



LABORATORIO DE TECNOLOGÍAS IV

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL MECÁNICA

PRÁCTICA 1

“NEUMÁTICOS”

*DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
Febrero de 2005*



PROGRAMA

0	OBJETIVOS	2
1	INTRODUCCIÓN	2
2	¿CÓMO SE FABRICAN LOS NEUMÁTICOS?	3
3	PROPIEDADES DE LOS NEUMÁTICOS	3
4	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS NEUMÁTICOS	4
4.1	ESTRUCTURA DE LA CUBIERTA	4
4.2	NEUMÁTICOS CON CÁMARA Y SIN CÁMARA (TUBELESS)	8
4.3	CONFIGURACIÓN DE LA BANDA DE RODADURA Y FLANCOS.	9
4.4	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS NEUMÁTICOS	15
4.4.1	FUERZAS Y MOMENTOS QUE ACTÚAN SOBRE LOS NEUMÁTICOS	15
5	ESFUERZOS LONGITUDINALES	25
5.1	TRACCIÓN	25
5.2	ESFUERZO DE FRENADO	27
5.3	COEFICIENTE DE ADHERENCIA. VALOR MÁXIMO Y VALOR DE DESLIZAMIENTO PURO	27
5.4	ESFUERZOS TRANSVERSALES SOBRE EL NEUMÁTICO. DERIVA	30
5.4.1	VARIACIÓN DE LA FUERZA TRANSVERSAL DE CONTACTO CON EL ÁNGULO DE DERIVA	32
5.4.2	FACTORES QUE AFECTAN AL COMPORTAMIENTO TRANSVERSAL DEL NEUMÁTICO	34
5.4.3	ÁNGULO DE CAÍDA DE LA RUEDA(γ)	37
5.5	MOMENTO AUTOALINEANTE	40
6	EL ACUAPLANING	42
7	BIBLIOGRAFÍA	43

L. ISASI, J.A. CALVO, B. PEREZ

0 OBJETIVOS

El objetivo principal de esta práctica es proporcionar un conocimiento básico de uno de los componentes más importantes de los vehículos automóviles: el neumático.

De igual modo se pretende analizar tanto el proceso de fabricación del mismo como su funcionamiento una vez montado sobre el vehículo.

1 INTRODUCCIÓN

Los neumáticos son, sin duda, uno de los componentes más importantes de los vehículos automóviles (ya sean turismos, camiones, autobuses, motocicletas o cualquier otro tipo de vehículo rodante).

Todos los esfuerzos que actúan sobre los vehículos (salvo los aerodinámicos, que actúan directamente sobre la carrocería), se generan en los neumáticos y actúan sobre el vehículo a través de ellos, siendo transmitidos a la carrocería a través de la llanta y de los elementos mecánicos de la suspensión.

Es por tanto fundamental comprender el funcionamiento de dichos componentes para entender los esfuerzos actuantes sobre el vehículo y, en definitiva, la dinámica de los mismos.



Figura 1Conjunto de llanta y neumático



Además, a las velocidades normales de utilización, el neumático es el responsable de una parte importante –alrededor del 20%- del consumo de combustible. Cuando rueda, y especialmente en la frenada, la banda de rodadura se deforma en un rango de frecuencia elevado que corresponde a su deformación sobre las rugosidades del suelo. Esta deformación genera una pérdida de energía “útil”, puesto que sirve para procurar adherencia a la calzada, garantizando la seguridad de circulación.

2 ¿CÓMO SE FABRICAN LOS NEUMÁTICOS?

El neumático es un componente muy complejo, en cuya fabricación se utilizan gran número de componentes. Por ello, es importante tener una idea clara de cómo se fabrican, para comprender las propiedades que tienen una vez fabricados. Para fabricar un neumático convencional se utilizan del orden de 15 a 20 compuestos diferentes, más otros tantos aceites o resinas de proceso. Variaciones ínfimas (del orden de 0,1%) en sus cantidades o en el proceso de fabricación (temperaturas o tiempos de permanencia), pueden dar lugar a características finales muy diferentes.

En primer lugar se elaboran los refuerzos metálicos y textiles y las mezclas de goma. Una vez que se encuentran listos estos productos semiterminados, el proceso de fabricación se divide en dos grandes etapas: el ensamblaje de estos productos (construcción del neumático en crudo) y, posteriormente, la vulcanización o cocción.

1.-Durante la fase de confección del neumático “crudo”, los distintos elementos se acoplan y colocan cuidadosamente. En esta etapa el caucho no está todavía vulcanizado; los desperdicios de goma pueden, por tanto, reciclarse fácilmente.

2.-Luego, el neumático “crudo” se coloca dentro de un molde, y en su interior se dispone una especie de “cámara” o membrana impermeable. Durante la cocción, el agua a elevada temperatura (líquida o en forma de vapor) circula por el interior de la membrana que, al inflarse, presiona el neumático contra las paredes del molde para imprimirle su escultura y marcajes externos. Durante la cocción se logra la cohesión del conjunto mediante la vulcanización, que consiste en ligar las cadena de elastómeros entre sí por reacción con el azufre bajo la acción del calor.

3 PROPIEDADES DE LOS NEUMÁTICOS

Tal como se ha comentado anteriormente, la totalidad de los vehículos de carretera y gran parte de los que se mueven fuera de ella (extraviarios) utilizan ruedas neumáticas, cuyos cuatro elementos fundamentales son: llanta, cubierta, cámara (que puede estar incorporada a la cubierta) y aire a una cierta presión, para proporcionar la rigidez necesaria al conjunto.



Las funciones básicas de los neumáticos son:

- Soportar y transmitir al terreno la carga vertical.
- Generar los esfuerzos longitudinales necesarios para la tracción y frenado.
- Proporcionar los esfuerzos laterales precisos para lograr el control y estabilidad de la trayectoria.
- Actuar como suspensión primaria, capaz de atenuar y filtrar las ondulaciones originadas por las irregularidades de la carretera.

Por último se ha de señalar que del neumático se exigen características muy diversas y a veces contradictorias y difíciles de asociar para lograr en el vehículo altas cotas de seguridad, confort, capacidad para alcanzar aceleraciones, deceleraciones y velocidad punta elevadas y al mismo tiempo economía, es decir, bajo costo y gran duración.

Las características que principalmente se requieren son:

- Bajo nivel de ruidos y de vibraciones.
- Adecuada flexibilidad radial, circunferencial y transversal.
- Baja resistencia a la rodadura.
- Elevada adherencia sobre pista seca y mojada, tanto longitudinal como transversal.
- Resistencia a la fatiga, al desgaste, a la formación de grietas por cristalización del caucho, etc.

En los apartados siguientes se analizarán las características generales principales de los neumáticos.

4 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS NEUMÁTICOS

4.1 ESTRUCTURA DE LA CUBIERTA

La cubierta puede describirse como un cuerpo flexible, de forma aproximadamente tórica, cuyos elementos principales son la carcasa y la banda de rodadura. La carcasa contiene tejido de alta resistencia a la tracción en forma de lonas, que se fijan a dos aros de cables de acero que proporcionan un firme acoplamiento a los correspondientes asientos de la llanta. Su forma y partes fundamentales se indican en la figura 2.

Por tanto, los principales componentes del neumático se montan o disponen a partir de la carcasa o conjunto de telas o lonas embebidas en caucho y que se extiende de talón a talón. Los talones, el cinturón, compuesto por varias lonas que forman un anillo superpuesto a la carcasa, y la banda de rodadura, en la que va grabado el dibujo correspondiente.

Con la estructura anteriormente descrita se pretende:

- Que el neumático cuente con unos elementos relativamente inextensibles para su adecuado anclaje a la llanta.
- Una rigidez decreciente hacia la línea media de los costados, para lograr la necesaria estabilidad lateral junto a una cierta flexibilidad.
- Flexibilidad necesaria para actuar como elemento elástico-amortiguador.
- Una banda de rodadura capaz de proporcionar buena adherencia y soportar, con mínimo desgaste, las agresivas condiciones de trabajo a que es sometida.

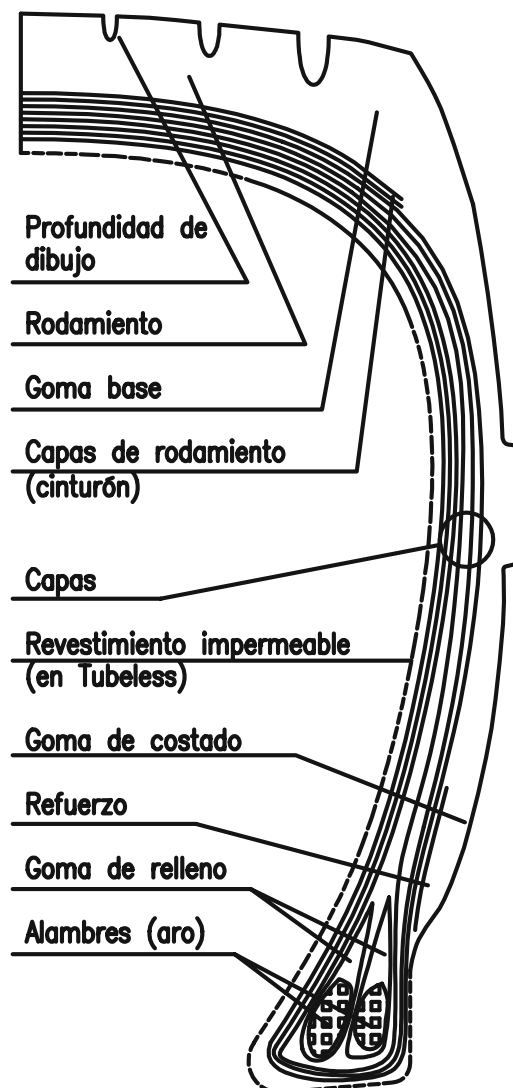


Figura 2: Estructura básica de un neumático.

Existen dos tipos básicos de neumáticos según su estructura básica y un tipo intermedio entre ellos. Estos son:

- ◆ Diagonal o convencional.
- ◆ Radial o cinturado.

◆ Diagonal cinturado.

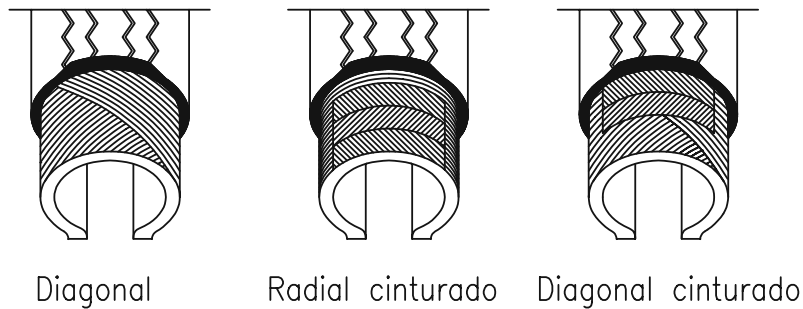


Figura 3 Tipos básico de estructura en los neumáticos.

