

LONGITUDES VIRTUALES DE CARRETERA

Por LUIS CABALLERO DE RODAS,
Ingeniero de Caminos,

El presente trabajo, como dice el autor en el texto, tiene por objeto obtener unas cifras que den idea de la influencia de las rampas en el consumo de los vehículos que utilizan la carretera.

Decir que el tráfico por carretera tiene hoy una gran importancia es repetir un lugar común; pero como no obstante es un hecho cierto, creo que merece una gran atención. El cálculo de los gastos de movimiento de un vehículo tiene interés y más aún la comparación económica de itinerarios, lo que lleva aparejada la posible determinación de la rentabilidad de las variantes que puedan proyectarse.

La "nota" que presentamos tiene por objeto llegar a unas cifras que den idea de la influencia de las rampas en el consumo de los vehículos que utilizan la carretera. No hace falta hacer constar que se supone una superficie de rodadura perfecta: esto no es lo real, pero es tan variable que imaginamos cómo podría tenerse en cuenta el estado del firme de un modo cómodo para el cálculo. Hay que tener en cuenta que si para medir una magnitud precisa definir la igualdad y la suma, no se nos ocurre a base de qué se podría decir que dos carreteras están igualmente malas ni que la A es tan deficiente como la B y la C juntas, es decir, $A = B + C$.

En el cálculo que sigue se obtienen relaciones que, utilizadas, suministran un orden de magnitud de la influencia de la rampa en el consumo del vehículo; la experimentación *objetiva* puede acusar un factor de corrección en un itinerario determinado, pero entiendo que en el cálculo de rentabilidad de una variante entran unos elementos: ahorro de tiempo, cubiertas, etc., cuyo valor se estima a base de hipótesis que no tienen un grado de confianza superior al que ofrecen las relaciones que aquí se deducen.

La base de los cálculos que se hacen es la proporcionalidad entre la potencia desarrollada por un motor y su consumo de combustible. Si H' es la potencia de un motor de cuatro tiempos, el consumo por segundo es $\frac{W}{R \cdot L}$, en donde R es el rendimiento y L la potencia calorífica del carburante; es, en definitiva, $K \cdot H'$.

La potencia desarrollada por un motor de cuatro tiempos para vencer las varias resistencias que se oponen a su movimiento, viene dada por la fórmula:

$$W = \frac{v}{\rho} \left[P \left(\varphi \pm \sin \alpha + \frac{1}{g} \frac{dv}{dt} \right) + \frac{\mu C_x}{2} S v^2 \right]$$

v = velocidad en metros por segundo.

ρ = rendimiento de las transmisiones; varía de 0,90 en directa a 0,80 en las otras velocidades.

P = peso del vehículo.

φ = coeficiente que refleja las resistencias en el eje motor; varía poco, de 0,01 a 0,018.

$\sin \alpha$ = influencia de la pendiente (rampa).

$\frac{1}{g} \frac{dv}{dt}$ = esfuerzo para cambiar de velocidad el vehículo.

μ = masa específica del aire, 0,125 Kg./m.³.

C_x = coeficiente que depende de la finura aerodinámica; varía poco de los valores siguientes: 0,90 para los camiones, 0,50 para los turismos (baja a 0,20 para los vehículos de carena especial).

S = área opuesta al movimiento.

Si suponemos un vehículo en horizontal y velocidad uniforme, la fórmula de la potencia queda reducida:

$$W = \frac{v}{\rho} \left(P \varphi + \mu \frac{C_x}{2} S v^2 \right).$$

Si $S = 2 \text{ m.}^2$, el término que acusa la resistencia del aire será:

$$0,125 \frac{0,50}{2} \times 20^2 = 0,063 v^2; \quad v^2 = \frac{17^2}{13};$$

podemos tomar 0,005 17^2 .

Para $P = 1.000 \text{ Kg.}$, $\varphi = 0,012$, formamos el siguiente cuadro (núm. 1):

CUADRO NÚM. 1.

