

***FUERZAS DESARROLLADAS EN
EL FRENADO DE VEHÍCULOS***

INTRODUCCIÓN

Si se hiciera una lista de los sistemas de un automóvil por orden de importancia, posiblemente se colocaría al principio de la lista al sistema de frenos. Muchos conductores han experimentado la inconveniencia de un motor que no arranca debidamente. Recuerdan una noche de invierno cuando el sistema de calefacción de un automóvil solamente emitía aire frío, han experimentado fallas del sistema y se han dado cuenta de lo que les ha costado en comodidad, conveniencia, tiempo y dinero. No obstante, una falla o una avería del sistema de frenos con frecuencia puede causar daños en la propiedad, accidentes graves o inclusive muertes. Un mecánico de frenos debe recordar siempre que la calidad de mantenimiento de los frenos se mide únicamente en términos de seguridad.

El auto es un móvil que se desplaza bajo control del conductor. Es acelerado con la fuerza (torque) y potencia del motor y desacelerado con la resistencia del mismo, pero sobre todo con la aplicación de los frenos, el sistema primordial de seguridad. Un auto es una mole que pesa entre unos 800 y 2500 Kg. (según su tamaño y equipamiento) cuya inercia varía con la velocidad; para controlarla, disminuirla o anularla, se utilizan los frenos instalados en cada una de las cuatro ruedas.

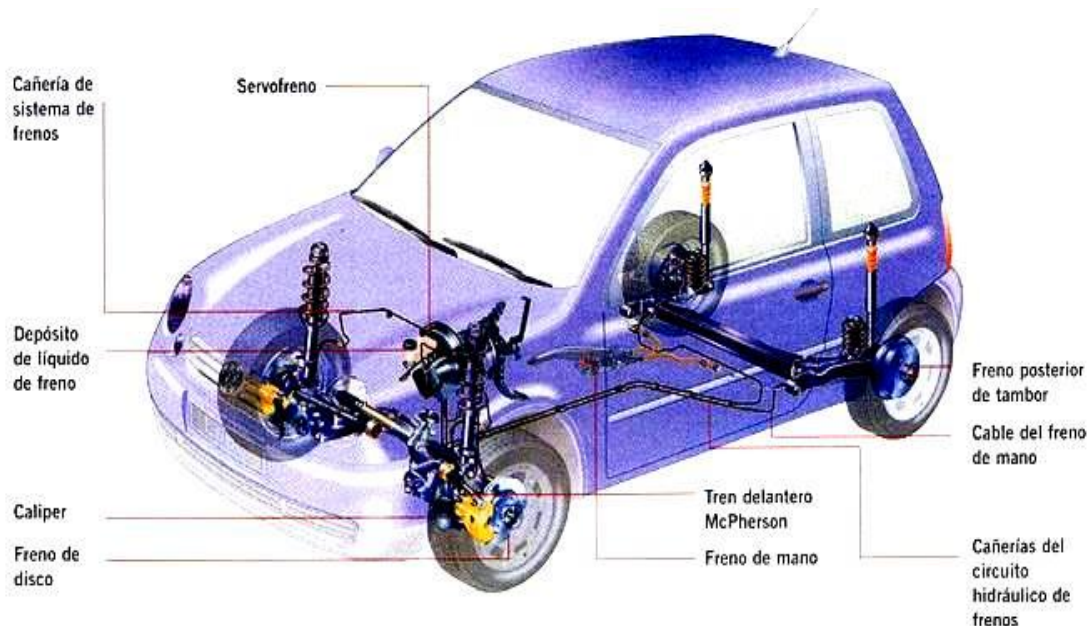
Los frenos deben responder lo más exactamente posible a la solicitud del conductor. Deben ser al mismo tiempo sensibles y graduales para modular la velocidad, y asegurar la detección completa y la inmovilización total del vehículo.