◆ **Neumáticos diagonales**

En los neumáticos diagonales, utilizados desde principios de este siglo, la carcasa está formada por un cierto número de lonas cuyas fibras se orientan alternativamente formando ángulos iguales, y de sentido contrario, respecto a la línea circunferencial media de la propia carcasa, tal como se detalla en la figura 4. Este ángulo, que se denomina ángulo de cordones β es la variable que más influye en la forma del contorno del neumático

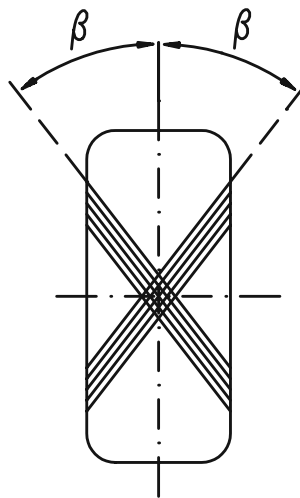


Figura 4: Ángulo de cordones en un neumático diagonal

El ángulo de cordones varía de 30° a 42° en neumáticos para turismo, según las prestaciones previstas. En neumáticos de camión se utilizan ángulos de aproximadamente 40° . Valores pequeños de β mejoran el comportamiento lateral disminuyendo la capacidad de carga y el confort que proporciona el neumático, de ahí que en vehículos rápidos se utilice valores pequeños de β y en vehículos pesados valores mayores.

◆ **Neumáticos radiales**

El neumático de tipo radial fue inventado en 1948 por Michelin y hoy en día ha desplazado casi completamente a los neumáticos diagonales.

La carcasa está formada por una o más lonas cuyos cables se orientan radialmente entre los talones y, por tanto, con ángulo de cordones igual a 90° . Esta estructura es estabilizada por un cinturón de ancho algo inferior al del neumático, que se sitúa entre carcasa y banda de rodadura. Este cinturón está formado por un paquete de capas textiles o metálicas, cuyos cordones se alternan con ángulos $\beta \leq 20^\circ$.

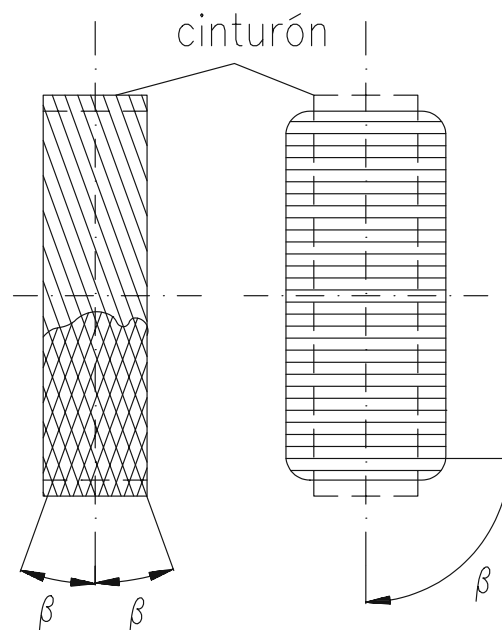


Figura 5: Estructura básica de un neumático radial

El neumático radial requiere menos lonas en la carcasa que en un neumático convencional equivalente, consiguiéndose flancos más flexibles. Por el contrario, la banda de rodadura está dotada de mayor rigidez, lo que hace disminuir sus deformaciones en recta y curvas, aumentando la superficie de contacto con el suelo, que permanece más constante y con una presión más uniforme. Debido a ello, los neumáticos radiales presentan varias ventajas, que se pueden resumir en la mejora las prestaciones (tracción, frenado, etc.), en un mejor control de la trayectoria y estabilidad, una menor resistencia a la rodadura y una duración mayor.

◆ Neumático diagonal cinturado

Se construye con un cinturón de bajo ángulo de cordones sobre una carcasa convencional. El cinturón confiere gran rigidez a la banda de rodadura y las propiedades de estos neumáticos pueden considerarse intermedias entre los dos tipos anteriores.

4.2 NEUMÁTICOS CON CÁMARA Y SIN CÁMARA (TUBELESS)

La cámara, cuerpo tórico hueco de goma muy impermeable, cumple la misión de proporcionar un recinto de alta estanqueidad al aire del neumático. El uso de cámara disminuye la exigencia de estanqueidad entre llanta y cubierta, pero tiene el grave inconveniente de que ante un pinchazo u otro deterioro de la misma, se produce una pérdida rápida de aire y una variación brusca de la rigidez del neumático, que provoca inestabilidad en la trayectoria del vehículo.

Del mismo modo, el rozamiento entre cámara y cubierta y la mayor cantidad de goma final en el neumático, aumentan las pérdidas por rozamiento interno de las moléculas.

Para evitar los inconvenientes indicados anteriormente, se han desarrollado los neumáticos sin cámara (Tubeless) que fueron utilizados por primera vez en 1956. Se diferencian de los convencionales en los siguientes aspectos:

- ◆ El interior de la cubierta incorpora una capa de 1 a 2 mm de goma especial muy impermeable.
- ◆ Las llantas de turismo, aunque pueden ser idénticas a las utilizadas para neumáticos con cámara, mejoran sus características con un diseño especial tipo Hump que dispone de resaltes en los asientos de talones, para su mejor fijación (ver figura 6).
- ◆ En llantas para camión se utiliza un asiento de talón con inclinación de 15° para mejorar el efecto de acuñamiento de éste (ver figura 7).
- ◆ Por último, van dotados de válvulas especiales acopladas directamente a la llanta.

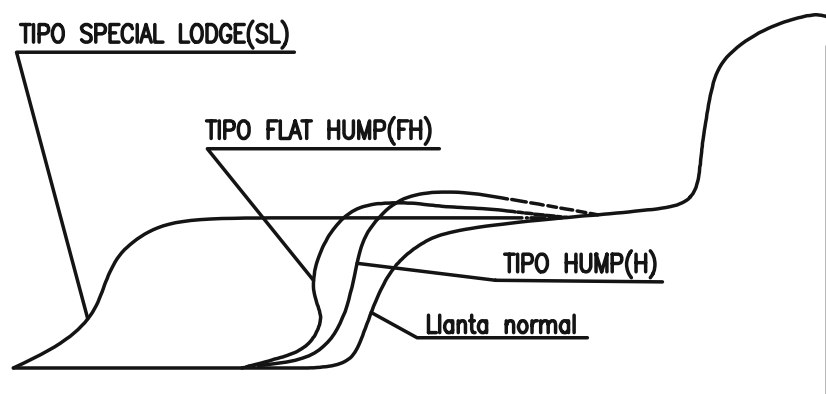


Figura 6: Tipos de llanta utilizados en distintas aplicaciones.

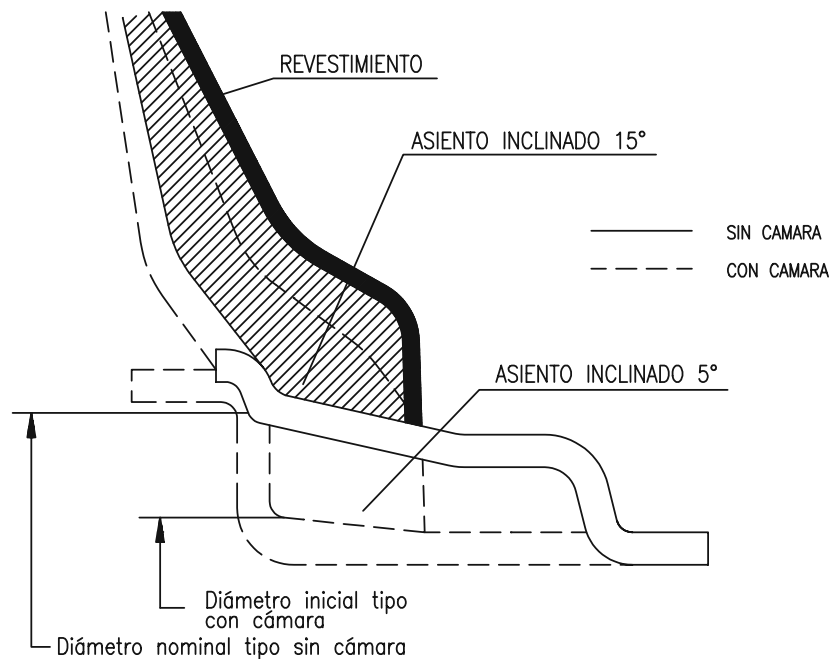


Figura 7: Diferencia entre el asiento de llanta para neumático con cámara y sin cámara.

Las líneas de mejora de los actuales neumáticos contemplan, de manera prioritaria, el desarrollo de nuevos tipos, que sin merma de las demás prestaciones, ofrezcan máxima seguridad ante desinflados bruscos y permitan continuar la marcha durante recorridos relativamente largos y a una velocidad suficiente, sin deterioro que les inhabilite para posteriores usos.

4.3 CONFIGURACIÓN DE LA BANDA DE RODADURA Y FLANCOS.

◆ Banda de rodadura

La banda de rodadura conecta el propio neumático con la pista o suelo y en la interacción de ambos elementos deben lograrse las fuerzas necesarias para proporcionar los esfuerzos longitudinales y transversales requeridos para la tracción, frenado y control de la trayectoria del vehículo. Debe, por tanto, proporcionar la máxima adherencia longitudinal y transversal, tanto en pista seca como mojada y con el mínimo desgaste. Naturalmente, la estructura del neumático y la naturaleza de los materiales empleados, condicionan estas características, pero también quedan condicionadas por el dibujo de la banda, resultante de la distribución sobre ella de elementos tales como nervios, tacos, ranuras, y estrías.

La función principal del dibujo es la evacuación del agua de la zona de contacto, cuando rueda sobre una pista mojada. Un neumático liso suele ofrecer mayor adherencia que otro con dibujo cuando rueda sobre superficies duras y secas, en cambio, disminuirá rápidamente la adherencia al aumentar la



En relación con la capacidad de evacuación de agua se han definido diferentes parámetros, entre ellos el siguiente:

$$\delta = \frac{\text{perímetro del área real de contacto}}{\sqrt{\text{Área real de contacto}}}$$

Como valores aproximados:

$$\frac{\delta_{\text{dibujo}}}{\delta_{\text{liso}}} \approx 4$$
$$\delta_{\text{Tacos}} \succ \delta_{\text{ranuras zig.zag.}} \succ \delta_{\text{ranuras circunferenciales}}$$

Aunque los requerimientos fundamentales de la banda de rodadura son la adherencia y, en consecuencia, la capacidad de evacuación de agua, y el desgaste, otro factor de gran importancia que influye en su diseño es el ruido. El hecho de que el dibujo contenga elementos, repetidos a intervalos iguales en su periferia, puede ser origen de la generación de frecuencias audibles, que son armónicamente dependientes de la velocidad de rotación. Para evitar este efecto, se divide la banda en segmentos, de longitud diferente, que contienen igual número de elementos de diseño. Estos segmentos se unen en la secuencia que mejor tienda a reducir los armónicos de mayor intensidad.

Por último, hay que destacar que el diseño de la banda de rodadura debe tener en cuenta un gran número de variables, tanto del propio neumático (estructura, materiales, tamaño, etc.) como de las prestaciones previstas: duración, esfuerzos, velocidad, ruidos, estabilidad, etc. Este gran número de variables hace que sea la experiencia y la experimentación, la principal fuente de criterios para los diseñadores.

