

OBRAS PUBLICAS

Carreteras

245

CONSIDERACIONES TECNICAS

El desarrollo del automóvil y las velocidades alcanzadas por estos vehículos, exigen una técnica en lo que se refiere a la construcción de firmes de las carreteras, distinta a las características que se usaron para los carreteables destinados a la tracción animal.

Entre nosotros tiende a desaparecer casi por completo el tráfico de sangre dentro de nuestras carreteras, y así solamente vemos esta clase de vehículos dentro de nuestras ciudades, limitado a determinados trasportes livianos de cortas distancias.

En la mayoría de los países las redes de carreteras han sido el resultado de una serie de transformaciones sucesivas de vías que en un principio obedecieron solo a necesidades regionales o locales, y que luego han necesitado de variaciones o transformaciones para poderlas adaptar al plan general.

Casi todos los países europeos han pasado por un desarrollo gradual, pues en casi todos ellos existió en grande escala el tráfico de tracción animal, tanto para pasajeros como para carga, lo que dió por resultado el estudio de las nuevas características de los vehículos, para la adaptabilidad de las vías existentes a ellos. Del estudio concienzudo de las corrientes principales de tráfico y de la adaptabilidad, han surgido las nuevas redes.

Entre nosotros no ha existido un desarrollo gradual que nos hubiera permitido un desarrollo progresivo, pues el tráfico de tracción animal no existió en el país sino en pequeña escala y en muy pocas regiones de topografía suave, de tal suerte que nuestras carreteras surgieron con el automóvil, pero con las características de construcción de los carreteables de tracción animal. Esto ha traído como consecuencia natural la rápida destrucción de los firmes inadecuados con que se construyeron, limitación de velocidades, molestias de todo género para los conductores, y crecidos gastos de sostenimiento.

Es de notarse también la falta de legislación para el tráfico de carreteras; así por ejemplo vemos carreteras angostas construídas para tráficos livianos, en donde se permite el tráfico de camiones de gran tonelaje que no solamente destruyen los firmes, sino que monopolizan las vías con detrimento para todos los otros vehículos.

Es necesario que entremos a estudiar el plan conjunto de carreteras, no solo nacionales sino también departamentales y municipales, y unificar hasta donde ello sea posible los diversos planes, para evitar que se hagan como ele-

mentos aislados, sin la debida relación que debe existir para tener un plan de conjunto armónico.

La preparación de un plan de carreteras debe basarse en los siguientes principios:

1o.—Considerar como puntos de partida los centros de obtención de materias primas, los principales centros industriales, los centros de utilización y transformación de productos agrícolas y mineros, y los centros de consumo de todos estos productos agrícolas, mineros e industriales.

2o.—Deben formarse como factores para determinar las características de tal red, las condiciones del tráfico de pasajeros y mercancías propias de cada región, del tráfico internacional y del procedente de los puertos, y en su caso de los aeródromos.

3o.—Las vías de penetración que servirán para el desarrollo de regiones que darán nuevas posibilidades agrícolas o industriales.

4o.—Debe considerarse que las carreteras son el complemento de los ferrocarriles, y del mas moderno de los elementos de tráfico, la navegación aérea. Por tanto, debe tenerse en cuenta las relaciones que deben existir entre sus tráficos y la mutua influencia ejercida sobre la economía general.

5o.—La construcción, disposición y afirmado debe hacerse de acuerdo con el tráfico, tonelaje e importancia.

Las carreteras construídas para tracción animal no se adaptan, como es lógico, a las necesidades del tráfico automóvil. Por esta razón, casi todos los países al desarrollarse éste, se preocupan de modificar sus carreteras, especialmente por lo que se refiere a los afirmados. Como es natural, tomaron la iniciativa aquellos países en que el tráfico automóvil se desarrolló más rápidamente.

La construcción de firmes modernos se desarrolló también, lógicamente, en aquellos países que tenían en sus propios suelos o en sus colonias los elementos necesarios para esta clase de firmes.