Los frenos trabajan por rozamiento entre una parte móvil solidaria a las ruedas y otra parte fija solidaria a la estructura del auto. Al aplicarse los frenos, la parte fija se aprieta a la parte móvil y por fricción se consigue desacelerar el auto. Esta fricción emite calor y absorbe la energía de la inercia (a 120 Km/h un auto de 1.200 Kg aplica una

potencia de frenado de más de 200 HP, lo que disipará calor hasta en una temperatura de 800°C). Para que los frenos sean más eficaces, las superficies en rozamiento deben asegurar un máximo contacto.

Los frenos están diseñados para desacelerar (retardar) y parar el vehículo, o para facilitar su aparcamiento en una cuesta. Constituyen, por tanto, un equipo extremadamente esencial en los automóviles para la seguridad de la conducción.

En la sociedad movilizada de hoy día, se supone que los frenos son de gran eficiencia y durabilidad, para que el vehículo se pueda parar no sólo con seguridad y prontitud, sino en cualquier y bajo cualquier condición.



Un vehículo en marcha no se puede parar inmediatamente cuando el motor se desconecta del tren de fuerza, debido a la inercia (la tendencia de un objeto en movimiento a continuar moviéndose). Esta inercia se tiene que reducir para conseguir la parada del vehículo.

El motor convierte la energía térmica en energía cinética (energía de movimiento) para impulsar el vehículo. Contrariamente, los frenos cambian la

energía de esta moción (energía cinética) en energía térmica para el vehículo.

Generalmente, los frenos de los vehículos actúan haciendo que un objeto fijo haga presión contra un objeto de rotación. El efecto de frenado se obtiene de la fricción que se genera entre dos objetos.

ANÁLISIS DE FUERZAS DESARROLLADAS EN EL FRENADO DE VEHÍCULOS

El proceso de frenado es vital para el control de los vehículos automóviles. A continuación se va a proceder a hacer un análisis del mismo, para el cual se modelizará el vehículo y las solicitaciones que actúan sobre el mismo como se representa en el siguiente gráfico :

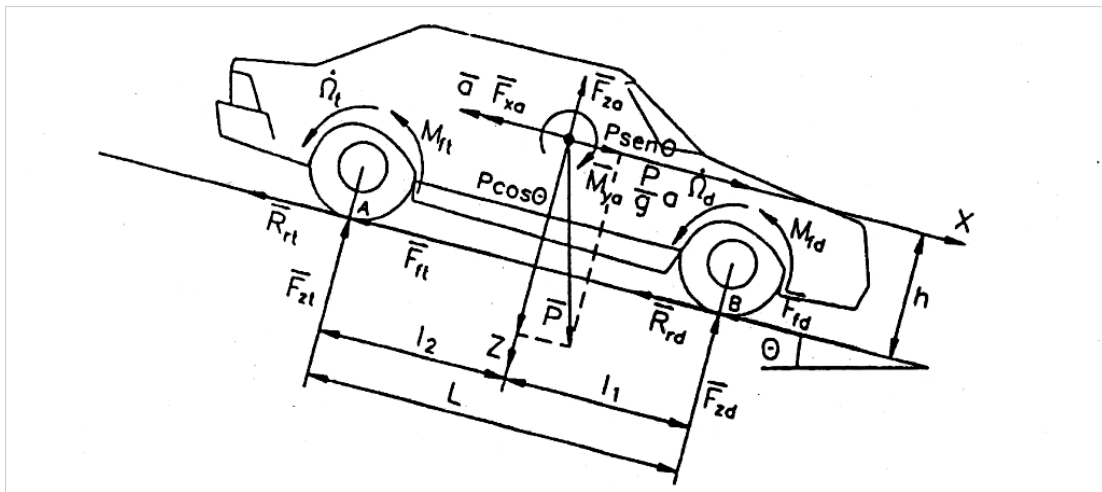


Figura 1: Solicitaciones que actúan sobre un vehículo en el proceso de frenado

A continuación se enuncian las fuerzas más importantes que toman parte en el proceso de frenado y el significado de las mismas :

Pares de frenado (M_{fd} y M_{ft}) : El sistema de frenos del vehículo tiene como misión crear estos pares que se oponen al movimiento de las ruedas y que hacen aparecer las fuerzas de frenado.