◆ Costados (o flancos)

Las paredes laterales exteriores de los neumáticos cumplen dos funciones básicas: la primera, proteger las telas de la carcasa contra golpes, roces, cortes, etc., para lo cual dispone en ocasiones de un cordón de protección en su zona central; la segunda función es la de ser portador de los datos de identificación del neumático, tanto los nombres de marca y otros distintos de libre decisión del fabricante, como aquellos que las normas o reglamentos obligan a consignar para conocimiento del usuario.

Desde el punto de vista mecánico conviene considerar los siguientes aspectos. El espesor de la capa de goma de los costados depende del tipo de neumático y su diseño estructural. En general, los neumáticos de tipo radial necesitan más protección de goma por la mayor debilidad de su carcasa y su mayor deformación en servicio.



Por otra parte, el diseño de la parte superior del flanco, en la zona de los hombros, ha de tener en cuenta la gran generación de calor que suele producirse en esta zona que la convierte en crítica para la duración y comportamiento del neumático. Es frecuente situar en esta zona ranuras en sentido radial o circunferencial y otros elementos que favorezcan la refrigeración de la región.

♦ Denominación de los neumáticos.

Como consecuencia de la rápida evolución tecnológica y la diversidad de fabricantes, han ido desarrollándose distintas formas de denominar los diferentes tipos de neumáticos. A continuación, se indica la manera homologada para designarlos.

Los parámetros que se utilizan para designar y caracterizar los neumáticos son de tres tipos:

Geométricos:

- Anchura nominal de la sección.
- Coeficiente de forma o relación nominal de aspecto.
- Diámetro nominal de la llanta.

Relativos a la estructura y constitución de los neumáticos:

- Tipo de estructura.
- Utilización o no de cámara.
- Indicación en el caso de contener refuerzos.

Relativos a las condiciones de utilización:

- Carretera o nieve.
- Categoría de velocidad.
- Índice de capacidad de carga.

En lo que se refiere a las dimensiones y características geométricas, en la figura 9 se indican las más comúnmente usadas en relación con la cubierta, llanta y huella de contacto.

- hn: Altura de la sección del neumático.
- bn: Anchura de la sección del neumático
- Dn: Diámetro exterior del neumático
- bLL: Anchura de la llanta
- DLL: Diámetro de la llanta
- le: Longitud de la superficie de contacto
- be: Anchura de la superficie de contacto
- rest: Radio bajo carga estática

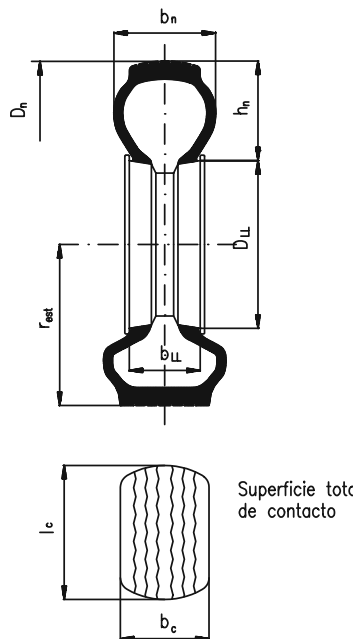


Figura 9 Dimensiones principales del neumático

Como se ha indicado anteriormente, los parámetros geométricos utilizados para designar el neumático son:

- ◆ Anchura nominal de la sección expresada en mm. (b_n)
- ◆ Diámetro nominal de la llanta (DLL), que se expresa en pulgadas ó mm., y corresponde al diámetro que deben tener las llantas en las que el neumático puede ser instalado.
- ◆ Relación nominal de Aspecto (RNA) que se define como el céntuplo del número obtenido dividiendo la altura de la sección por su anchura, es decir:

$$100 \frac{h_n}{b_n}$$

Es de destacar la evolución de este parámetro con el tiempo, pasando desde el valor de 113% a principio de siglo, a 90-100% en la década de los años cuarenta y a 50-70% en las series rebajadas y de huella ancha de la actualidad, cuyas ventajas mecánicas se estudiarán más tarde.

En relación con los parámetros relativos a la estructura y constitución y condiciones de uso de los neumáticos, se emplean las siguientes denominaciones:

- a) Tipo de estructura:
Neumáticos de estructura diagonal - sin indicación
Neumáticos de estructural radial - "R" ó "RADIAL".
Neumáticos diagonales cinturados - "B" y "BIASBELTED".



- b) Utilización o no de cámara:
Neumático con cámara - Sin indicación
Neumático sin cámara - "TUBELESS".
- c) Para neumáticos reforzados: la palabra "REINFORCED".
- d) Condiciones de utilización:
Neumáticos tipo nieve - M + S, M . S ó M & S, las letras corresponden a las iniciales de "mud and snow", (barro y nieve).
- e) Categoría de velocidad.
Se utiliza una letra para expresar la velocidad máxima, expresada en km/h, fijada por el fabricante para la utilización del neumático.

En la tabla siguiente se incluyen estas categorías:

Símbolo de la categoría de velocidad	Velocidad máxima km/h
L	120
M	130
N	140
P	150
Q	160
R	170
S	180
T	190
U	200
H	210

- f) Índice de capacidad de carga: (n). Se trata de una cifra que representa una categoría para la cual se define el valor de la carga máxima que puede soportar el neumático.

La relación entre el índice de capacidad de carga y la carga máxima es:

$$P_{m \times} = 45 \left(\sqrt[80]{10} \right)^n = 45 \times (1.0292)^n \text{ kg.}$$

Ejemplo: n = 85 P_{máx} = 515 kg.

- g) Fecha de fabricación: Los neumáticos deben llevar grabada, además de los símbolos relativos a los parámetros ya analizados, la fecha de fabricación expresada por tres dígitos; los dos primeros indican la semana y el tercero corresponde al último guarismo del año.
- h) En lo que se refiere a la relación nominal de aspecto (o perfil), los neumáticos diagonales suelen utilizar las siguientes series:



Tipo	RNA
Super Ballon	0,95
Low Section	0,88
Super Low Section milimétrica	0,82
Ultra Low Section	0,77
70	0,7

Ejemplo. Un neumático que en su lateral tenga grabado:

185/70 R 13 85 S TUBELESS M + S 103

Tiene las siguientes características:

- Anchura nominal de la sección 185 mm.
- Relación nominal de aspecto - 70%
- Estructura - Radial
- Diámetro de llanta nominal - 13".
- Posee una capacidad de carga de 515 Kg. (índice 85)
- Pertenece a la categoría de velocidad S.
- Puede ser montado sin cámara (Tubeless)
- Pertenece al tipo nieve (M + S)
- Fue fabricado la semana 10 del año 1993

4.4 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS NEUMÁTICOS

Como se indicó en la parte primera, sobre los neumáticos actúan las fuerzas normales y tangenciales de contacto con la superficie de rodadura y los momentos que éstas originan respecto a diferentes ejes ligados al propio neumático o al vehículo. El objeto de esta segunda parte es analizar las citadas acciones y su variación con diferentes factores relacionados con el propio neumático y con las condiciones operativas a que puede someterse.

4.4.1 FUERZAS Y MOMENTOS QUE ACTÚAN SOBRE LOS NEUMÁTICOS

Para analizar las componentes de la fuerza y momento resultante, que actúan sobre el neumático, como consecuencia de su interacción con el suelo, se utiliza el sistema de ejes recomendado por SAE, que se representa en la figura 10.

Los ejes de dicho sistema de referencia, se definen de la siguiente manera:

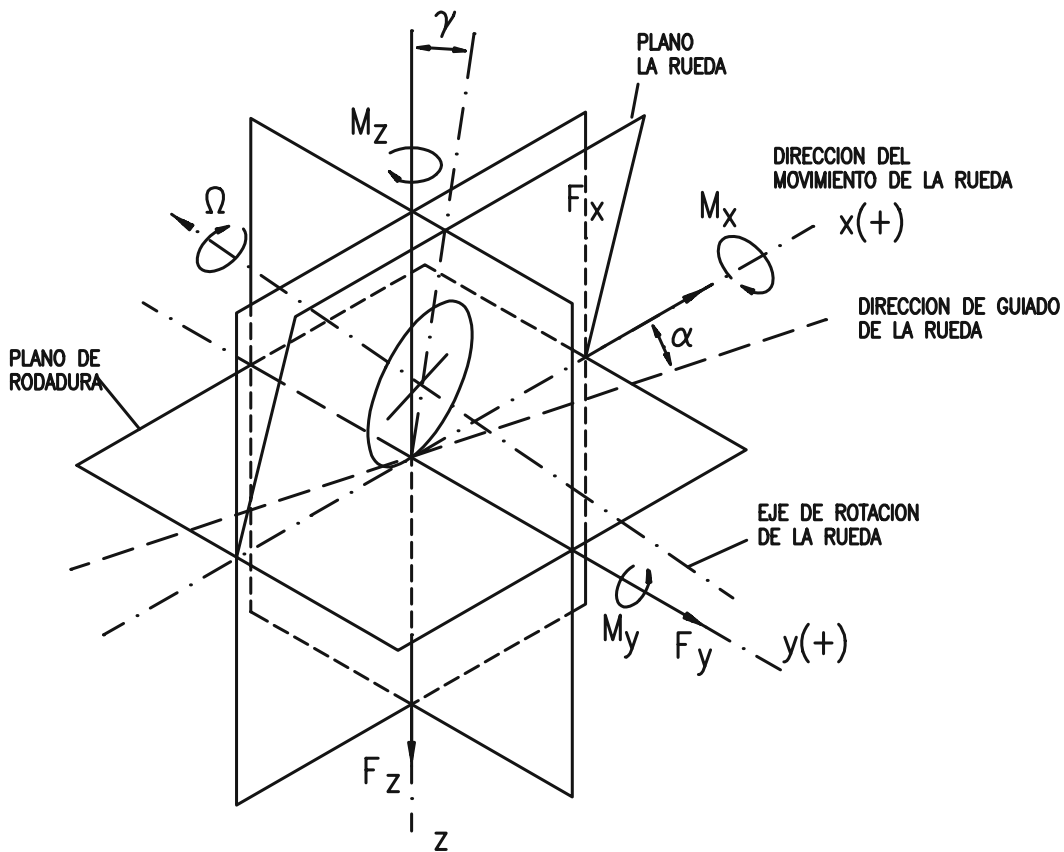


Figura 10: Sistema de referencia SAE para el neumático.

- ◆ Eje X. Es la intersección del plano medio de la rueda y el plano de la superficie de rodadura. El sentido positivo coincide con el de avance del vehículo.
- ◆ Eje Z. Es perpendicular al plano de la superficie de rodadura y su sentido positivo coincide con el de penetración en el suelo.
- ◆ Eje Y. Es perpendicular a los anteriores y debe formar con ellos un sistema ortogonal orientado a derechas.

El origen del sistema coincide con el centro de la huella de contacto.