No entraré aquí a hablar de especificaciones o características técnicas de trazado y construcción, pues casi todos nuestros ingenieros y entidades se han preocupado en demasía por el estudio técnico de las características generales como son: pendiente, curvatura, cambios de rasantes, etc.; solamente quiero entrar al estudio de los esfuerzos que los vehículos ejercen sobre las carreteras, para tener los elementos necesarios para el estudio de los firmes o pisos.

Los principales esfuerzos que los vehículos ejercen sobre las carreteras son los siguientes:

1o.—*Esfuerzo de presión e impacto*, desarrollados entre las ruedas de cualquier clase de vehículos y la superficie del firme.

2o.—*Esfuerzos tangenciales*, desarrollados por las ruedas motrices de los vehículos mecánicos.

3o.—*Esfuerzos de succión*, producidos por los vehículos mecánicos como consecuencia de la velocidad.

Del libro titulado "La Moderna Construcción de Carreteras", extractamos los apartes relacionados con estos esfuerzos.

Presión del Impacto.—El peso total del vehículo, (peso propio mas la carga) se transmite a la carretera por intermedio de las ruedas. La presión específica, esto es, la presión por unidad de superficie (centímetro cuadrado), es el cociente de la carga que actúa sobre cada rueda, dividida por la superfi-

cie de apoyo de la rueda sobre el suelo,
$$p = \frac{P}{F} = \text{presión específica en kilogramo por centímetro cuadrado.}$$

La presión así determinada es un esfuerzo estático que no da una idea clara de los esfuerzos que la marcha de un vehículo engendra sobre la carretera.

En general, la rueda no se encuentra en reposo, sino que se halla animada de una velocidad que llega a ser muy grande en los automóviles. Por otra parte, la superficie de la carretera no es completamente lisa, sino que aún en los firmes más perfectos y tersos está llena de desigualdades y cubierta de grandes y pequeñas depresiones. Por consiguiente a las cargas estáticas deben adicionarse esfuerzos dinámicos.

La determinación de estos esfuerzos no es sencilla, pues depende, en primer lugar, de como se realiza la transmisión, que puede ser por cuerpos rígidos como en los casos de llantas metálicas, o a través de una llanta constituida por una materia elástica, neumáticos o bandajes de caucho.

Esfuerzos estáticos.—La superficie de apoyo F de la rueda sobre el suelo, depende de la anchura de la llanta, y de la longitud de la línea de contacto de la rueda sobre el firme, la cual a su vez depende del diámetro de la rueda. Mientras que el ancho de la llanta es una magnitud invariable, la longitud de la línea de contacto depende de la mayor o menor elasticidad del firme o revestimiento.

Por esta razón los reglamentos de policía de carreteras, al establecer limitaciones de cargas, consideran la carga por centímetros de ancho de llanta. La reglamentación prusiana prescribe un límite de 125 kg. por centímetro de ancho de llanta; para las llantas de acero y para vehículos de llantas elásticas de 150 kg. por centímetro de ancho de llanta, medida en la base del mazo o neumático.

Para pasar estos valores de cargas por centímetro de ancho de llanta, a la presión específica por centímetro cuadrado, es necesario determinar la longitud de la línea de contacto del perímetro de la rueda con la carretera en el sentido del eje del vehículo.

Como se dijo, la magnitud de esta línea depende no solo de la elasticidad del firme, sino también del diámetro de la rueda. Podemos establecer las siguientes relaciones (fig. 1):

$$\begin{aligned}(r - e)^2 + s^2 &= r^2 \\ s^2 &= (2r - e) e\end{aligned}$$

Siendo e muy pequeño con relación a r , podemos despreciar e^2 y entonces se tendrá:

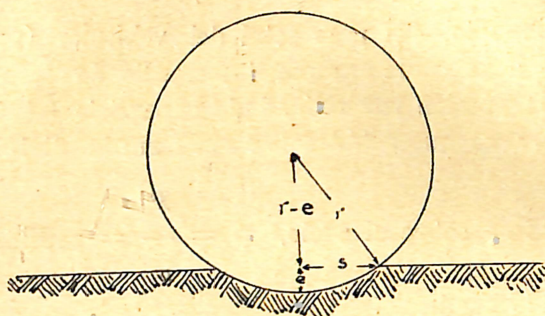


Fig. 1.