Fuerza de frenado (F_{fd} y F_{ft}) : Un vehículo en movimiento dispone de una energía cinética o trabajo que es equivalente a la fuerza de impulsión por la velocidad media del desplazamiento. Este automóvil sufre una aceleración negativa o desaceleración cuando se aplica una fuerza igual y de sentido

contrario a la fuerza que produce movimiento. Es decir, se debe aplicar una fuerza de frenado que anule a la fuerza de impulsión. El efecto de frenado consiste en transformar la energía cinética producida por el vehículo movimiento en calor producido por el rozamiento entre los elementos mecánicos de los frenos. La fuerza de frenado tiene el mismo valor que la fuerza de adherencia o rozamiento y por lo tanto se calculará mediante el producto entre el peso que gravita sobre una rueda y el coeficiente de adherencia entre ella y el suelo, y tiene sentido contrario a la fuerza de impulsión. Como la fuerza de impulsión está determinada por la resistencia que oponen las ruedas a su desplazamiento, la fuerza de frenado que hay que aplicar para detener el vehículo está también en función de la resistencia obtenida en las ruedas.

Componentes del peso (P): Cuando el vehículo circula por terreno inclinado el peso se descompone en dos fuerzas. La primera de ellas en sentido longitudinal de las marcha ($P \cdot \text{Sen}\theta$) se opone o ayuda al movimiento del automóvil, según este esté circulando por una pendiente ascendente o descendente. La segunda es en realidad el peso normal a la superficie de rodadura ($P \cdot \text{Cos}\theta$), que en el caso de que esta sea horizontal, es la única componente del peso, sin embargo en este caso su valor se ve reducido lo que conlleva una disminución de la adherencia. Podemos obviar esta disminución ya que el ángulo de la pendiente (θ) suele ser muy pequeño en condiciones operativas normales del vehículo.

Resistencia a la rodadura (R_{rd} y R_{rt}) : Cuando pensamos en un coche deportivo lo primero que nos viene a la cabeza es un motor potente, enormes discos de frenado y una dura suspensión que lleva al vehículo a través de una curva tomada con rapidez. Muy a menudo se asume que la maniobrabilidad y la adherencia dependen sólo del trabajo de muelles y amortiguadores. Esta tendencia es especialmente evidente entre los

conductores que mejoran sus coches acercándolos al suelo y endureciéndolos, esperando que el efecto sea una conducción más correcta.

Por desgracia son pocos los que se dan cuenta de que el elemento clave que influye en la conducción del coche no son los amortiguadores sino los neumáticos. La aceleración, el frenado, la fuerza centrífuga sufrida durante los giros, todo esto es sufrido a través de los neumáticos y, más en concreto, por la pequeña superficie en contacto con la calzada.



La adherencia del neumático aumenta la seguridad en carretera.

La adherencia de los neumáticos es la fricción entre dos superficies, la de la goma del neumático y la del suelo. De todas formas no es un valor estable, depende de la temperatura, la presión y, lo que es más, de lo resbaladizo que sea el suelo. Algo curioso es que el máximo nivel de adherencia se alcanza cuando el neumático se desliza un poco. ¿Por qué ocurre esto? Observemos este fenómeno más de cerca. La goma interacciona con el suelo de una manera muy específica. La adhesión tiene lugar cuando las moléculas de la goma entran en contacto directo con el suelo. La goma es un polímero mientras que el asfalto es una estructura cristalina. Cuando ambas estructuras se encuentran a alta velocidad las

moléculas de la goma cambian de forma. Algunas uniones se rompen, otras nuevas se crean y ese proceso se repite cíclicamente mientras una superficie se mueve a lo largo de la otra. La rotura y presionado de las uniones moleculares absorben una energía llamada, precisamente, fuerza de adhesión. Esta fuerza alcanza su valor máximo cuando la diferencia de velocidades es de entre 0.03 y 0.06 metros por segundo.