Teniendo en cuenta los parámetros geométricos, fuerzas y momentos

En la figura 10, además del sistema de referencia y del resto de elementos, se indican dos ángulos de gran importancia en el comportamiento de la rueda:

- ◆ Ángulo de deriva o de deslizamiento (α). Es el ángulo que forma la dirección de desplazamiento del centro de la superficie de contacto y la línea de intersección del plano de la rueda con la superficie de rodadura (eje X).

- ♦ Angulo de caída (γ). Es el ángulo formado por el plano X-Z y el plano de la rueda.

La flexibilidad de la rueda neumática es la causa de la formación de una huella de contacto de superficie no nula, cuando existe una cierta fuerza en la dirección OZ entre el neumático y el suelo; esto hace que las fuerzas de contacto constituyan un sistema distribuido, con una componente debida a la presión normal y otra a las tensiones cortantes en la interfase, por efecto de la adherencia entre ambos cuerpos. Los puntos de aplicación de la resultante de estas fuerzas distribuidas no coinciden con el centro de la huella de contacto, lo que da lugar a la no nulidad de los momentos de éstos respecto a los tres ejes referidos.

A continuación, se van a analizar estas componentes y la forma en que influyen, en su valor, diferentes factores, tales como: carga, presión de inflado, velocidad, deslizamiento longitudinal, ángulo de deriva y otros.

Las fuerzas estáticas (peso) y dinámicas que actúan sobre el neumático, son transmitidas a la superficie de rodadura a través de la huella de contacto, en la que se genera una presión variable. En la figura se representa la variación de dicha presión.

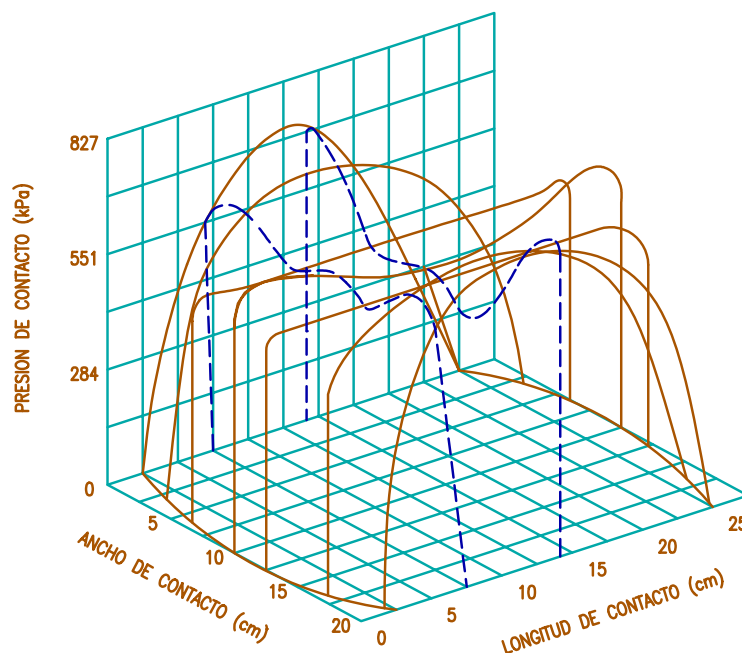


Figura 11: Distribución típica de presión en la huella de contacto.

La distribución de presiones, cuando actúa únicamente una fuerza FZ, es simétrica respecto a los planos longitudinal y transversal que contienen al centro de la huella y son perpendiculares a la superficie de rodadura.

Como puede observarse, bajo los hombros se alcanza valores bastante elevados, más altos que a lo largo de los nervios circunferenciales del dibujo de la banda de rodadura; en éstos se presentan valores máximos en los puntos de entrada y salida de la zona de contacto, debido a la mayor curvatura de la banda en estos puntos. La mayor presión en la zona de hombros se debe a los esfuerzos transmitidos por los costados al aplastarse. Las presiones máximas de contacto pueden superar a las de inflado en forma significativa (2 a 3 veces mayores).

Los neumáticos radiales ofrecen distribuciones de presión más uniformes, en la dirección transversal de la superficie de contacto, debido a la mayor flexibilidad de los costados y mayor rigidez de la banda de rodadura.

La carga vertical de un neumático es soportada por el aire a presión y por la carcasa. Dependiendo del tipo de neumático, la proporción de la carga soportada y transmitida por cada uno de estos elementos es diferente. Se ha comprobado (15) que en neumáticos de avión, la carcasa soporta del 3 al 8% de la carga, mientras que en neumáticos de automóviles, la carcasa puede soportar el 15% de la carga y en neumáticos de tractores hasta el 60%, debido a la baja presión que estos últimos utilizan usualmente.

La resultante de las fuerzas normales, que se pueden considerar en este apartado como radiales, está lógicamente relacionada con la deformación radial del neumático; es evidente que ésta aumentará con la carga. En la figura 12 se indica esta variación.

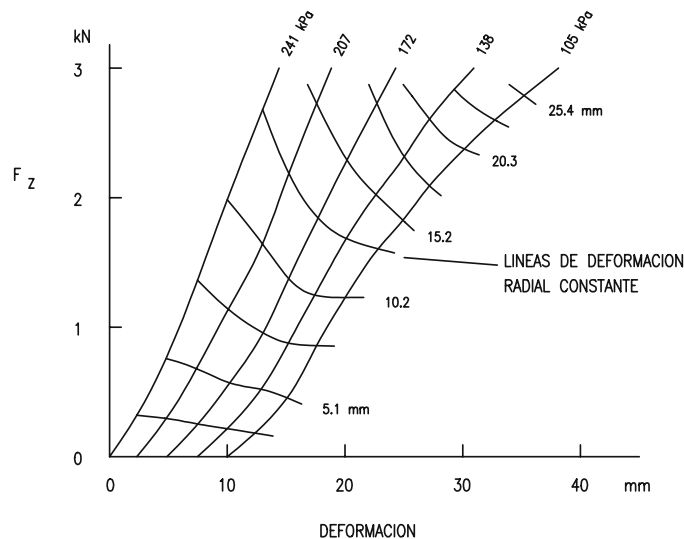


Figura 12: Variación de la deformación en función de la carga.

◆ Rigidez Radial

La rigidez radial es un parámetro que caracteriza el comportamiento del neumático en dirección vertical, junto con el coeficiente de amortiguamiento

equivalente. Ambos permiten modelizar el neumático para estudiar el efecto de aislamiento o “filtrado” de las irregularidades del terreno.

La rigidez vertical del neumático depende de muchos factores, tales como la presión, la velocidad, la temperatura, el ángulo de caída, etc.. Por ello, se definen dos valores de rigidez diferentes, la rigidez estática (la que tiene el neumático cuando no rueda) y la dinámica (la que tiene el neumático cuando está rodando).

La rigidez radial estática se determina por las pendientes de las curvas carga estática-deformación, como si el neumático fuera un resorte. Se cumple también que:

a) En ambos tipos de neumáticos (diagonal y radial) las curvas carga-deformación son casi lineales, excepto para valores relativamente bajos de la carga y de la presión, de ahí que sea posible suponer que la rigidez estática es independiente de la carga en el intervalo de interés práctico.

b) La rigidez aumenta con la presión de inflado, siendo éste el factor que más le afecta. En la figura 13 se representa esta variación para varios neumáticos. Como puede comprobarse, K_{Ze} aumenta linealmente con P_i .

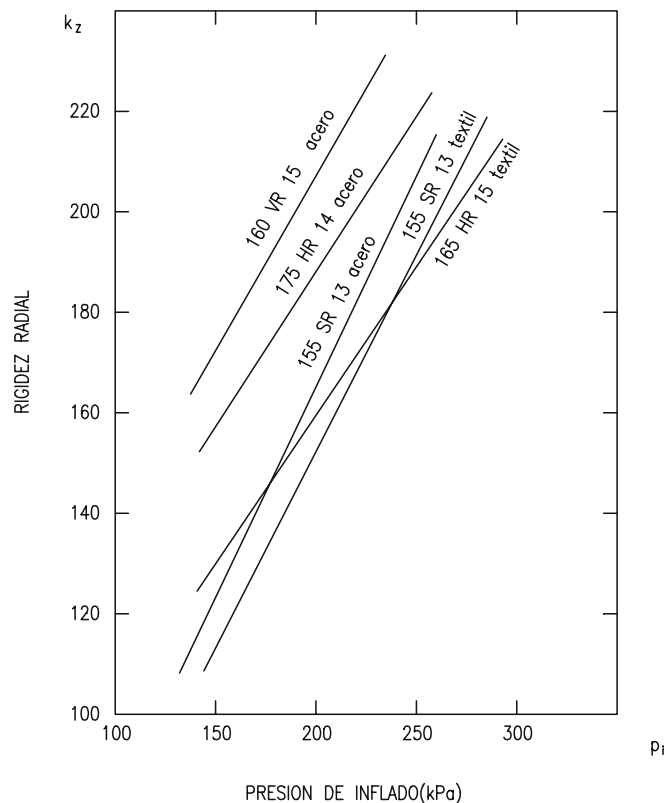


Figura 13: Variación de la rigidez radial en función de la presión de inflado.



c) Los neumáticos diagonales poseen rigidez radial más alta que los radiales de tamaño comparable, pudiendo variar de unos a otros entre el 20 y un 30%.

d) Los neumáticos radiales con cinturón metálico presentan una rigidez radial superior a los de cinturón textil, en un 5% aproximadamente.

e) Algunos parámetros de diseño que hacen aumentar la rigidez radial son: disminuir el ángulo de cordones, aumentar el ancho y radio transversal de la banda de rodadura, aumentar el módulo de elasticidad de los materiales de los tejidos y aumentar el número de telas. En la construcción práctica de los neumáticos, el conjunto de estos factores de diseño pueden hacer variar la rigidez en un diez por ciento aproximadamente.

La rigidez dinámica sin rodadura KZ_d puede obtenerse, entre otros procedimientos, mediante un ensayo de caída. En este ensayo, el neumático con una cierta carga, es soportado por un dispositivo en una posición, en la que toma contacto con el suelo sin ejercerse prácticamente presión. En esta posición se libera instantáneamente la carga, registrándose la variación de la altura de su eje, que corresponde a la de un movimiento armónico amortiguado. El decrecimiento logarítmico de este movimiento permite calcular la rigidez dinámica sin rodadura y el coeficiente de amortiguamiento. Algunos valores de estos parámetros pueden encontrarse en la referencia (15).

En cuanto a la rigidez radial dinámica $K'Z_d$, es el parámetro más representativo y suele determinarse mediante ensayos de rodadura sobre un tambor o cinta deslizante, midiendo su frecuencia de resonancia, o sometiendo el neumático, mientras rueda, a una excitación armónica aplicada sobre la banda de rodadura y midiendo la respuesta en el eje. Estos procedimientos también permiten determinar el coeficiente de amortiguamiento en dirección radial. En la figura 14 se representa la variación de KZ_d con la velocidad para dos neumáticos con diferente estructura.