$$s^2 = 2e \cdot r = e \cdot d$$

$$s^2 = 2e \cdot r = e \cdot d$$

Por consiguiente, podremos determinar la longitud de la línea de contacto $2s$ conociendo el diámetro de la rueda y la profundidad de la depresión producida por la rueda, que depende de la elasticidad del firme. Si e es por ejemplo dos cms., y d igual a un metro, entonces $s = 0.14$ y $2s = 0.28$ m.; y si suponemos que la carga por centímetro de llanta es de 125 kg., la presión científica sobre la carretera será $p = 4.5$ kg/cm.².

Estos cálculos serían exactos si la presión se aplicara de un modo uniforme en toda la superficie de contacto, pero este no es el caso, por lo menos en lo que se refiere a repartición de presiones en el sentido del movimiento del vehículo. La experimentación ha demostrado que la presión en los bordes de la zona de contacto es nula, mientras que en el centro tiene un valor igual a una vez y media la presión media, variando según una ley parabólica. La presión máxima, es pues, una vez y media el valor calculado, es decir que para el caso del ejemplo dicha presión sería aproximada de 7 kg/cm.

Es preciso, por otra parte, tener en cuenta que no se trata de cargas en reposo, y que, por consiguiente existen otros fenómenos cuyo efecto es aumentar la presión específica que se deduce en los anteriores cálculos.

Es necesario advertir igualmente, que la inclinación del vehículo, debido al bombeo de la carretera, carga más a un lado que a otro, del mismo modo que en las rampas, también por efecto de la inclinación, resulta mas cargado el eje posterior, y, finalmente, que la fuerza centrífuga que se desarrolla en las curvas aumenta la presión sobre las ruedas del lado exterior. En los vehículos mecánicos influye también el par motor, aumentando la presión de las ruedas motrices. Las investigaciones del ingeniero Schaar de Altona, conducen al resultado de un aumento del 8% para todas las causas indicadas, para un vehículo que circula a una velocidad de 16 kms. por hora, y aumenta al 16% para una velocidad de 20 kilómetros por hora, pero no pasa de un 20% para las mayores velocidades posibles.

En todo lo que antecede se ha tratado de cargas en reposo, es decir, de cargas estáticas con las adicionales debidas al movimiento en rampas o curvas, mas siempre dentro de la hipótesis de una carretera perfectamente plana.

Pero la superficie de una carretera, como ya se indicó, no cumple jamás esta condición sino que tiene desigualdades que varían entre límites muy amplios con la bondad del revestimiento y la conservación. Por consiguiente, la rueda pasará por puntos salientes o por depresiones, desarrollándose esfuerzos de choque, que en último extremo aumentarán, y a veces en gran medida, la presión específica. Si la rueda pasa por un punto alto, por ejemplo una piedra que exista en el firme, debería elevarse, (en caso de llantas rígidas) para salvar el obstáculo transmitiendo el esfuerzo a la caja del vehículo, con una amplitud mayor o menor, que dependerá de la calidad de la suspensión. Una vez pasado el obstáculo, la rueda caerá bruscamente sobre el firme, dependiendo también ahora la intensidad del choque, de la clase de suspensión del vehículo. Del mismo modo, cuando una rueda cae en una depresión, se produce un aumento de presión, debido al movimiento vertical de ésta.

Las investigaciones que sobre los efectos de las desigualdades de las carreteras han llevado a cabo el ingeniero Shaar y el profesor Becker, de Berlín, han conducido a la conclusión, como era lógico esperar, de que la intensidad de los choques depende en gran proporción, de la velocidad y de la clase de llantas del vehículo. Es necesario pues, que nos ocupemos brevemente de las diferentes clases de llantas.

Las llantas rígidas, es decir, las llantas de hierro, se apoyan sobre la superficie de la carretera según una huella rectangular, de que ya hemos hablado.