Cuando la diferencia de velocidades es alta, el fenómeno de la adhesión deja lugar en un grado significativo a la histéresis, derivada de la deformación de la superficie del neumático. Como efecto de este proceso algunas partes de la goma sufren compresión y otras extensión. Para que la extensión sea posible los átomos de la goma deben moverse unos en relación a otros. A este proceso le debe acompañar la fricción que produce el calentamiento del neumático. Este proceso absorbe una energía muy parecida a la adhesión sólo que en este caso se la denomina fricción interna. Entonces, ¿cuándo será mayor la adherencia del neumático? La adherencia ideal la alcanzamos en el momento en que viajamos al límite en el que el neumático se desliza sobre el suelo (incluso superándolo ligeramente), la mezcla de la goma es blanda mientras que el suelo es liso y está caliente. Entonces, en el contacto con la superficie domina la fuerza de la adhesión responsable del efecto de pegado de la goma al asfalto.

Volvamos al coche que está tomando una curva a alta velocidad. Cuanto más rápido vayamos mayor será la fuerza centrífuga que hará efecto en él. Mediante los muelles y amortiguadores suavizamos los movimientos violentos, el coche conduce su masa a las ruedas aumentando, de esa manera su presión sobre el suelo. La adherencia es, en esencia, producto de la fricción del neumático con el suelo. La adherencia del neumático es, en esencia, producto de la fricción del neumático sobre el suelo y de la presión ejercida sobre él. Esta presión aumenta en las curvas, como efecto de la fuerza centrífuga que traslada el peso del vehículo a las ruedas externas. Aunque, para obtener buenos resultados, el coeficiente de fricción entre el

neumático y el asfalto debe ser igualmente alto. Especialmente si se tiene en cuenta que toda la fuerza centrífuga debe ser compensada por la adherencia de una superficie del tamaño de una tarjeta postal (esa es el área de un neumático que está en contacto con el suelo).

Lo importante que es la adherencia es algo que saben muy bien los pilotos de carreras, que en muchas ocasiones ven en los neumáticos una manera de conseguir mejores tiempos en cada vuelta. Hay quien opina que los neumáticos son en un 75% responsables de la adaptación del vehículo a la pista. En siguiente lugar aparecen los sistemas de amortiguado, el balance de frenos y la posición de la caja de cambios. Porque, ¿qué es la potencia y la velocidad si no se pueden llevar a las curvas?

Sabiendo esto, los fabricantes de neumáticos intentan conseguir una buena mezcla de gomas para que, en unas condiciones concretas, su producto alcance los parámetros más altos posibles. Por supuesto, cada parámetro es resultado de un compromiso dado que alta adherencia del neumático y dinamismo no van en pareja. Como ejemplo, los neumáticos duros se caracterizan por la larga distancia que pueden usarse sin cambiarlos aunque a cambio de una menor adherencia. En cambio, un neumático adherente, de una mezcla muy blanda se gasta muy rápido, exigiendo un mayor trabajo a altas temperaturas (Por eso en F1 se dice, a menudo, que el piloto tiene que calentar neumáticos).

Mucho más difícil lo tienen los fabricantes de neumáticos civiles, ya que tienen que compaginar la alta adherencia del neumático exigida por los usuarios con la máxima durabilidad. Lo que es más, los neumáticos tienen que ser capaces de actuar bien en lluvia y un gran rango de temperaturas de trabajo. Los equipos de ingenieros, para satisfacer las exigencias de sus clientes elaboran, durante años, mezclas y formas de bandas de rodadura que son un compromiso entre todas las características antes mencionadas.

En la práctica, no hay neumáticos idealmente universales, que funcionen bien en todas las condiciones.

Acciones aerodinámicas: La resistencia aerodinámica (F_{xa}) solo toma valores relevantes para altas velocidades, en el resto de los casos se puede despreciar frente a las fuerzas de frenado y el error cometido nos mantendrá del lado de la seguridad, por lo que se hace frecuentemente.

