

## Kinematic study of a vehicle on the Tazón restrained ramps

**Nelson L. Falcón Veloz**

*Departamento de Física, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad de Carabobo  
Apdo. Postal 129. Valencia 2001, Venezuela. E-mail: nfallon@thor.uc.edu.ve*

### Abstract

In the present paper the restrained ramps are revised under kinematic conditions. More specifically, the Tazón restrained ramp in the Coche-Tejerías freeway, near Caracas (Venezuela). This kinematic study show that, in their energy dissipators, the longitud and friction coefficient is not enough to break cars, and present an inadequate road design. New conditions above friction coefficient, contrapendent and longitud are shown and maybe employed in other restrained ramps in freeways.

**Key words:** Energy dissipator, restrained ramps.

## Cinemática de un vehículo sobre las rampas de frenado de Tazón

### Resumen

Las rampas de frenado existentes en el tramo Hoyo de la Puerta-Tazón de la autopista Coche-Tejerías fueron ideadas, a principio de los años setenta, para detener los vehículos que pierden su capacidad de frenado. Las mismas sin embargo, no han cumplido su cometido, siendo muy frecuentes los daños materiales y pérdidas de vidas en los vehículos que ingresan a ellas. Se presenta un estudio cinemático, bajo condiciones ideales, de los disipadores de energía de las rampas que demuestran que su longitud y contrapendiente han sido subestimadas. Se proponen alternativas para su rediseño y se calculan los valores mínimos de longitud de modo de cumplir su cometido.

**Palabras clave:** Disipadores de energía, rampas de frenado.

### Introducción

Las rampas de frenado son tramos de desincorporación de la vía principal, provistos de dispositivos disipadores de energía, los cuales permiten reducir la velocidad de los vehículos hasta la completa paralización de la marcha. En las autopistas y vías de alta circulación las zonas laterales deforestadas y las islas anchas fungen como tales, en donde la arena o los arbustos actúan como agentes friccionantes para liberar parte de la energía cinética (disipador de energía) y permitir la paralización de la marcha [1].

En las zonas de topografía sinuosa [2], con pendientes pronunciadas y descendientes, es necesario colocar tramos de desincorporación para

el frenado con mecanismos de liberación de energía más eficientes que los anteriormente citados. Un posible mecanismo de liberación de energía es el uso de "trampas de arena" como los existentes en la autopista Coche-Tejerías, en el tramo Hoyo de la Puerta-Tazón, las cuales fueron diseñadas y construidas en el bienio 1973-74 en base al estudio del Ingeniero De Val Colina [3]. En el proyecto citado, se supone una rampa de frenado sin contrapendiente para el cálculo de la distancia mínima de frenado, mediante la conservación de la energía del vehículo que se desplaza en ella. Para ello se asumió [3], sin justificación explícita, valores de 0,5 en los coeficientes de roce cinético entre el móvil y la arena, y entre los neumáticos y la superficie; por lo que las velocidades típicas de

los vehículos a la entrada de las rampas de frenado y las longitudes mínimas que deben tener las mismas, fueron subestimadas.

Las estadísticas aportadas por la Oficina de Control de Accidentes [4] revelan en promedio 187 accidentes anuales en el tramo Hoyo de la Puerta Tazón y 04 accidentes anuales con decesos y/o heridos dentro de las rampas de frenado en el período 1974-1997. Debe destacarse que los accidentes sin heridos y/o decesos, que ocurren en dichas rampas, no son registrados por no requerir del concurso de las autoridades (no ocasionan daños materiales a terceros). La frecuencia de accidentes de tránsito con pérdidas materiales y humanas en el tramo en cuestión, e incluso dentro de las propias rampas de frenado, hacen presumir que la implantación de las mismas no ha cumplido con su cometido.

En el presente trabajo se evalúa la cinemática de estas rampas de frenado. Primeramente revisaremos las consideraciones del diseño original de las rampas. Posteriormente se calculan expresiones para la distancia mínima de frenado de los vehículos en la citada vía (estudio cinemático) y las condiciones que deben cumplir las rampas de frenado. Finalmente se discuten los resultados y proponen alternativas para el rediseño de las mismas.

### Rampas de Frenado de Tazón

La primera de las rampas de frenado existentes en la Autopista Coche-Tejerías (Km 7 en la progresiva+00 hacia Caracas). Está formada por tres sectores: uno de 58,8 m de longitud de pavimento asfáltico, otra de 20,5 m de pavimento rígido (concreto) y una trampa de grava de 55 m de longitud.

El perfil topográfico muestra una pendiente variable: -5,56% desde su acceso hasta el comienzo de la trampa de grava (disipador de energía), donde principia una contrapendiente de +3,6%. El hecho de que la pendiente inicial sea casi el doble que la contrapendiente al final de la misma ocasiona un incremento adicional de la velocidad del vehículo cuando entra al disipador de energía, disminuyendo la eficiencia de éste.