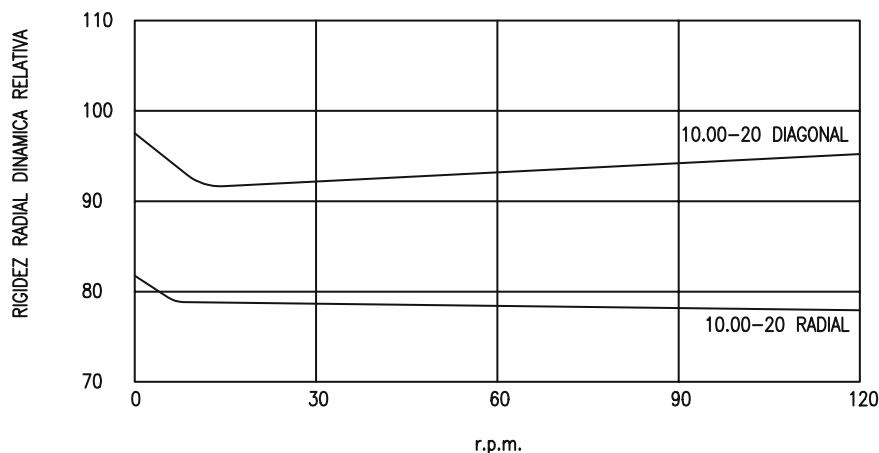


Figura 14: Rigidez vertical dinámica.

De la figura anterior se desprende que la rigidez radial dinámica, desciende con la velocidad rápidamente desde $\omega = 0$ y luego permanece casi constante a velocidades moderadas y altas. Por otra parte, los resultados experimentales demuestran que los valores de la rigidez radial dinámica no difieren demasiado de los de la rigidez radial estática. La relación entre ambas no ha sido establecida con carácter general, Algunos autores (3) (15), señalan que la rigidez dinámica es menor que la estática, siendo esta variación del 5 al 15% en neumáticos de turismos. Algunas experiencias han demostrado, sin embargo, que en neumáticos de tractor la rigidez radial dinámica excede a la estática en un 10% aproximadamente.

◆ Resistencia a la rodadura

Cuando un neumático rueda sobre una superficie dura, sometido a una carga vertical, se produce una deformación radial de cierta importancia. La distribución de presiones en la superficie de contacto no es simétrica respecto del eje Y., tal como se representa en la figura 15.

El centro de presiones y la resultante de fuerzas verticales quedan desplazadas del eje X y hacia adelante, lo que produce un momento alrededor del eje de rotación del neumático, que se opone a su movimiento; a este momento M_y se le denomina momento de resistencia a la rodadura.

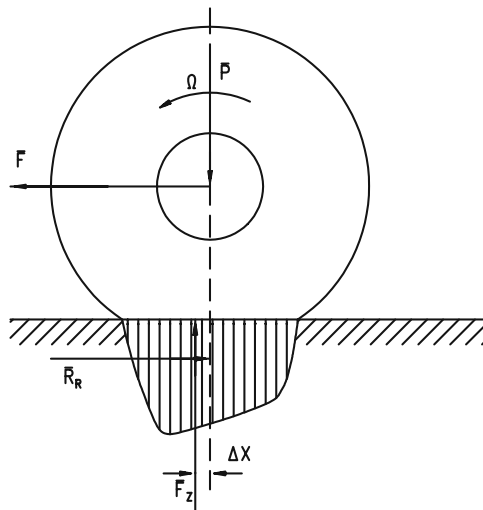


Figura 15: Distribución de presiones en el área de contacto neumático-suelo

Cuando el neumático rueda libremente, sin aplicación de ningún par a su eje, es necesario aplicar una fuerza paralela al plano de rodadura para lograr su movimiento. La condición de equilibrio en dirección longitudinal impone la existencia de una fuerza igual y contraria aplicada en la zona de contacto neumático-suelo; esta fuerza horizontal resultante es comúnmente conocida como resistencia a la rodadura (R_R) y la relación entre esta fuerza y la carga normal a la superficie de rodadura (P) aplicada a la rueda, se denomina

coeficiente de resistencia a la rodadura ($f_r = RR/P$). La resistencia a la rodadura está relacionada con una pérdida de potencia que se debe a los siguientes factores: pérdidas por histéresis en el interior de la estructura del neumático, rozamiento entre neumático y superficies de rodadura causado por deslizamientos locales, resistencias debidas al contacto con el aire interior y exterior, aunque este último factor tiene una importancia mucho menor. Algunos resultados experimentales (15) han puesto de manifiesto, que en el intervalo de velocidades de 128 a 152 Km/h. las pérdidas se distribuyen de la siguiente forma: debido a histéresis interna, 90-95%; debido al rozamiento neumático-suelo 2-10%; debido a resistencia del aire 1.5-3%.

Como se indicó anteriormente, la histéresis causa la mayor proporción de pérdidas de energía en forma de calor; en consecuencia, los factores que más afecten a este tipo de pérdida serán también los que más influyan en la resistencia a la rodadura. Los principales son la velocidad y la deformación.

Además, el coeficiente de resistencia a la rodadura varía también en función de la velocidad de circulación, según se puede observar en la figura 16.

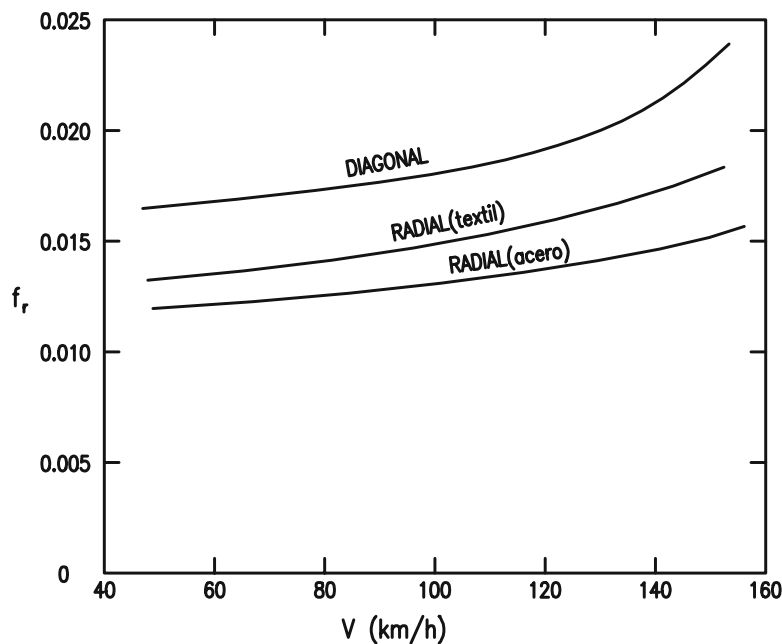


Figura 16: Variación del coeficiente de resistencia a la rodadura en función de la velocidad.

Por otro lado, el tipo de terreno sobre el que se circula también condiciona fuertemente el valor de la resistencia a la rodadura (ver figura 17).

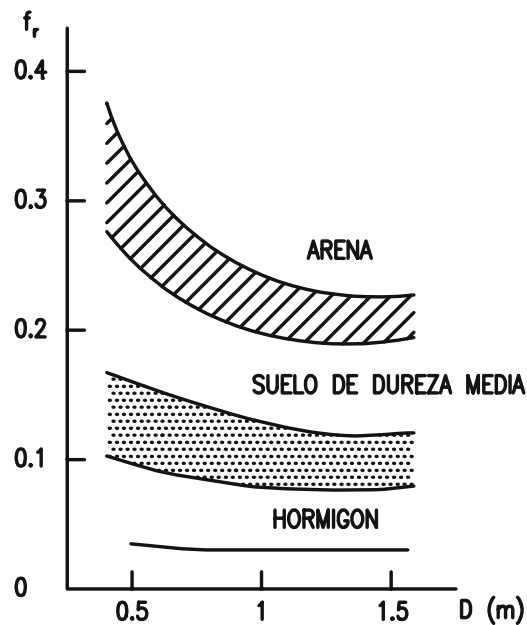


Figura 17: Variación del coeficiente de resistencia a la rodadura en función del tipo de terreno y del diámetro del neumático.

◆ Valores del coeficiente de resistencia a la rodadura

La gran cantidad de factores que influyen sobre la resistencia a la rodadura, hace difícil el establecimiento de expresiones matemáticas que los contemplen en su totalidad. Se han propuesto algunas relaciones empíricas, en base a resultados experimentales, que tienen en cuenta los factores más influyentes como la velocidad o la presión de inflado; así por ejemplo, para neumáticos de turismo, sobre pavimento de hormigón, el coeficiente de resistencia a la rodadura puede calcularse por la ecuación:

$$f_r = f_o + f_s \left(\frac{V}{100} \right)^{2.5}$$

Donde V representa la velocidad en km/h; f_o y f_s son parámetros que dependen de la presión de inflado, y pueden obtenerse de la figura 18.

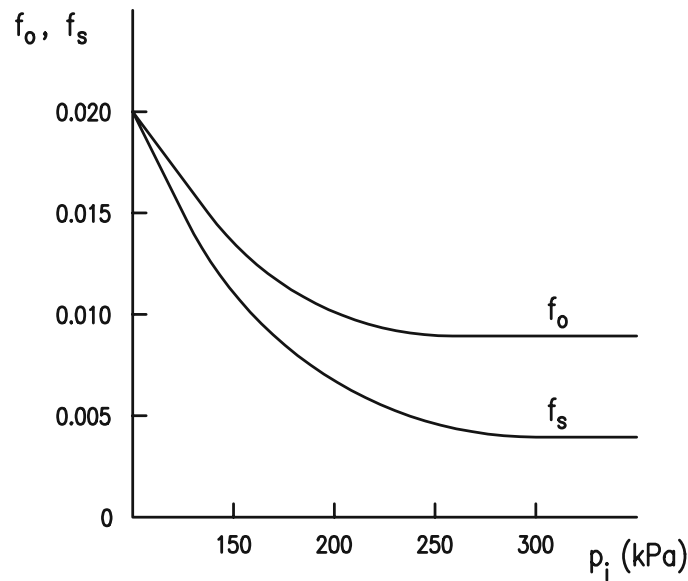


Figura 18: Variación de los coeficientes f_o y f_s en función de la presión de inflado de los neumáticos.

Considerando un intervalo pequeño de variación de la presión (p), puede considerarse, f_r , como una función lineal de la velocidad. Para neumáticos de turismo, con presión de inflado próxima a 179 KPa, rodando sobre hormigón, se ha propuesto la siguiente expresión:

$$f_r = 0.01 \left(1 + \frac{V}{160} \right)$$

Esta ecuación predice bien los valores de f_r para velocidades superiores a 128 Km/h. En muchos casos, puede ser despreciado el efecto de la velocidad, y considerarse un valor medio para el coeficiente de resistencia a la rodadura. Como orientación, en la siguiente se ofrecen algunos valores de este coeficiente, en función del tipo de neumático, según el vehículo a que se destina y la naturaleza del suelo o calzada.

Coefficiente de resistencia a la rodadura (f_r) de los neumáticos.