La fuerza de sustentación aerodinámica (F_{za}) y el par de cabeceo (M_{ya}) modifican las cargas dinámicas que soportan las ruedas (F_{zd} y F_{zt}) y, en consecuencia, la fuerza adherente. Sin embargo suelen también despreciarse ya que solo son significativas a altas velocidades, en cuyo caso si que es conveniente tenerlas en cuenta ya que si no, nos encontraríamos del lado de la inseguridad.

Resistencia del motor y transmisión: La resistencia que ofrece la transmisión puede ser despreciada en cálculos normales de frenado. La resistencia que opone el motor constituye, en muchos casos, un factor importante en el proceso de frenado. La potencia, como el par resistente, que ofrece el motor cuando está conectado a las ruedas a través de la transmisión, es significativa cuando este gira a gran número de revoluciones pero disminuye su importancia al hacerlo la velocidad, hasta hacerse pequeña en el último intervalo de un proceso de frenado.

En bajadas prolongadas, especialmente para el caso de vehículos pesados, la retención efectuada por el motor es de suma importancia para preservar los elementos de fricción de los frenos de calentamientos y desgastes excesivos. En el caso de convertidores de par no es aprovechable este fenómeno ya que normalmente estos no transmiten potencia de las ruedas al motor.

Por último es importante reseñar que en el caso de que se requieran altas desaceleraciones o frenadas de emergencia el motor no solo no retiene sino que debe ser frenada la inercia que este lleva por lo que, en estos casos, siempre se debe de desacoplar.

CONDICIONES IMPUESTAS POR LA ADHERENCIA : El bloqueo de las ruedas de un eje produce efectos negativos, ya que en una situación de bloqueo, el coeficiente de fricción entre el neumático y la calzada adquiere un valor inferior al de máxima adherencia ($\mu = 0,75$), lo cual produce el deslizamiento del neumático sobre la calzada. En consecuencia, cuando las ruedas se bloquean, disminuye el valor de la fuerza de frenado respecto a la máxima fuerza potencial que puede obtenerse en condiciones de rodadura previas al bloqueo de las ruedas, ya que el coeficiente de fricción rueda / suelo cae a valores muy bajos del orden de $\mu = 0,2$ ó inferior en pavimentos mojados.

El efecto anterior, con ser de gran interés, no es el más importante. El bloqueo de las ruedas supone la superación de la adherencia neumático – suelo en la dirección longitudinal, razón por la cual, la interacción entre ambos elementos será incapaz de ofrecer una resistencia que equilibre una posible fuerza lateral, por muy pequeña que sea. Como, por otra parte, resulta en la práctica imposible que se produzca una situación exenta de todo esfuerzo lateral el vehículo podrá experimentar un desplazamiento lateral (viento, reparto de carga, etc.) cuyo efecto es diferente según sea el eje cuyas ruedas se bloquean.

Si el eje que se bloquea es el **trasero** la adherencia de las ruedas de dicho eje con el suelo disminuye fuertemente como se ha visto antes, por lo que cualquier inestabilidad puede provocar el giro del vehículo sobre su eje haciendo perder totalmente la estabilidad direccional. Es decir, si en una situación de conducción normal nosotros tiramos con violencia del freno de mano, hasta llegar a bloquear los neumáticos, el vehículo tenderá a derrapar de la parte trasera hasta situarse a contradirección.

Si las ruedas que se bloquean son las del eje **delantero**, las fuerzas de inercia aplicadas al centro de gravedad y las de rozamiento o adherencia en las ruedas, proporcionan un momento de guiñada que disminuye con el valor de la perturbación lateral. Esto provoca que el sistema sea estable, es decir,