De la granulometría del material del disipador de energía (trampa de grava) se estableció [5] que está compuesto por partículas de ½ pulga-

das de sección transversal (44%), 5/8 pulgadas (20%) y 3/8 pulgadas (18%). Las ondulaciones e irregularidades (camellones incluidos) en la distribución de la grava pueden producir un momento angular en el tren delantero del vehículo y el consecuente giro de este, que podría ocasionar la pérdida de control de la dirección del móvil, haciendo que se vuelque o se salga de la rampa de frenado mucho antes de detenerse.

La rampa de frenado II (ubicada en el kilómetro 5) presenta características similares a las antes descritas, posee sólo un sector asfáltico de 36,8 metros de longitud y otro, el disipador de energía o trampa de grava, de 75 m de longitud. Al igual que la rampa I, su perfil topográfico muestra una pendiente variable: descendiente (-4,6%) en el sector asfáltico y ascendente (contrapendiente) de +2,8% en el disipador. Al inicio de la rampa la cota es de 101,1 m. s.n. y al final es de 101,5 m s.n. careciendo de una pendiente que asimile parte de la energía cinética del móvil en energía potencial gravitacional. La granulometría del material es muy similar al de la rampa I. Este material posee un coeficiente de fricción cinético con el caucho de  $0,25 \pm 0,05$  el cual fue determinado empíricamente, en el Departamento de Física de la FACYT-UC, a través del ángulo crítico en el cual el neumático principia su movimiento sobre un plano inclinado  $\beta$  grados respecto a la horizontal, en estas condiciones [5] se tiene:

$$\mu_c = \tan \beta \quad (1)$$

Se calculará la velocidad de los móviles al entrar a la rampa de frenado, mediante la conservación de la energía mecánica, supuesto que comienza su descenso desde una altura  $h$  con una energía inicial  $E_i$  y llega al borde mismo de la rampa de frenado con energía final  $E_f$ .

De acuerdo con el diagrama de fuerzas de la Figura 1, el trabajo  $T$  realizado por la fuerza de roce con el pavimento, para un vehículo de masa  $m$ , es:

$$|T| = -\mu_p mgd \quad (2)$$

donde  $g$  es la constante de aceleración de gravedad y  $\mu_p$  es el coeficiente de fricción cinético entre los neumáticos y el asfalto.

Por otra parte, de la geometría de la Figura 1 se observa que la distancia  $d$  recorrida por el

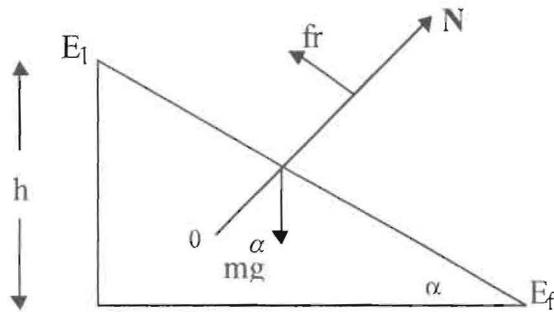


Figura 1 Diagrama de fuerzas en el plano descendente Hoyo de la Puerta - Tazón.

vehículo, desde que principia su descenso sin frenos hasta la entrada a la rampa es:

$$d \cong \frac{h}{\sin \alpha} \quad (3)$$

De la conservación de la energía mecánica se tiene, usando la ecuación (3) y el hecho de que la energía inicial ( $E_i$ ) es la suma de las energías cinética y potencial:

$$\frac{1}{2} m v_0^2 + mgh - \mu_p mgh \cot \alpha = \frac{1}{2} m v_f^2 \quad (4)$$

Con lo cual la velocidad del vehículo al inicio de la rampa, en función de la velocidad  $v_f$  del móvil antes de perder la capacidad de frenado, es:

$$v_f = \pm \sqrt{v_0^2 + 2gh(1 - \mu_p \cot \alpha)} \quad (5)$$

Nótese que si  $h = 0$  se obtiene el caso simple, utilizado por el Ing. De Val Colina en el diseño original de las rampas, y que no es aplicable a las rampas de frenado de Tazón, en donde la prolongada pendiente descendente incrementa significativamente la velocidad de los vehículos.