Tipo de vehículo	Superficie		
	Hormigón o Asfalto	Dureza Media	Arena
Turismos	0.015	0.08	0.30
Camiones	0.012	0.06	0.25
Tractores	0.02	0.04	0.20

5 ESFUERZOS LONGITUDINALES

5.1 TRACCIÓN

Si a un neumático que rueda soportando una cierta carga, se aplica un momento tractor (M_t), en la zona de contacto se generan, junto a las presiones normales, tensiones tangenciales cuya resultante F_x produce, respecto al eje de giro de la rueda, un momento igual y contrario a M_t . (ver figura 19). Ambas acciones antagónicas, sobre el neumático, provocan la deformación de éste, comprimiéndose la banda de rodadura a la entrada de la zona de contacto, y estirándose a la salida de tal manera que un elemento circunferencial no deformado, de valor Δl , cuando pasa a la zona de contacto habrá reducido su longitud a $\Delta l (1 - \epsilon)$.

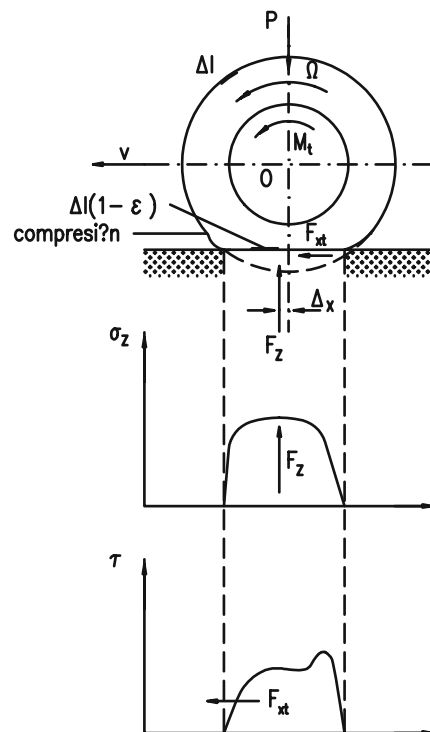


Figura 19: Neumático sometido a esfuerzos normales y longitudinales.

Debido a esta deformación, el neumático actúa como si la longitud de la banda de rodadura fuese menor, o lo que es lo mismo, como si su radio fuese más pequeño que el que corresponde a la rodadura libre (sin momento tractor o de frenado). La velocidad de desplazamiento del eje de la rueda, V , será menor que la teórica, Ωr , siendo r el radio del neumático en condiciones de rodadura libre. Esta diferencia de velocidades es considerada como un deslizamiento por deformación, y el valor de dicho deslizamiento (i), se define por:

$$i = 1 - \frac{V}{\Omega r} = 1 - \frac{r_e}{r}$$

Siendo:

- V - velocidad de traslación del eje de la rueda
- Ω - velocidad angular de la rueda
- re - radio efectivo de rodadura del neumático (re < r)
- i - deslizamiento longitudinal

El deslizamiento longitudinal, es un parámetro importante en la generación de esfuerzos longitudinales en la superficie de contacto neumático-suelo. Se denomina coeficiente de esfuerzo de tracción μ_{xt} a la relación entre el esfuerzo F y la carga P que gravita sobre el neumático, la figura 20 representa la relación encontrada experimentalmente entre dicho coeficiente y el deslizamiento.

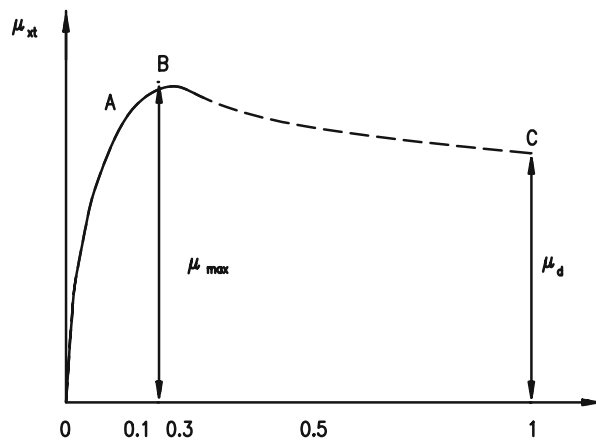


Figura 20: Variación del coeficiente de fricción longitudinal en función del grado de deslizamiento.

Destacan tres zonas y dos puntos, en la curva, que expresan la variación de μ_{xt} con i . La zona OA corresponde a una variación, prácticamente lineal, del coeficiente de esfuerzo tractor con el deslizamiento i ; esto se explica por el hecho de que, por debajo de un cierto valor del esfuerzo tractor, el deslizamiento se debe, exclusivamente, a la deformación elástica de la banda de rodadura. Si aumenta el par aplicado a la rueda, se iniciará el deslizamiento físico del neumático sobre la superficie de rodadura, lo que sucede en la parte posterior de la zona de contacto. En estas condiciones, la relación entre, μ_{xt} e i deja de ser lineal (zona AB). El deslizamiento físico entre neumático y suelo, se extiende progresivamente a toda la zona de contacto, a medida que aumenta el par aplicado a la rueda, hasta alcanzar a la totalidad de la misma; cuando esto sucede, i aumenta hasta la unidad ($V = 0$, $\Omega \neq 0$), es decir, se produce deslizamiento puro, y el coeficiente de esfuerzo de tracción desciende al valor μ_d . El tránsito desde el punto B al C y del valor $\mu_{m\acute{a}x}$ a μ_d , sucede en forma muy rápida.

De los datos experimentales, se desprende que el máximo valor de μ_{xt} para un neumático rodando sobre superficie dura, se obtiene cuando el deslizamiento alcanza valores comprendidos entre el 10 al 30%, correspondiendo los valores inferiores a los neumáticos modernos.

5.2 ESFUERZO DE FRENADO

Si se aplica a la rueda un par de frenado M_f , el efecto sobre la banda de rodadura es opuesto al descrito antes, cuando se consideraba aplicado un par de tracción, es decir, se producirá un alargamiento a la entrada de la zona de contacto y una deformación por compresión a la salida, tal como se ve en la figura 21.

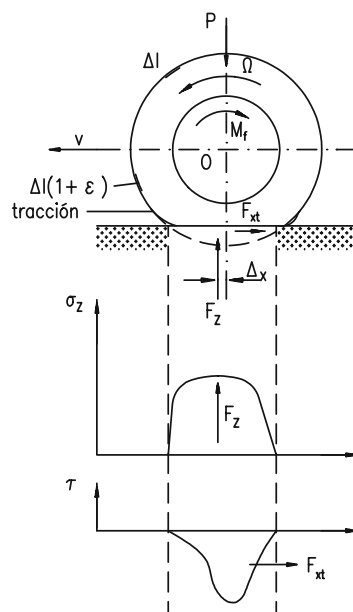


Figura 21: Comportamiento de un neumático sometido a esfuerzo de frenado.

En estas condiciones, la rodadura del neumático se produce como si su diámetro fuese mayor que el correspondiente a rodadura libre, bajo la misma carga. La velocidad de desplazamiento del eje de la rueda (V), será superior a la correspondiente a rodadura libre ($r\Omega$). Ahora el deslizamiento será i_p :

$$i_p = 1 - \frac{r\Omega}{V} = 1 - \frac{r}{r_e}$$

Puede apreciarse en esta expresión que cuando $i_p = 1$ (ó $i_p = 100\%$), $\Omega = 0$, la rueda está bloqueada y se produce deslizamiento puro.

5.3 COEFICIENTE DE ADHERENCIA. VALOR MÁXIMO Y VALOR DE DESLIZAMIENTO PURO



El coeficiente de esfuerzo longitudinal de tracción o frenado puede adquirir valores comprendidos entre 0 y $\mu_{\text{máx}}$ cuanto aumenta el valor de la fuerza F_x . Dicho valor $\mu_{\text{máx}}$ corresponde al valor máximo de la adherencia entre el neumático y la superficie de rodadura, el cual depende de diversos factores que se analizarán más tarde. Una vez superado este límite, el deslizamiento entre el neumático y la superficie de rodadura se extiende de una forma casi instantánea a toda la huella de contacto y disminuye hasta un valor μ_d (coeficiente de adherencia en deslizamiento).

Los valores del coeficiente de adherencia, están influenciados por diversos factores, que podemos agrupar en internos (relacionados con el propio neumático y el vehículo) y externos o relativos al ambiente en que se mueve, especialmente la naturaleza y estado de la calzada.

Los principales factores internos que afectan a $\mu_{\text{máx}}$ son:

- Velocidad de marcha
- Dibujo de la banda de rodadura
- Carga normal sobre la rueda

Los principales factores externos, son los relacionados con la calzada:

- Naturaleza
- Estado de humedad superficial
- Estado de limpieza.

Por último, un factor dependiente de la marcha del vehículo y de los factores externos (aire y trayectoria) es la acción simultánea de esfuerzo tangencial y transversal (FY) en la huella de contacto. A continuación analizamos brevemente la influencia de estos factores.

La velocidad del vehículo influye en $\mu_{\text{máx}}$ y μ_d , haciendo disminuir éstos, de forma análoga a como sucede en la mayoría de los fenómenos de adherencia y rozamiento. Esta variación puede observarse en los datos representados en las figuras 22 y 23.

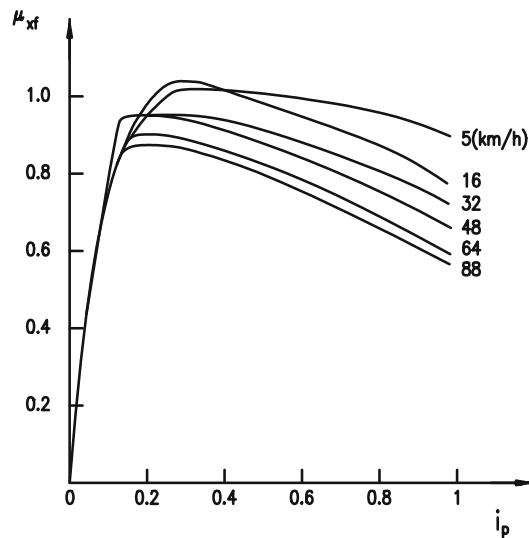


Figura 22: Influencia de la velocidad sobre el coeficiente de esfuerzo de frenado.

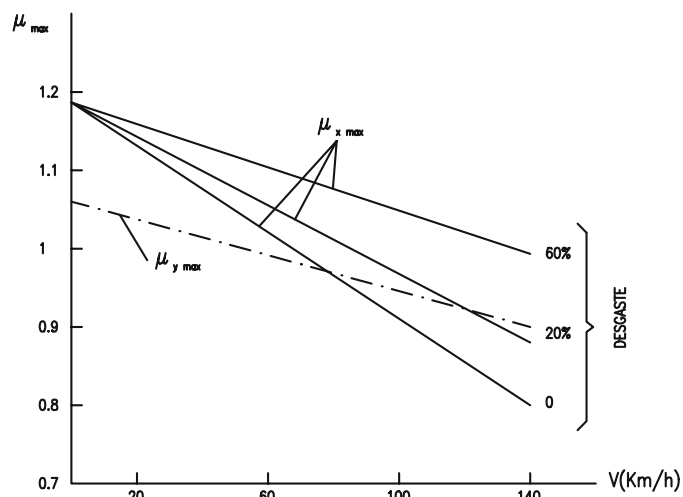


Figura 23: Variación de la adherencia máxima con la velocidad de marcha y el desgaste de la banda de rodadura.