v	ρ	$\frac{v}{\rho}$	$P \frac{v}{\rho}$	(a) $P \frac{v}{\rho}$	V	V^2	$0,005 V^2$	$0,005 V^2 \frac{v}{\rho}$	(b) $0,005 V^2 \frac{v}{\rho}$	$a + b$
m/s			Kgm.	HP.	Km./h.			Kgm.	HP.	HP.
8,33	0,9	9,25	111,—	1,48	30	900	4,50	41,62	0,55	1,93
11,11	0,9	12,34	148,—	1,97	40	1.600	8,00	98,72	1,31	3,28
13,88	0,9	15,42	185,—	2,46	50	2.500	12,50	192,75	2,57	5,03
16,66	0,9	18,51	222,—	2,95	60	3.600	18,00	333,18	4,44	7,49
19,44	0,9	21,60	259,—	3,45	70	4.900	24,50	529,20	7,05	10,50
22,22	0,9	24,69	296,—	3,94	80	6.400	32,00	790,08	10,53	14,47
25,00	0,9	27,78	333,—	4,43	90	8.100	42,50	1.118,65	15,75	20,18
27,78	0,9	30,86	370,—	4,93	100	10.000	50,00	1.543,00	20,57	27,04
30,56	0,9	33,95	407,—	5,42	110	12.100	60,50	2.054,00	27,38	32,80
33,33	0,9	37,03	444,—	5,91	120	14.400	72,00	2.666,16	35,55	41,46

Puede observarse la enorme influencia de la resistencia del aire; esto da lugar a un instructivo ejemplo: Si al vehículo se le pone en la boca un equipaje de superficie 0,50 m.² y marcha a 100 Km./h., la potencia precisa será:

$$4,93 + 22,11 + 0,25 \times 22,11 = 32,57 \text{ HP.} \pm 27,04 \times 1,20.$$

El aumento de potencia (y de consumo requerido) viene reflejado por el coeficiente 1,20; de modo que si consideramos un coche corriente que gaste 11 litros de gasolina por 100 Km., el coste de transporte de la maleta será:

$11 \times 0,20 \times 7 = 15,40$ ptas./100 Km. en valor absoluto, pero es más interesante el relativo aumento de coste del recorrido, 20 por 100.

La estructura de la fórmula que da W , pone de manifiesto la importancia de P y v ; para que se vea claramente vamos a calcular las potencias precisas en las mismas condiciones, pero para un camión de 10 000 Kg. de peso y una superficie de resistencia de 7 m.² = $10\,000 \times 0,012 = 120$ (cuadro núm. 2).

En este caso el término que corresponde a la resistencia del aire se expresa por:

$$0,125 \frac{0,90}{2} \times 7 v^2 = 0,394 v^2 = 0,030 P^2:$$

Hemos visto antes que la fórmula completa de la potencia es (en movimiento uniforme):

$$W = \frac{v}{\rho} [P (\varphi + \text{sen } \alpha) + \mu \frac{C_x}{2} S v^2];$$

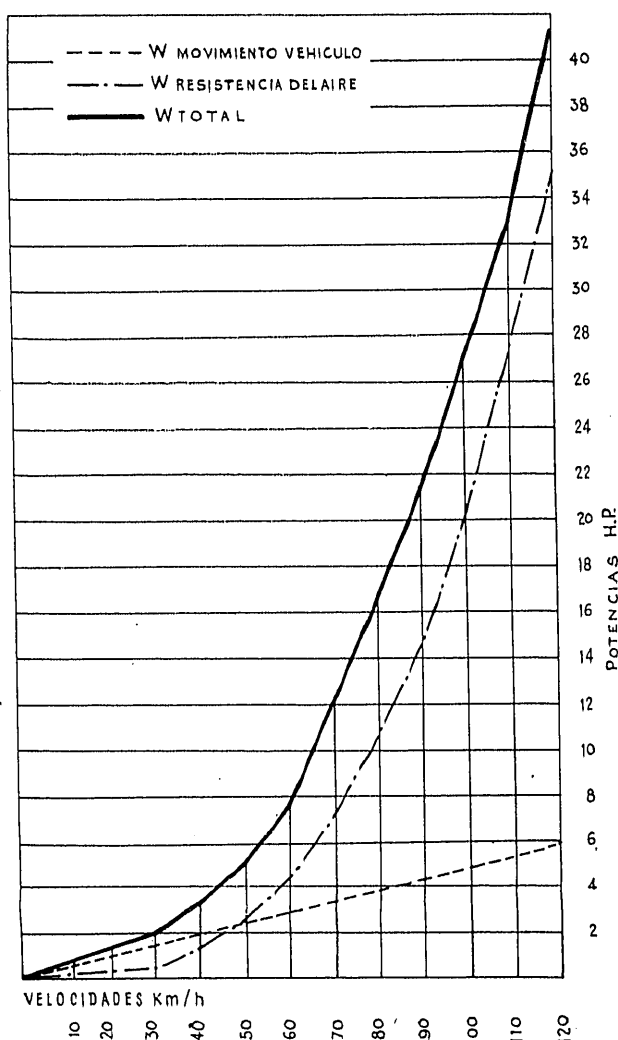
que podemos escribir:

$$W = \frac{v}{\rho} P \text{ sen } \alpha + \frac{v}{\rho} P \varphi + \frac{v}{\rho} \mu \frac{C_x}{2} S v^2.$$

Por tanto, si tomamos como variable $\text{sen } \alpha$, la ley de variación de W para los valores de α utilizados aquí, puede considerarse una línea recta; por otra parte, para los ángulos α que dan la inclinación de las rasantes, sensiblemente $\text{sen } \alpha = \text{tg } \alpha$.