En condiciones de humedad, aceite en el pavimento, etc. el coeficiente de fricción  $\mu_p$  será despreciable y el cuadrado de la velocidad del vehículo justo antes de entrar a la rampa habrá aumentado una cantidad igual a  $2gh$ . Conocida la velocidad del móvil al inicio de la rampa de frenado, se puede estimar la longitud de la rampa y la magnitud de la contrapendiente para que el móvil se detenga completamente. Sea  $\beta$  la inclinación de la rampa de frenado (en contrapendiente), empleando el teorema de conservación de la energía mecánica y suponiendo que el móvil

carece de energía cinética al final de la rampa de longitud  $d$ , se cumple que:

$$\frac{1}{2} m v_f^2 = mgd \sin \beta + \mu mgd \cos \beta \quad (6)$$

en donde  $\mu$  es el coeficiente de roce cinético entre los neumáticos y el material friccionante de la superficie del disipador de energía (trampa de arena, grava, etc.).

De las ecuaciones (6) y (7) se obtiene, la longitud máxima de frenado del móvil o equivalentemente la mínima longitud de la rampa de frenado:

$$d = \frac{v_0^2 + h(1 - \mu_p \cot \alpha)}{\mu \cos \beta + \sin \beta} \quad (7)$$

Si los ángulos  $\beta$  y  $\alpha$  son ambos nulos, se obtiene el caso particular de una rampa sin contrapendiente y en terreno plano, como es el caso estudiado en el proyecto de De Val Colina. Se evaluarán las ecuaciones (1) y (7) para algunos casos particulares referentes a las rampas de frenado 1 y 2 de Tazón, las cuales tienen contrapendientes de  $\beta_1 = 2,86^\circ$  y  $\beta_2 = 5,71^\circ$  respectivamente.

Suponiendo que un vehículo pierde su capacidad de frenado cuando su velocidad de circulación es la reglamentaria (15 km/h para vehículos de carga) y que su altura respecto a la entrada de la rampa de frenado es de sólo 14 metros (correspondiente a la cota 1070 a 1056 para la rampa 1 y de 113,4 a 994 para la rampa 2) se obtienen distancias de frenado de 127 y 147 m respectivamente, lo cual excede las longitudes máximas de los disipadores de energía existentes en Tazón. Si la velocidad es de 40 km/h (correspondiente a la velocidad de circulación de vehículos de hasta 3 toneladas de peso) se obtienen distancias tan grandes como 382 y 328 m. En condiciones de óptima fricción ( $\mu = 0,5$ ) las distancias de frenado serían de 81 y 74 m (para velocidades de 15 km/h) y de hasta 208 y 192 m (para velocidades de 40 km/h). En ambos casos se excede las longitudes de los disipadores de energía y en el caso real de fricción con grava  $\mu = 0,25$  excede también la longitud total de las rampas de frenado.

Si el vehículo pierde su capacidad de frenado a distancias mayores respecto a la entrada de

las rampas, es decir a 300 metros o más las distancias de frenado pueden incrementarse hasta 600 o 800 m, lo cual parece explicar porque la mayoría de los móviles que ingresan a las rampas de frenado terminan chocando fuertemente contra el final de las mismas o volcándose por colisión contra los camellones antes de detener su marcha suavemente en el interior del dissipador de energía.

### Conclusiones

Los resultados indican que las actuales rampas de frenado existentes en Tazón no tienen la longitud mínima necesaria para disipar la energía cinética de los vehículos que pierdan su capacidad de frenado. El uso de rampas de frenado con contrapendiente uniforme, dissipadores de energía de arena fina y longitudes de entre 4 a 5 veces las longitudes de las rampas actuales parece ser una alternativa eficaz, y desde el punto de vista físico correcta para disminuir la energía cinética de los móviles. Otra posibilidad es incrementar la longitud de las rampas utilizando el hombrillo, llenándolo de grava y haciendo que este funcione todo como una rampa de mayor longitud, pues la orografía de la zona podría limitar la extensión de las rampas existentes.

### Referencias Bibliográficas

1. Parrilli, Z. "Normas para el Diseño geométrico de rampas en Condiciones Críticas". Tesis de Grado. UCV. Caracas. 1987.
2. Carciente, J. (1984) Carreteras: Estudio y Proyecto. Edit. Vegas, Caracas.
3. De Val Colina, C. "Autopista Coche-Tejerías Tramo Hoyo de la Puerta-Tazón, control de accidentes provocados por vehículos sin frenos". Informe Técnico (No publicado). Ministerio de Transporte y Comunicaciones. Caracas. 1974.
4. Estadísticas de la oficina de Control de Accidentes (Comunicación personal). Ira. Compañía Destacamento Vial N° 50 Fuerzas Armadas de Cooperación. Ministerio de la Defensa. Paracotos Estado Miranda. Venezuela.
5. Luque, B. y Padrón, C. "Caracterización de las rampas de Frenado en la Autopista Coche-Tejerías". Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad José María Vargas. (1993) 34-50. Caracas.
6. Sandor, B. Ingeniería mecánica: Dinámica. Edit. Prentice-Hall México. (1980) 561 y ss.

Recibido el 6 de Octubre de 1997

En forma revisada el 24 de Mayo de 1999