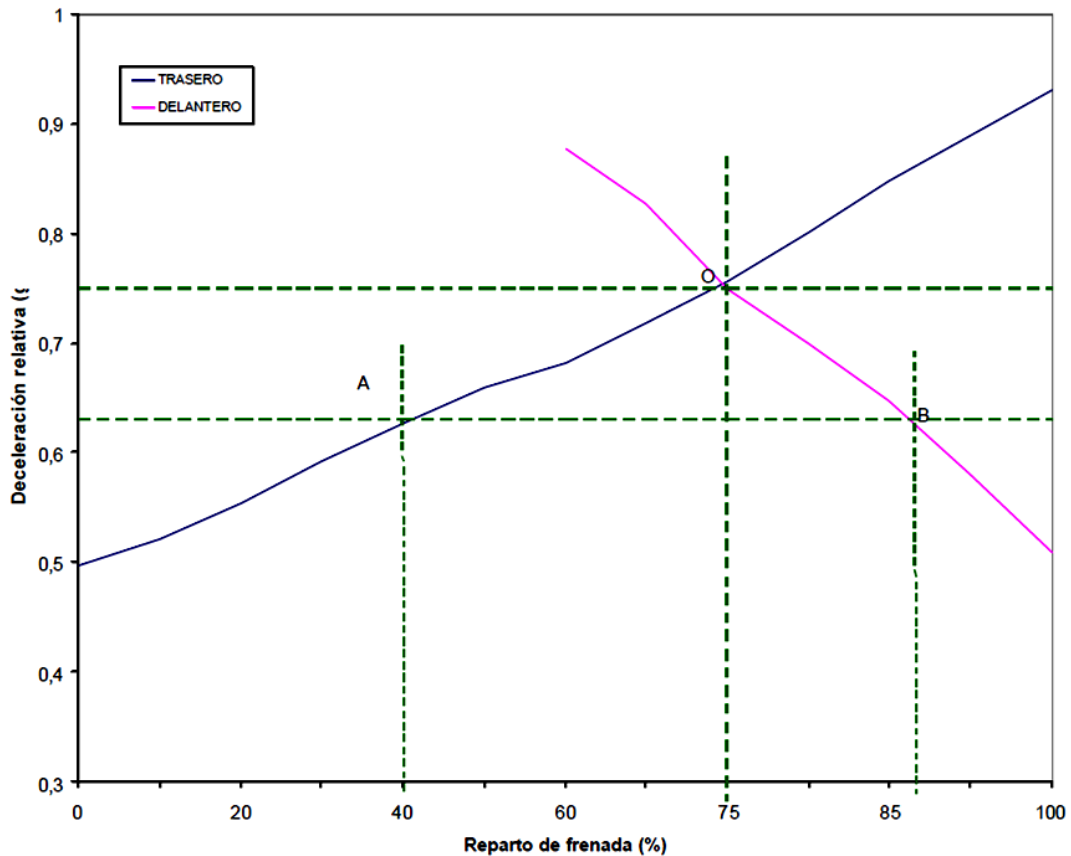
las fuerzas tienden a hacer que el vehículo recupere su posición longitudinal. En esta situación se origina una cierta pérdida de control direccional, menos grave, en términos generales, que la inestabilidad provocada por el bloqueo del eje trasero y el vehículo, tiende en principio a seguir una trayectoria recta sin obedecer a la dirección del mismo.

REPARTO ÓPTIMO DE LAS FUERZAS DE FRENADO : Cuando el vehículo se encuentra estático, la masa del vehículo se reparte entre el eje delantero y el eje trasero, con valores que el diseño del vehículo ha provisto. Casi todos los vehículos comerciales de nuestros días, son ligeramente más pesados en la zona delantera que en la trasera. Ya que, no solo, el motor está ubicado en la parte delantera, sino que además al traccionar (de tracción mecánica) en ese mismo eje, caja de cambio, diferencial, las transmisiones, etc. se encuentran en el eje delantero.

El menor peso en el eje trasero implica que el diseño del reparto de fuerzas sea fundamental para no alcanzar el **bloqueo** de las ruedas traseras. Además como ya se ha comentado anteriormente, cuando nosotros frenamos aparece un momento de cabeceo alrededor del centro de gravedad, que genera una transferencia de carga del eje trasero al eje delantero. Esto significa, que no solo el eje trasero es menos pesado que el delantero, sino que además por dinámica vehicular en el eje trasero y siempre que se accione el freno, se va a descargar transfiriendo parte de esa carga al eje delantero.