CUADRO NÚM. 2.

v	ρ	$\frac{v}{\rho}$	$P \frac{v}{\rho}$	(a) $P \frac{v}{\rho}$	V	V^2	$0,030 V^2$	$0,030 V^2 \frac{v}{\rho}$	(b) $0,030 V^2 \frac{v}{\rho}$	$a + b$
m/s			Kgm.	HP.	Km./h.			Kgm.	HP.	HP.
8,33	0,90	9,25	1.110,—	14,80	30	900	27	249,75	3,33	18,13
11,11	0,90	12,34	1.480,—	29,73	40	1.600	48	592,32	7,89	27,62
13,88	0,90	15,42	1.850,—	24,67	50	2.500	75	1.156,50	15,42	40,09
16,66	0,90	18,51	2.221,—	29,61	60	3.600	108	1.999,08	26,66	56,27



Precisa tener en cuenta que al subir una rampa, la velocidad posible varía con su inclinación, el cambio de velocidades hace que ρ varíe. Vamos a suponer que los turismos cambian de velocidad (de directa a 3.ª ó 2.ª) en el momento que $\text{tg } \alpha = 0,05$. Que V de $\text{tg } \alpha = 0,06$ a $\text{tg } \alpha = 0,10$, es de 40 Km./h. y de $\text{tg } \alpha = 0,10$ a 0,14, $V = 30$ Km./h. Por bajo de $\text{tg } \alpha = 0,05$ suponemos que la velocidad no disminuye como para cambiar de marcha en el coche.

El término $\frac{V}{\rho}$, a partir de $\text{tg } \alpha = 0,06$, será $\frac{V}{0,08}$

Los resultados del cálculo se reúnen en el cuadro núm. 3, en cuya última columna figuran los coeficientes amplificadores de la longitud de la carretera, las rampas varían de centésima en centésima, y se han tomado las velocidades base que se expresan. Complemento del cuadro es el gráfico.

Una interpolación lineal permite calcular los coeficientes para otras rampas; por ejemplo, sea el coeficiente amplificador M :

$$\left. \begin{array}{l} \text{tg } \alpha = 0,74 \\ M \text{ tg } \alpha = 0,07 = 3,86 \\ M \text{ tg } \alpha = 0,08 = 4,26 \\ M \text{ buscado, } 4,02. \end{array} \right\} 0,40 - 0,04 \times 4 = 0,16.$$

Creemos que no hay la menor dificultad en pasar de los números del cuadro a otros con diferentes valores de Pv , pero para mayor claridad lo pondremos de manifiesto.

Término $P \frac{V}{\rho}$. Si varían P o v , el factor de co-

CUADRO NÚM. 3.