Como consecuencia de su falta de elasticidad, deben seguir todas las desigualdades de la carretera, elevándose para salvar las salientes, y hundiéndose en las depresiones.

En el caso de llantas elásticas, la cuestión cambia completamente. Los salientes de la carretera son absorbidos mas o menos por llanta elástica. De igual modo en el caso de una depresión, la llanta absorbe las asperezas de los bordes, resultando que, prácticamente la depresión queda aplanada y el choque es mucho menor.

Entre las llantas elásticas cabe distinguir varias clases: los macizos de sección llena, los semielásticos con nucleo hueco, los bandajes con huecos en los bordes y las llantas neumáticas, las cuales llevan también enfalladuras diversas en la superficie, para disminuir el peligro de deslizamiento. En las llantas neumáticas cabe distinguir las de alta presión (de 3 a 8 atm.). La presión específica que ejerce sobre el suelo una rueda montada con estas llantas es, naturalmente, algo mayor que la presión interior, debido a la disminución de superficie de apoyo como consecuencia de los dibujos de la cubierta. Las llantas elásticas tienen además la ventaja de absorber en todo o en parte las desigualdades de la carretera, otra ventaja no menos interesante. A consecuencia del aplastamiento de las llantas elásticas aumenta la superficie de contacto con el suelo. En este caso esa superficie ya no tiene la forma de un rectángulo, sino que afecta una forma elipsoidal.

Las investigaciones del profesor Becker de Berlín, han permitido determinar estas superficies de apoyo, las presiones estáticas, y el aumento que de éstas resultan por la acción de los esfuerzos dinámicos.

La presión estática media se determina sencillamente dividiendo la car-

ga que actúa sobre la rueda por la superficie de contacto de la llanta sobre la carretera.

La diferencia entre los bandajes semielásticos y los macizos ordinarios, no es ciertamente, muy grande. En las ruedas delanteras para una carga de 3.000 kg., que sin duda es grande, resultan fatigas para la carretera de 9.75 kg/cm²., con neumáticos de alta presión, 13.0 con macizos semielásticos, 15.0 con macizos ordinarios.

En las ruedas posteriores con llantas dobles, las fatigas resultantes fueron: 6.6 kg/cm²., para neumáticos de baja presión; 8.8 para neumáticos de alta presión; 8.1 para semielásticos, y 9.3 para macizos ordinarios.

Ya dijimos que para llantas metálicas las presiones se distribuyen desigualmente, según el sentido del eje del vehículo. En las llantas elásticas en que la sección es más o menos curvilínea, el diagrama de fatigas en la superficie de contacto tiene la forma de un paraboloide, cuya ordenada máxima, es decir, el valor máximo de la presión, es aproximadamente el doble de la presión media. Ahora bien; como la sección de la llanta no es exactamente un arco de círculo, puede tomarse como valor de la presión máxima 1.75 veces el valor de la presión media.

Esfuerzos dinámicos.—Además de los esfuerzos estáticos que acabamos de estudiar, existen los dinámicos, que vienen a sumarse a aquellos, y que, con arreglo a las experiencias de Becker, varían de importancia de un modo considerable con las diversas clases de llantas. Según dicho autor, el aumento de la presión estática que suponen los esfuerzos dinámicos, es el siguiente:

En ruedas con bandajes macizos, el 410%.

En ruedas con bandajes elásticos, el 230%.

En ruedas con neumáticos de alta presión, el 40%.

En ruedas con neumáticos de baja presión, el 15%.

En la tabla que a continuación se copia, se ve que un camión pesado con una carga de seis toneladas sobre el eje motor, la presión llega a 84 kg/cm². Se comprende que en un vehículo de esta clase, montado sobre macizos ordinarios, no es ninguna rareza que puedan producirse fatigas al firme de 100 kg/cm².

Ahora bien, para un buen firme de macadam corriente no deben aceptarse fatigas superiores a 20 o 25 kg/cm². Es decir, que incluso en el caso de emplearse macizos elásticos, las fatigas resultantes sobrepasan en mucho las posibilidades de las carreteras ordinarias, mientras que las llantas neumáticas no producen fatigas peligrosas en cualquier clase de firme, y únicamente pueden causar daños en los firmes ordinarios por efectos de succión, que, al arrastrar el recebo deja la carretera descarnada y las piedras del firme sin cohesión.