El valor de la transferencia de carga que se produce al frenar del eje trasero al delantero, depende de la altura del centro de gravedad del vehículo y de la batalla del vehículo, es decir, de su distancia entre ejes. Debido a todas estas variables, la fuerza frenante que se aplicará al eje delantero no es igual a la del eje trasero. Lo mismo debe decirse para las fuerzas que se aplican durante la aceleración. Si hiciésemos los cálculos para saber que porcentaje de la frenada debe de producirse en el eje delantero y cual en el

eje trasero, considerando un coeficiente de fricción neumático – suelo de valor $\mu = 0,8$. El reparto sería de un 0,75 % de la frenada en las ruedas delanteras; y 0,25 % en las ruedas traseras (Punto O).



Gráfica que representa el reparto óptimo de frenada entre ambos ejes.

Para un valor de adherencia entre el neumático y el suelo de valor $\mu = 0,80$. El punto O, de intersección de ambas curvas, corresponde al frenado óptimo y, por tanto, a un reparto de esfuerzos de frenado como se ha descrito anteriormente. Si en el vehículo se estableciese un reparto de frenada con un 86% de frenada en el eje delantero y un 14% en el eje trasero (Punto B), se alcanzaría antes el bloqueo en las ruedas delanteras, consiguiéndose una desaceleración máxima 0,62, muy por debajo del valor óptimo. Si por el contrario, el coeficiente de reparto de frenada se establece

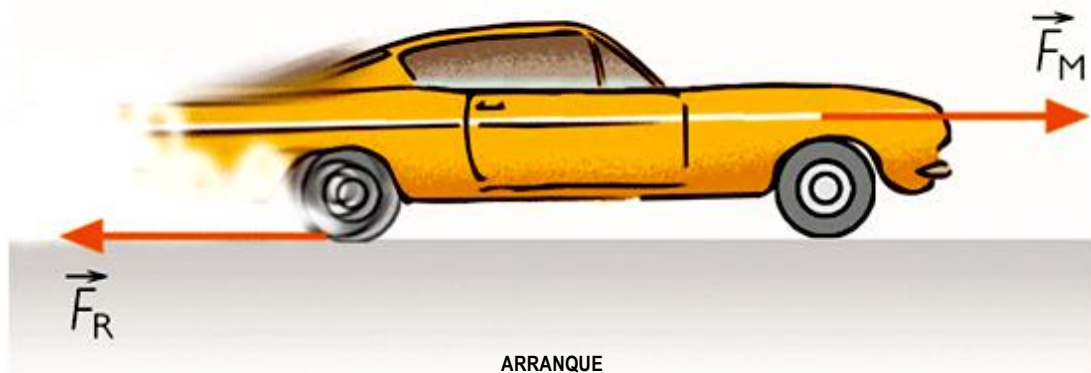
en un 40% en las ruedas delanteras y un 60% en las traseras,(punto A). Bloquearían antes las ruedas traseras y el límite de la deceleración quedaría establecido, también en un valor de 0,62 muy por debajo del valor óptimo y además con los perjuicios que provoca el bloqueo del eje trasero, visto anteriormente. Como vemos la mejor solución es la representada en el punto O con un reparto de frenada de un 75% en el eje delantero y un 25% en el trasero.

