 = 0,13$$

3.2.2. Eje tandem con ruedas anchas

$$\begin{aligned} E.E. &= (K_1 \cdot K_2 \cdot K_3)^4 \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 = K_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 = \\ &= (0,6 \cdot 1,2 \cdot 1)^4 \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 = 0,2687 \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 \end{aligned}$$

$$K_0 = 0,27$$

3.2.3. Eje tandem con ruedas sencillas

$$\begin{aligned} E.E. &= (K_1 \cdot K_2 \cdot K_3)^4 \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 = K_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 = \\ &= (0,6 \cdot 1,2 \cdot 1,3)^4 \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 = 0,767 \left(\frac{P}{P_0} \right)^4 \end{aligned}$$

$$K_0 = 0,77$$

3.3. EQUIVALENCIA DE UN EJE TRIDEM

3.3.1. Eje tridem con ruedas gemelas

$$E.E. = (K_1 \cdot K_2 \cdot K_3)^4 \left(\frac{P}{P_0}\right)^4 = K_c' \left(\frac{P}{P_0}\right)^4 =$$

$$= (0,45 \cdot 1 \cdot 1)^4 \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^4 = 0,041 \left(\frac{P}{P_0}\right)^4$$

$$K_c' = 0,04$$

3.3.2. Eje tridem con ruedas anchas

$$E.E. = (K_1 \cdot K_2 \cdot K_3)^4 \left(\frac{P}{P_0}\right)^4 = K_c'' \left(\frac{P}{P_0}\right)^4 =$$

$$= (0,45 \cdot 1,2 \cdot 1)^4 \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^4$$

$$K_c'' = 0,08$$

3.3.3. Eje tridem con ruedas sencillas

$$E.E. = (K_1 \cdot K_2 \cdot K_3)^4 \left(\frac{P}{P_0}\right)^4 = K_c''' \left(\frac{P}{P_0}\right)^4 =$$

$$= (0,45 \cdot 1,2 \cdot 1,3)^4 \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^4 = 0,2428 \left(\frac{P}{P_0}\right)^4$$

$$K_c''' = 0,24$$

4. COMPARACION ENTRE METODOS

Para establecer la comparación, hay que tener en cuenta que el caso más favorable que se presenta

según el modelo de la OCDE, para cualquier tipo de eje, es el caso de eje con ruedas gemelas. Aunque la norma española no especifica nada a este respecto se supone que los ejes son con ruedas gemelas, ya que en cualquier otro supuesto, la diferencia en ejes equivalentes sería mucho mayor.

La fórmula a emplear para calcular el número de ejes tipos a los que equivale un eje de peso P es la misma en los dos casos, lo que varía es el coeficiente K :

$$E.E. = K \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^4$$

Como puede verse en la Tabla 2, si se aplican los criterios de la OCDE el número de ejes equivalentes aumenta considerablemente en todos los casos, excepto en el caso de eje simple con ruedas gemelas, en donde $K_a = K_a' = 1$. Por tanto el Factor de Equivalencia de vehículo pesado aumentaría de la misma manera, y por lo tanto la agresividad o daño del tráfico pesado en el firme sería mucho mayor, o, dicho de otra manera, se precisarían firmes mucho mejores para soportar el mismo número de toneladas.

Los coeficientes a emplear en la norma española para obtener el mismo número de ejes equivalentes que se obtendría con las fórmulas de la OCDE serían:

$$\frac{K_a'}{K_a} = \frac{X}{1,4} \quad X = 2,1$$

$$\frac{K_c'}{K_c} = \frac{X}{2,325} \quad X = 3,3$$

Norma	EJES EQUIVALENTES TIPOS DE UN EJE DE PESO P								
	SIMPLE			TANDEM			TRIDEM		
	RUEDAS	FORMULA	COEFICIENTE	RUEDAS	FORMULA	COEFICIENTE	RUEDAS	FORMULA	COEFICIENTE
5.1.1.C.	Sin especificar	$K_a \left(\frac{P}{P_0}\right)^4$	$K_a = 1$	Sin especificar	$K_b \left(\frac{P}{P_0}\right)^4$	$K_b = 0,09$	Sin especificar	$K_c \left(\frac{P}{P_0}\right)^4$	$K_c = 0,03$
OCDE	Gemelas	$K_a' \left(\frac{P}{P_0}\right)^4$	$K_a' = 1$	Gemelas	$K_b' \left(\frac{P}{P_0}\right)^4$	$K_b' = 0,13$	Gemelas	$K_c' \left(\frac{P}{P_0}\right)^4$	$K_c' = 0,04$
	Anchas	$K_a'' \left(\frac{P}{P_0}\right)^4$	$K_a'' = 2,07$	Anchas	$K_b'' \left(\frac{P}{P_0}\right)^4$	$K_b'' = 0,27$	Anchas	$K_c'' \left(\frac{P}{P_0}\right)^4$	$K_c'' = 0,08$
	Sencillas	$K_a''' \left(\frac{P}{P_0}\right)^4$	$K_a''' = 2,85$	Sencillas	$K_b''' \left(\frac{P}{P_0}\right)^4$	$K_b''' = 0,77$	Sencillas	$K_c''' \left(\frac{P}{P_0}\right)^4$	$K_c''' = 0,24$

TABLA 2.

Por tanto, las fórmulas de la 6.1.1.C. quedarían:

$$\text{(Tandem) } E.E. = 2,1 \left(\frac{P/2}{P_0} \right)^4$$

$$\text{(Tridem) } E.E. = 3,3 \left(\frac{P/3}{P_0} \right)^4$$

Esta fórmula no figura en la norma.

A modo de ejemplo, se adjunta el cálculo de Ejes Equivalentes para las dos configuraciones de vehículos pesados más representativos y abundantes en el espectro del tráfico pesado en España, calculados en condiciones de máxima carga teórica legal por ambos métodos. Las cargas (t) que se han supuesto para estos dos tipos de vehículos son:

	1.º eje	2.º eje	3.º eje	PMA
CAMION 2 EES	7	13	-	20
SEMITRÁMOLOLE 4 EES	7	13	15	38

	OCDE	6.1.1.C.	%
CAMION 2 EES	1,24	1,08	15
SEMITRÁMOLOLE 4 EES	1,71	1,4	20

TABLA 3. FACTOR DE EQUIVALENCIA

Como se puede comprobar, en el cálculo por el método de la OCDE se obtienen valores de Ejes Equivalentes superiores a los obtenidos según la norma 6.1.1.C.

CONCLUSIONES

Como puede verse en la Tabla 2, la aplicación de los criterios de cálculo del Factor de Equivalencia por el método de la OCDE supone unos coeficientes K_i mayores que los definidos por la norma 6.1.1.C. Esto implica un aumento en el número de ejes equivalentes de 13 t para cada tipo de vehículo.

No obstante, el conocimiento real de la influencia en el firme de un vehículo pesado requiere un estudio más profundo y riguroso que la aplicación de uno u otro método.

En este sentido y debido a la gran importancia que ello supone en el dimensionamiento y duración de un firme, el Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX está realizando trabajos utilizando métodos analíticos, con el fin de determinar la agresividad de los distintos tipos de vehículos pesados de la flota del tráfico español, y comparar sus resultados con los distintos criterios existentes del cálculo del Factor de Equivalencia.