PRESIONES ESTATICAS Y DINAMICAS, MEDIAS Y MAXIMAS EN LAS
RUEDAS MOTRICES, PARA UNA CARGA POR RUEDA DE 8.000 KG.
SEGUN EL PROFESOR BECKER.

	Bandajes ordinarios	Bandajes elásticos	Neumáticos alta presión	Neumáticos baja presión
Superficie de apoyo bajo la acción de las cargas estáticas	332 cmc.	370 cmc.	343 cmc.	453 cmc.
Presión estática media.....	9.3 kg-cmc.	8.1 kg-cmc.	8.8 kg-cmc.	6.6 kg-cmc.
“ “ máxima.....	16.3 “ “	14.2 “ “	8.8 “ “	6.6 “ “
Aumento por la acción de esfuerzos dinámicos.....	410% ^o	230% ^o	40 % ^o	15% ^o
Presión máxima total estática y dinámica.....	84 kg-cmc	46.8 kg-cmc	12.35kg-cmc	7.6kg-cmc

Los experimentos de Becker conducen pues, a la conclusión de que los firmes de macadam ordinario son insuficientes para resistir el tráfico de camiones pesados con bandajes macizos, y aún para el tráfico sobre neumáticos si no se recurre a algún artificio para aumentar la cohesión de los elementos pétreos. Por esta razón la mayoría de los gobiernos han adoptado medidas fiscales encaminadas a impedir la utilización de los bandajes ordinarios.

Esfuerzos tangenciales.—Las fuerzas que actúan sobre la superficie del firme, no se reducen únicamente a las presiones estáticas y dinámicas que acabamos de analizar, sino que existen esfuerzos tangenciales que son particularmente intensos en el caso de vehículos mecánicos animados de gran velocidad. Para pequeñas velocidades, y cuando se trata de vehículos arrastrados, estos esfuerzos no tienen importancia y pueden despreciarse.

Estos esfuerzos tienden a desplazar los elementos superficiales de las carreteras, y deben ser contrarrestados por la tenacidad y cohesión de los materiales del firme. La experiencia demuestra que las clases de piedra que resisten mejor son las cuarcitas, pórfidos, basaltos y granitos. También se comportan bastante bien las calizas duras. La piedra de peor resultado frente a estas acciones es la arenisca.

Los esfuerzos tangenciales pueden ejercerse en sentido longitudinal o transversal al eje de la carretera.

Esfuerzos tangenciales longitudinales.—Estos esfuerzos se desarrollan por el plano de las ruedas, y son producidos por las ruedas motrices dirigiéndose en sentido contrario del movimiento. Son debidos al par motor que actúa sobre las ruedas motrices, y preceden al movimiento del vehículo, cuando no sobrepasan la adherencia entre las ruedas y el firme. Cuando esto ocurre, las ruedas patinan.

Si designamos el esfuerzo tangencial por T, el peso que actúa sobre las

ruedas motrices por G_b y por f el coeficiente de frotamiento entre las llantas y la superficie del firme, tendremos:

$T = G_b f$, si la fuerza tangencial no sobrepasa a la adherencia. Aceptando para f el valor de 0,5, resulta que el esfuerzo tangencial será la mitad de la carga que descansa sobre el eje. De aquí podemos deducir la fatiga máxima producida por estos esfuerzos:

$$k = T/F.$$

siendo F la superficie de la zona de apoyo de la rueda sobre el suelo.

Ejemplo numérico:

Datos: peso $G_b = 2,800$ kg.

$$f = 0,5.$$

entonces, $T = 0,5 \cdot 2800 = 1400$; luego por cada rueda, 700 kg.

Si la superficie de contacto es de 100 cm^2 , la fatiga del firme será:
 $k = 700/100 = 7 \text{ kg/cm}^2$, y la fatiga máxima, $1,75 k = 12,25 \text{ kg/cm}^2$,

Cuando se frena el vehículo se desarrollan también esfuerzos tangenciales. Estos esfuerzos deben absorber la fuerza viva del vehículo, hasta producir su detención.