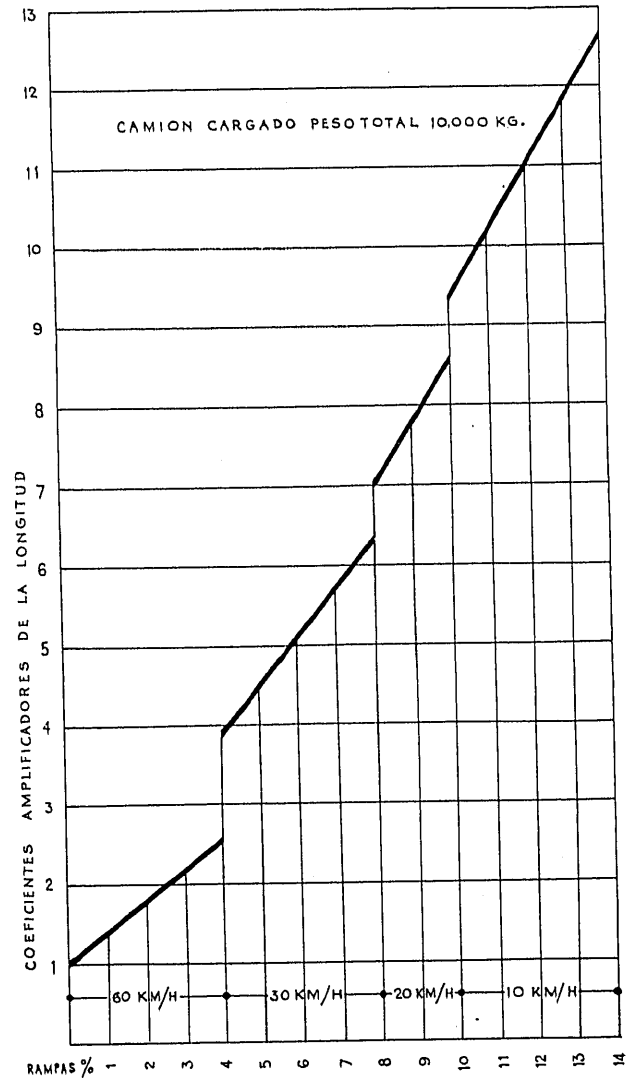
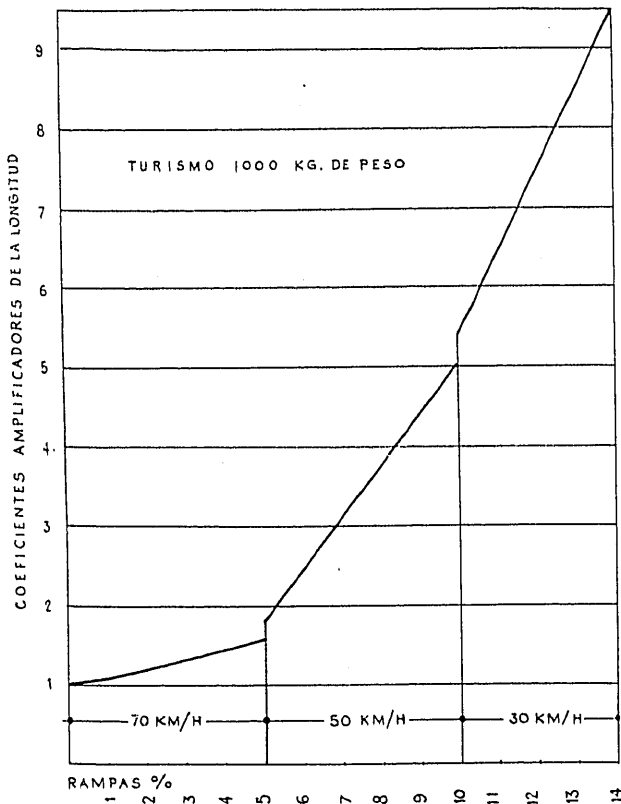
tg	V m/s	ρ	$\frac{V}{\rho}$	V Km./h.	$P \frac{V}{\rho}$ HP.	$0,005 V^2 \frac{V}{\rho}$ HP.	$P \text{ tg } \alpha \frac{V}{\rho}$ HP.	W' HP.	W HP.	$\frac{W'}{W}$
0,01	19,44	0,9	21,57	70	3,45	7,05	1,23	11,73	10,50	1,12
0,02	19,44	0,9	21,57	70	3,45	7,05	2,46	12,96	10,50	1,23
0,03	19,44	0,9	21,57	70	3,45	7,05	3,69	14,19	10,50	1,35
0,04	19,44	0,9	21,57	70	3,45	7,05	4,92	15,42	10,50	1,47
0,05	13,88	0,8	17,35	50	2,77	2,89	11,56	17,22	5,66	3,04
0,06	13,88	0,8	17,35	50	2,77	2,89	13,88	19,54	5,66	3,45
0,07	13,88	0,8	17,35	50	2,77	2,89	16,19	21,85	5,66	3,86
0,08	13,88	0,8	17,35	50	2,77	2,89	18,50	24,16	5,66	4,26
0,09	13,88	0,8	17,35	50	2,77	2,89	20,81	26,47	5,66	4,67
0,10	8,33	0,8	10,41	30	1,66	0,62	13,88	16,16	2,28	7,08
0,11	8,33	0,8	10,41	30	1,66	0,62	15,26	17,54	2,28	7,69
0,12	8,33	0,8	10,41	30	1,66	0,62	16,65	18,93	2,28	8,30
0,13	8,33	0,8	10,41	30	1,66	0,62	18,04	20,32	2,28	8,78
0,14	8,33	0,8	10,41	30	1,66	0,62	19,43	21,71	2,28	9,52