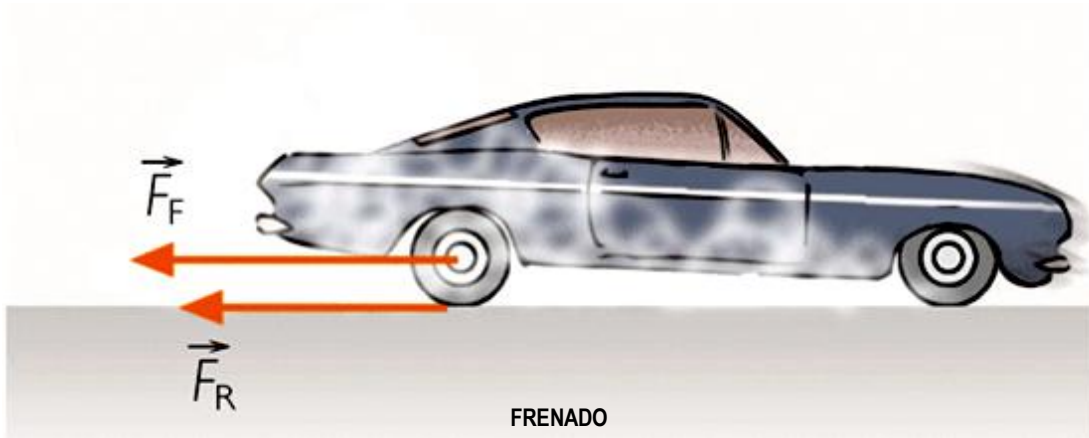
Para que estos valores de reparto de frenada se mantengan dentro de la máxima adherencia consiguiendo así la mayor deceleración, los vehículos van equipados con reguladores de presión que consiguen la variación de la presión del circuito trasero para evitar el bloqueo de los neumáticos y las consecuencias negativas que ya se han comentado.

CONCLUSIONES

Un vehículo en movimiento dispone de una energía cinética o trabajo que es equivalente a la fuerza de impulsión por la velocidad media del desplazamiento. Este automóvil sufre una aceleración negativa o desaceleración cuando se aplica una fuerza igual y de sentido contrario a la fuerza que produce movimiento. Es decir, se debe aplicar una fuerza de frenado que anule a la fuerza de impulsión. El efecto de frenado consiste en transformar la energía cinética producida por el vehículo movimiento en calor producido por el rozamiento entre los elementos mecánicos de los frenos. La fuerza de frenado tiene el mismo valor que la fuerza de adherencia o rozamiento y por lo tanto se calculará mediante el producto entre el peso que gravita sobre una rueda y el coeficiente de adherencia entre ella y el suelo, y tiene sentido contrario a la fuerza de impulsión. Como la fuerza de impulsión está determinada por la resistencia que oponen las ruedas a su desplazamiento, la fuerza de frenado que hay que aplicar para detener el vehículo está también en función de la resistencia obtenida en las ruedas.

La fuerza de rozamiento y la de frenado están dirigidas en sentido opuesto al sentido de movimiento. Cuanto mayores sean el rozamiento y la fuerza de frenado, el automóvil tendrá mayor facilidad para frenar.





BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio F et al., “Teoría de los vehículos automoviles”, Publicaciones ETSIIM, Madrid 1995.
- Arias-Paz, “Manual de automoviles”, 2005, CIE Inveriones Editoriales Dossat 2000.
- Bastow, D, “Car Suspension and Handling”, 1993, Society of Automotive Engineers, Inc.
- Boletín Oficial de la Comunidad de Madrid, de 24/02/2004
- Boletín Oficial del Estado no261, de 29/10/2008.”Instrucción Técnica para la instalación de reductores de velocidad y bandas transversales de alerta en carreteras de la Red de Carreteras del Estado”
- “Circulación vial y accidentes de tráfico”. Ovidio Franco Rodriguez, 2004.
- “Recomendaciones de la Dirección General de Obras Públicas para la ejecución de bandas transversales de alerta en Carreteras del sistema viario de la Comunidad Valenciana”. Generalitat Valenciana, Consellería de Obras Publicas. (2006).
- Raul Frías Fernández, Proyecto Fin de Carrera, “Influencia del templado del tráfico sobre dinámica vehicular”,2007.
- www.DIARIOMOTOR.com. “Baden Inteligente de Mexico” (27/10/2009)
- www.PRENSAMOTOR.com.”Baden Inteligente presentado en el IFEMA por Badenova”. (27/10/2009)