A título orientativo, se adjuntan a continuación los valores medios del coeficiente de adherencia entre neumático y superficie de rodadura en distintas circunstancias:

Superficie	Valor máximo $\mu_{\text{máx}}$	Valor de deslizamiento i_{d}
Asfalto y hormigón secos	0.8-0.9	0.75
Asfalto mojado	0.5-0.7	0.45-0.6
Hormigón mojado	0.8	0.7
Grava	0.6	0.55
Tierra seca	0.68	0.65
Tierra húmeda	0.55	0.4-0.5
Nieve dura	0.2	0.15
Hielo	0.1	0.07

5.4 ESFUERZOS TRANSVERSALES SOBRE EL NEUMÁTICO. DERIVA

Si un neumático rueda sometido exclusivamente a fuerzas verticales (carga) y longitudinales (tracción o frenado), la dirección del movimiento coincide con el eje X (figura 24) contenido en el plano medio de la rueda. Cuando además de estas fuerzas, actúa una fuerza lateral (F_l) en dirección perpendicular al referido plano de la rueda, debido a la aceleración centrífuga en curvas o al empuje del aire, el movimiento real del neumático respecto al suelo, se produce siguiendo una trayectoria que forma un ángulo α con el plano de la rueda (figura 24) que se denomina ángulo de deriva³

El comportamiento del neumático puede explicarse de la siguiente forma. Las fuerzas F_l (aplicada al eje de la rueda) y $F_{y\alpha}$ (en la zona de contacto de la banda de rodadura con el suelo) producen la deformación transversal del neumático, como se indica en la figura 24. Esta deformación afecta en parte a la carcasa y en parte a la banda de rodadura, y dependerá de la rigidez de una y otra. Al rodar el neumático en estas condiciones, un punto de su periferia se desplazará ligeramente de su posición indeformada, a medida que se acerca a la zona de contacto Z1. Este desplazamiento se debe a la deformación de la carcasa, exclusivamente.

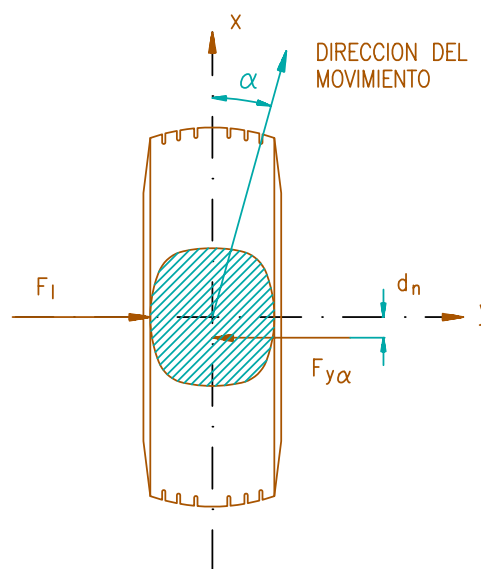


Figura 24: Esquema del comportamiento del neumático sometido a esfuerzos laterales.

Cuando siguiendo el movimiento de rotación de la rueda, penetra en la zona de contacto (posición M1), seguirá desplazándose transversalmente por

³ Es frecuente que el ángulo α sea denominado ángulo de deslizamiento (slip angle), aunque tal denominación puede considerarse incorrecta si se tiene en cuenta que para las aceleraciones transversales usuales, no se produce prácticamente deslizamiento entre el neumático y la calzada.

la deformación de la carcasa, banda de rodadura y un pequeño deslizamiento, hasta que alcanza una posición M2, en el borde de la zona Z2. En esta zona la presión neumático-suelo es suficiente para evitar todo deslizamiento. Durante su movimiento a través de la zona Z2, la adherencia le impone una trayectoria recta M2 - M'2, que forma con el plano de la rueda un ángulo α . Al abandonar la zona 2 se produce nuevamente deslizamiento, en sentido opuesto, dentro de la zona 1 y posteriormente continua su desplazamiento, fuera de la zona de contacto, hasta volver a la posición no deformada que le corresponde en el neumático.

Para valores pequeños del ángulo de deriva se produce un deslizamiento prácticamente despreciable y el segmento recto M2 - M'2 se extiende a toda la zona de contacto, A medida que aumenta lo hace el deslizamiento, siendo éste mucho más acentuado en la parte posterior de la huella de contacto. En el borde anterior, el deslizamiento es muy pequeño, debido, en parte, a la mayor presión normal en la mitad delantera.

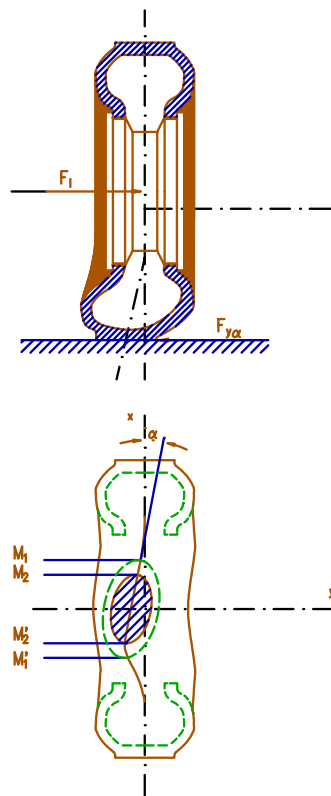


Figura 25. Deformación transversal del neumático bajo la influencia de una fuerza transversal.

En la huella de contacto neumático-suelo (ver figura 25) se genera una fuerza transversal $F_{Y\alpha}$ igual y opuesta a F_I aunque no colineal con la proyección de ésta sobre el plano de rodadura. Para ángulos de deriva pequeños, esta fuerza actúa retrasada respecto a F_I en la dirección OX, una distancia d_n denominada avance del neumático. El producto d_n por $F_{Y\alpha}$ es el

valor de un momento respecto al eje vertical, que tiende a alinear el plano de la rueda con la dirección del movimiento, ayudando a los neumáticos a volver a su posición original, al terminar de recorrer una curva. Este momento se denomina autoalineante ($MZ\alpha$).

Este fenómeno, denominado de deriva, es uno de los factores fundamentales en el control direccional y estabilidad de los vehículos automóviles, siendo de especial importancia la relación entre la fuerza transversal y el ángulo de deriva.

En la figura 26 se detallan las distintas fases del contacto entre neumático y suelo.

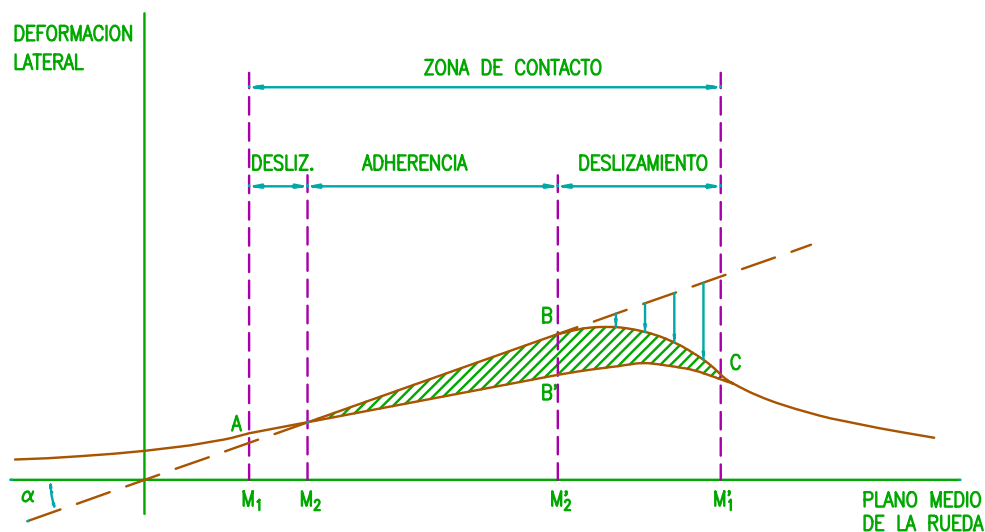


Figura 26: Deformación y deslizamiento lateral en la huella de contacto neumático-suelo

A B C	Línea ecuatorial deformada del neumático.
M1A	Deformación lateral en el punto inicial de contacto, debido a la deformación de la carcasa.
M2B	Deformación total en el límite de la zona de adherencia.
B B'	Deformación de la banda de rodadura.
M2B'	Deformación de la carcasa.

5.4.1 VARIACIÓN DE LA FUERZA TRANSVERSAL DE CONTACTO CON EL ÁNGULO DE DERIVA

La relación entre la fuerza transversal desarrollada en la huella de contacto del neumático con el suelo y el ángulo de deriva, ha sido ampliamente investigada. En la figura 27 se representa la variación de $FY\alpha$ con α , de dos neumáticos equivalentes, uno radial y otro diagonal.

La relación $F_{Y\alpha}(\alpha)$ define las propiedades de un neumático, bajo condiciones operativas específicas (presión de inflado y carga normal), y pueden variar ampliamente de unos neumáticos a otros, en función de su estructura y demás características constructivas.

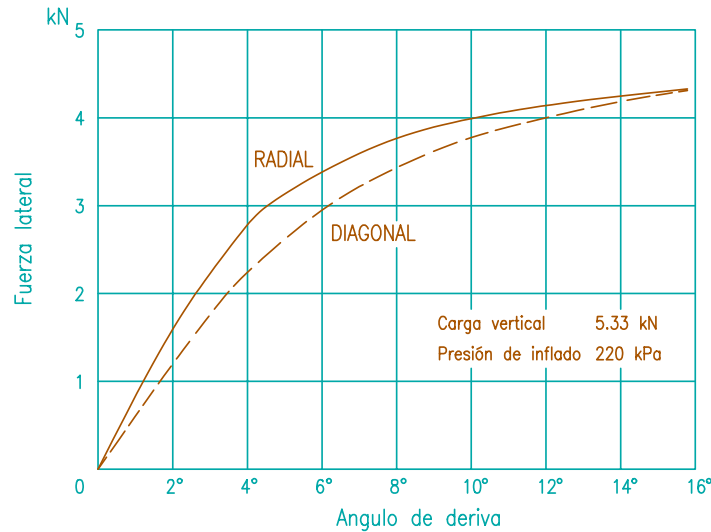


Figura 27: Esfuerzo transversal en función del ángulo de deriva.

Para valores pequeños del ángulo de deriva ($\alpha < 4$ ó 5°), la relación $F_{Y\alpha}(\alpha)$ es prácticamente lineal. Corresponde a aceleraciones laterales menores de $0.3 g$, y es despreciable el deslizamiento lateral neumático-suelo en esta zona. A medida que se incrementa la fuerza lateral que actúa sobre la rueda, aumenta el deslizamiento lateral y decrece rápidamente la pendiente de la curva $F_{Y\alpha}(\alpha)$. La fuerza transversal sigue creciendo con α hasta alcanzar el límite de la adherencia disponible en esta dirección, produciendo el derrape de la rueda.