Si designamos por B el esfuerzo del frenado, y por s el espacio recorrido hasta la detención del vehículo, podemos establecer la siguiente igualdad de trabajos:

$$B_s = G_b v^2 / 2g.$$

Para determinar el valor máximo de B debemos partir del valor máximo de la fatiga por unidad de superficie, que designemos de nuevo por k .

Se tendrá: $k = B/F$, en que F es la superficie de contacto, y de aquí:

$$B = kF$$

Schenck dá los siguientes valores máximos para el esfuerzo tangencial, aceptado para f el valor de 0.5:

Para macizos ordinarios	10.4 kg/cm ² .
Para macizos elásticos	7.8 " "
Para macizos neumáticos	2.5 " "

Este esfuerzo tangencial que actúa horizontalmente se combina con los esfuerzos verticales debidos a las cargas estáticas y dinámicas, dando una resultante oblicua cuyo valor es:

$$R = \sqrt{p^2 + k^2}.$$

Antes vimos que el valor máximo de la presión vertical por centímetro cuadrado era 39.6 para una carga por rueda de 3.000 kg., y como el esfuerzo tangencial máximo es de 10.4 kg/cm²., el esfuerzo resultante será:

$$R = 41 \text{ kg/cmc.}$$

Esfuerzos tangenciales transversales.—Los esfuerzos transversales se producen perpendicularmente al plano de las ruedas del vehículo.

Se producen en las curvas como consecuencia de la acción de la fuerza centrífuga.

$Z = Gv^2/gr$, en que v se da en m/seg.

$Z = Gv^2/gr$. (3,6)², si v está en km/hora.

Ejemplo: $G = 6.000 \text{ kg.}$, $v = 60 \text{ km h.}$, $r = 100 \text{ m.}$

$Z = 6000.3600/(3,6)^2 \cdot 100.10 = 1670 \text{ kg.}$

El esfuerzo por unidad de superficie será $k = Z/F$.

Tomando para F los valores $F = 100 \text{ cmc.}$ para macizos, $F = 150 \text{ cmc.}$ para neumáticos, se tendría para la fatiga los valores $k = 4.2 \text{ kg/cmc.}$ y $k = 2.8 \text{ kg/cmc.}$ Es decir, que también en este caso se desarrollan esfuerzos de consideración.

El esfuerzo transversal, debido a la fuerza centrífuga, debe ser absorbido por la carretera; luego $Z = Gf$.

Adoptando para f el valor de 0.5, que utilizamos antes, se tendrá para Z el valor 3.000 kg., es decir, casi el doble del valor que resultaba en el ejemplo; pero si el coeficiente baja a 0.2, se tendría para $Z = 1.200 \text{ kg.}$, es decir, menos del valor de la fuerza centrífuga calculada en el ejemplo. Por consiguiente en este caso se produciría un deslizamiento en el vehículo.

Esfuerzos de succión.—Estos esfuerzos que se engendran de tres modos distintos, son consecuencia del movimiento, y dependen en gran parte de la velocidad. Se comprende, que en los vehículos de tracción animal, que circulan a escasa velocidad, estos esfuerzos no tienen ninguna importancia, pero en cambio sí la tienen en los vehículos mecánicos, aumentándose por efecto de las llantas elásticas.

En primer lugar se produce un efecto de succión por la compresión de las llantas elásticas de caucho, sobre la superficie de la carretera por la acción de las cargas.

En los pequeños poros de la superficie de la carretera, se produce por esta causa un vacío, y por consiguiente una absorción. En el límite de esta absorción, puede tener el valor de 1 atm. = 1 kg/cmc., pero en la práctica llega a la mitad, de modo que si la resistencia de la tracción del recebo es inferior a esta cantidad, corre peligro de ser arrancado de la superficie. Este efecto de succión es el más peligroso para la conservación de la carretera, pues comienza por descarnar, y acaba por descomponer completamente el firme, fig. 2.