CUADRO NÚM. 4.

lg	$\frac{v}{m/s}$	ρ	$\frac{v}{\rho}$	$\frac{v}{Km/h}$	$\frac{P \frac{v}{\rho}}{HP}$	$0,03 \frac{v^2}{\rho} \frac{v}{HP}$	$\frac{P \lg a \frac{v}{\rho}}{HP}$	$\frac{W'}{HP}$	$\frac{W}{HP}$	$\frac{W'}{W}$
0,01	16,66	0,9	18,51	60	29,61	26,64	24,66	80,91	56,25	1,44
0,02	16,66	0,9	18,51	60	29,61	26,64	49,32	105,57	56,25	1,88
0,03	16,66	0,9	18,51	60	29,61	26,64	63,98	120,23	56,25	2,14
0,04	8,33	0,8	10,41	30	16,65	3,74	55,51	81,91	20,39	4,01
0,05	8,33	0,8	10,41	30	16,65	3,74	69,40	89,79	20,39	4,40
0,06	8,33	0,8	10,41	30	16,65	3,74	83,27	103,66	20,39	5,08
0,07	8,33	0,8	10,41	30	16,65	3,74	97,15	117,54	20,39	5,76
0,08	5,54	0,8	6,92	20	11,06	1,12	73,81	85,89	12,19	7,05
0,09	5,54	0,8	6,92	20	11,06	1,12	83,04	95,22	12,19	7,80
0,10	2,77	0,8	3,46	10	5,53	—	46,13	51,66	5,53	9,34
0,11	2,77	0,8	3,46	10	5,53	—	50,74	56,27	5,53	10,17
0,12	2,77	0,8	3,46	10	5,53	—	55,35	60,88	5,53	11,00
0,13	2,77	0,8	3,46	10	5,53	—	60,00	65,53	5,53	11,85
0,14	2,77	0,8	3,46	10	5,53	—	64,60	70,13	5,53	12,70

rección será $\frac{P}{P'}$ o $\frac{v}{v'}$; si varían P, v, ρ , tendremos como término para deducir el nuevo valor:

$$\frac{\frac{P v}{\rho}}{\frac{P' v'}{\rho'}} = \frac{P v \rho'}{P' v' \rho}$$



Término $0,005 \frac{V^2}{\rho}$, factor de corrección por área de choque, y para V' , v , diferentes $\frac{V^2 v}{V'^2 v'}$.

La potencia precisa para vencer la rampa se corregirá con

$$\frac{1000}{P'} \frac{P'}{1000} \text{ o } \frac{v \rho'}{v' \rho}.$$

Vamos a presentar el mismo cálculo para un camión, en las condiciones siguientes:

De $\text{tg } \alpha = 0,01$	a	0,03	»	$\rho = 0,90$
De $\text{tg } \alpha = 0,04$	a	0,14	»	$\rho = 0,80$
De $\text{tg } \alpha = 0,01$	a	0,04	»	$V' = 60 \text{ Km./h.}$
De $\text{tg } \alpha = 0,04$	a	0,08	»	$V' = 30 \text{ Km./h.}$
De $\text{tg } \alpha = 0,08$	a	0,10	»	$V' = 20 \text{ Km./h.}$
De $\text{tg } \alpha = 0,10$	a	0,14	»	$V' = 10 \text{ Km./h.}$

Disponemos el cálculo, como en el cuadro núm. 3, y obtenemos el núm. 4.

Como expresión más clara de los resultados obtenidos en los cuadros núms. 2 y 4, se dibujan los gráficos correspondientes. Para su posible aplicación práctica, creo que bastará considerar la inclinación de las rasantes, expresadas en milésimas.

En cuanto a las pendientes, vemos en el cuadro número 3 que a partir de $\text{tg } \alpha = 0,05$, el término que acusa el esfuerzo para subir es superior a las otras dos; por tanto, la potencia para bajar una pendiente es nula por encima de aquel valor. Pero es nula teóricamente, porque se marcha con el motor de freno, ayudado por los mecánicos. Dentro de los límites corrientes y habida cuenta de que las pendientes no se abordan con velocidad nula, pueden considerarse como horizontales a los efectos de consumo.

La hipótesis no es exacta, sino sencilla; tampoco tenemos en cuenta el efecto de abordar una rampa a cierta velocidad, en cuyo caso la inercia ayuda, a veces, de modo apreciable.

Insisto en la idea expuesta al principio: exponemos órdenes de magnitud para comparar; con idéntico criterio, siempre la relación será estimable a los fines perseguidos.