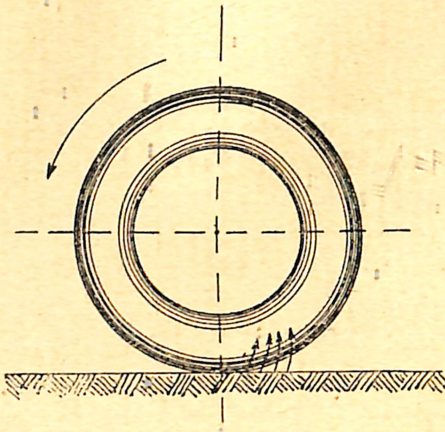


Fig. 2

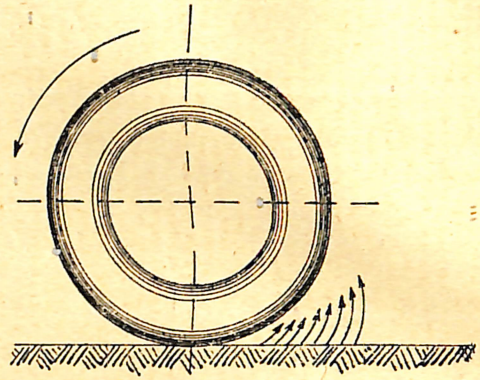


Fig. 3.

Este esfuerzo de succión puede ser combatido, empleando cubiertas provistas de acanaladuras longitudinales y transversales, que permitan el acceso del aire. Con ello se disminuye la superficie de contacto de la rueda con el suelo, y como consecuencia, el efecto de succión. Naturalmente se aumenta en la misma proporción la presión específica, al disminuir la superficie de apoyo.

Paralelamente al que acabamos de estudiar, se presentan otros efectos de succión, mucho menos perjudiciales para la conservación de la carretera, pero que en cambio causan molestias al tráfico. Uno de ellos es la absorción que se produce inmediatamente detrás de la rueda en movimiento, debido a la corriente de aire que tiende a llenar el vacío dejado por la rueda en su desplazamiento, corriente que reúne las partículas de polvo que existen en la superficie de la carretera, arrastrándolas hacia arriba, fig. 3.

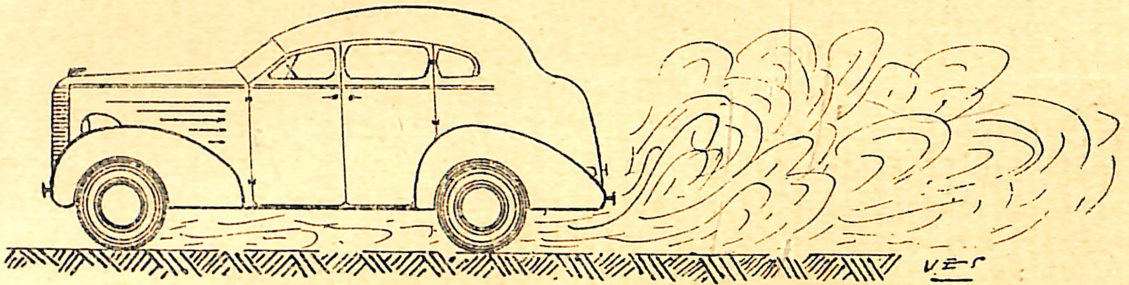


Fig. 4.

El segundo efecto, semejante, pero de mayor amplitud, es el debido al vacío producido por el vehículo mismo en su movimiento, al cual afluye el aire de los costados y de debajo, arrastrando el polvo y los objetos que pueden existir en el suelo de la carretera, y arrojándolas sobre los lados. Estos dos efectos son las causantes de las desagradables y conocidas nubes de polvo que se forman en las carreteras de firmes poco tenaces, muy especialmente en las de macadam ordinario. Estos efectos pueden combatirse, perfilando los vehículos según las normas aerodinámicas, con lo cual, el aire se reparte en corrientes homogéneas, sin producir remolinos, fig. 4.

(De la tesis de grado del ingeniero don Gabriel Hernández).