♦ **Rigidez de deriva (K_α)**

Se define por la derivada de la fuerza transversal con respecto al ángulo de deriva, considerando nula la influencia del ángulo de caída de la rueda. Normalmente se considera el valor correspondiente a $\alpha = 0$, es decir:

$$K_\alpha = \left(\frac{\partial F_y}{\partial \alpha} \right)_{\alpha=0}$$

Este valor representa bien el comportamiento del neumático en la zona correspondiente a pequeños valores de α , y en consecuencia, en el intervalo usual de las condiciones operativas.



5.4.2 FACTORES QUE AFECTAN AL COMPORTAMIENTO TRANSVERSAL DEL NEUMÁTICO

Los principales son:

- Características estructurales y geométricas del neumático.
- Carga normal.
- Presión de inflado.
- Fuerza longitudinal.
- Angulo de caída.

A continuación, se analiza la influencia de estos factores sobre el ángulo de deriva y la fuerza transversal, y posteriormente sobre el momento autoalineante.

Las características del neumático que más afectan al comportamiento transversal son las correspondientes al diseño y construcción de la carcasa, y cinturón en su caso, y el tamaño y la forma de la sección transversal.

En general, la deformación de la carcasa del neumático diagonal es mucho más localizada que en un neumático radial; la mayor rigidez de la banda de rodadura de este último hace que los esfuerzos transversales, transmitidos a la carcasa, se distribuyan a lo largo de una mayor longitud de ésta. Como consecuencia de lo anterior, cabe esperar que los neumáticos diagonales sean más flexibles que los radiales y entre los de este tipo, los de cinturón semirrígido (textil) más flexibles, a su vez, que los de cinturón de acero. Sin embargo, aunque en general lo anterior es cierto, no debe pensarse que la estructura radial, por sí sola, asegura una mayor rigidez de deriva al neumático, esta propiedad está altamente influenciada por los materiales y demás características de construcción, pudiendo suceder que algunos neumáticos diagonales presenten mayor rigidez de deriva que otros equivalentes radiales.

En relación con el ancho de la sección b_n , si ésta se incrementa, a igualdad de las demás características, se necesita una presión de inflado menor para soportar la misma carga vertical, debiendo aumentar la deformación correspondiente a la fuerza lateral. En consecuencia, neumáticos más anchos, con menor presión de inflado, tienen peor comportamiento a la deriva.

La relación nominal de aspecto tiene también influencia en el comportamiento transversal del neumático. Cuando ésta es baja (neumático de gran anchura respecto a su altura, un mismo desplazamiento transversal hace aumentar más R y disminuir r , con lo que el valor de FI es mayor. Análogamente, si consideramos un valor constante de FI la deformación lateral en un neumático de baja relación nominal de aspecto, será menor que en otro equivalente en que esta relación sea mayor. En consecuencia, su rigidez transversal será más alta y mejorará su respuesta en curva.

La carga normal que actúa sobre el neumático afecta de manera importante a sus características de deriva. La consideración de este parámetro adquiere mayor importancia, en el estudio de la estabilidad y control de la trayectoria del vehículo, si se tiene en cuenta el efecto de transferencia de carga de unas ruedas a otras, tanto durante la circulación en curva o bajo los efectos de otras acciones laterales, como en los períodos de aceleración y frenado. En general, la fuerza de deriva aumenta con la carga normal, para un valor constante del ángulo de deriva, como se puede observar en la figura 30. No obstante lo anterior, la capacidad relativa para soportar esfuerzo lateral disminuye al aumentar la carga, este efecto puede evaluarse mediante el coeficiente de deriva (C_α) que se define por la siguiente relación:

$$C_c = C_\alpha = \frac{K_\alpha}{F_z}$$

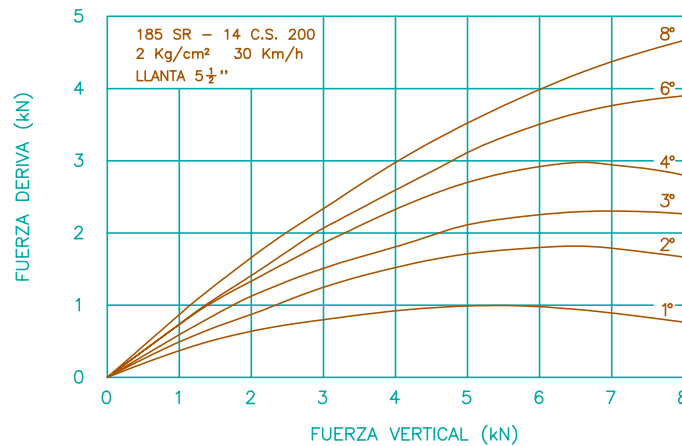


Figura 28: Influencia de la carga normal en el esfuerzo de deriva (lateral).

De igual modo, la presión de inflado tiene una influencia moderada en la propiedades de deriva de los neumáticos, especialmente dentro de los márgenes usuales de aplicación. La rigidez de deriva aumenta con la presión de inflado, aunque su variación es pequeña, este efecto puede utilizarse para modificar las características direccionales del vehículo. En la figura 29 se representa la variación de la fuerza transversal con el ángulo de deriva, en varias situaciones de transferencia de carga y para dos presiones de inflado diferentes.

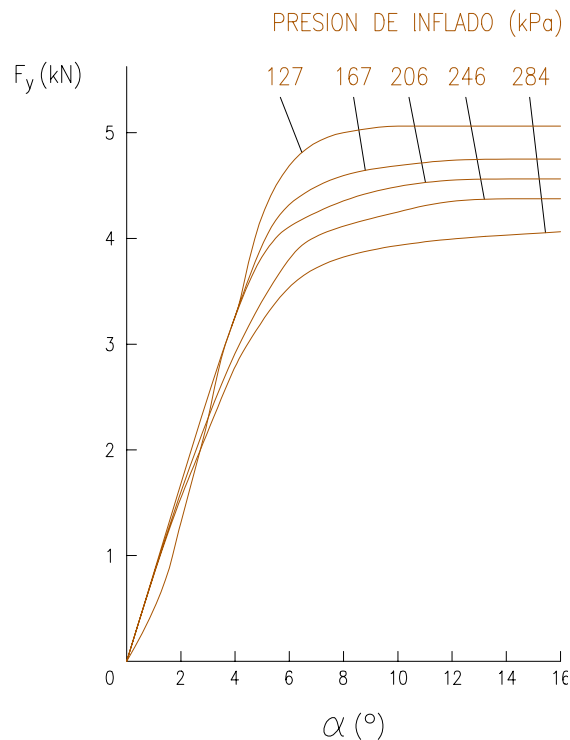


Figura 29: Influencia de la presión de inflado sobre el comportamiento lateral del neumático.

La velocidad tiene una influencia muy pequeña sobre el comportamiento lateral de los neumáticos, sin embargo, a medida que aumenta, se produce mayor generación de calor, debido a las pérdidas de energía por histéresis. El aumento de temperatura ocasiona un incremento de la presión del aire, y por tanto, de la rigidez de deriva.

La aplicación simultánea de esfuerzos longitudinales y transversales influye en el comportamiento lateral del neumático. Este comportamiento se recoge en lo que de manera usual se denomina “círculo de fricción” y que, para la mayor parte de los neumáticos existentes en la actualidad, presenta forma elíptica (pese a denominarse “círculo de fricción”). Lo que representa dicho círculo es que la capacidad de generación de esfuerzos de los neumáticos es limitada y que el esfuerzo total generable es la suma de los esfuerzos longitudinal y transversal (ver figura 30). La forma elíptica del círculo de fricción corresponde a que la mayor parte de los neumáticos presentan mayor capacidad de generación de esfuerzos longitudinales que laterales. Además, el círculo de fricción varía con la carga vertical y con el ángulo de deriva.

Tal como se puede comprobar en la figura 30, para un ángulo de deriva constante, cuando aumenta considerablemente el esfuerzo longitudinal aplicado al neumático, disminuye el esfuerzo lateral que éste es capaz de desarrollar.

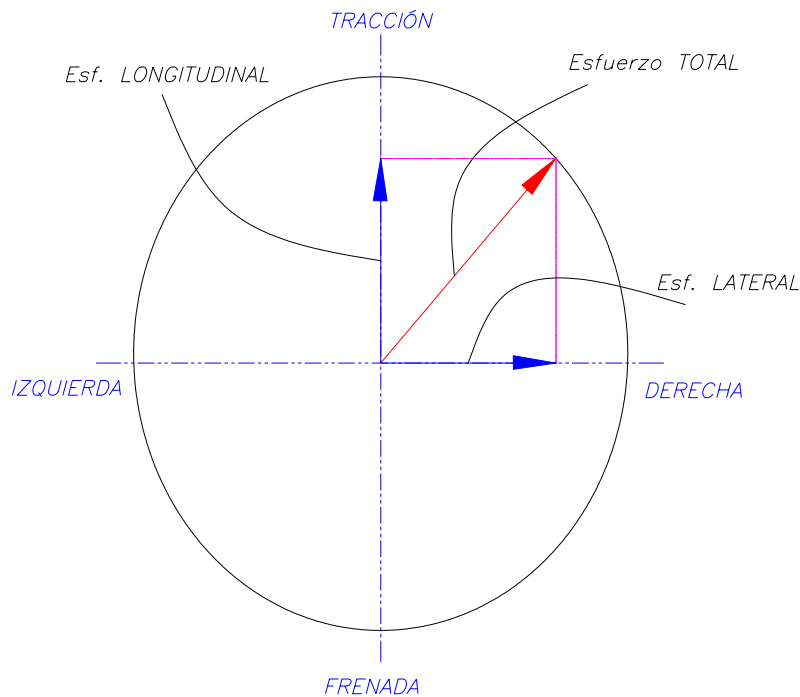


Figura 30: Círculo de fricción de un neumático.

Además, y aunque normalmente no se considere, el comportamiento de los neumáticos no es simétrico, por la propia estructura constructiva de los mismos.

5.4.3 ANGULO DE CAÍDA DE LA RUEDA(γ)

Todo lo indicado anteriormente, en relación con el comportamiento lateral del neumático, se ha realizado sin considerar la inclinación del plano medio de la rueda respecto de la normal a la superficie de rodadura, es decir, se ha considerado que $\gamma = 0$. Lo primero que varía con el ángulo de caída del neumático es la forma de la huella de contacto del mismo sobre el pavimento (ver figura 31). Este cambio genera variaciones en el comportamiento dinámico del mismo.

Cuando una rueda se mueve con un cierto ángulo de caída, se genera una fuerza transversal cuyo sentido queda definido por la posición del eje instantáneo vertical de rotación de la rueda inclinada, como se indica en la figura 32. La proyección sobre el plano $Z = 0$ de la circunferencia media exterior del neumático será un elipse cuyo eje menor aumentará con el ángulo de caída, como se representa en la figura 33. Cualquier punto de esta línea, al recorrer la huella de contacto está obligado a seguir una línea recta, generándose un empuje tangencial transversal F_Y del suelo sobre el neumático. Este empuje resultante, debido al ángulo de caída, tiene su línea de acción adelantada respecto al centro de la huella, lo que produce un momento

que se sumará o restará al de autoalineación según la posición de la rueda y el signo de γ .

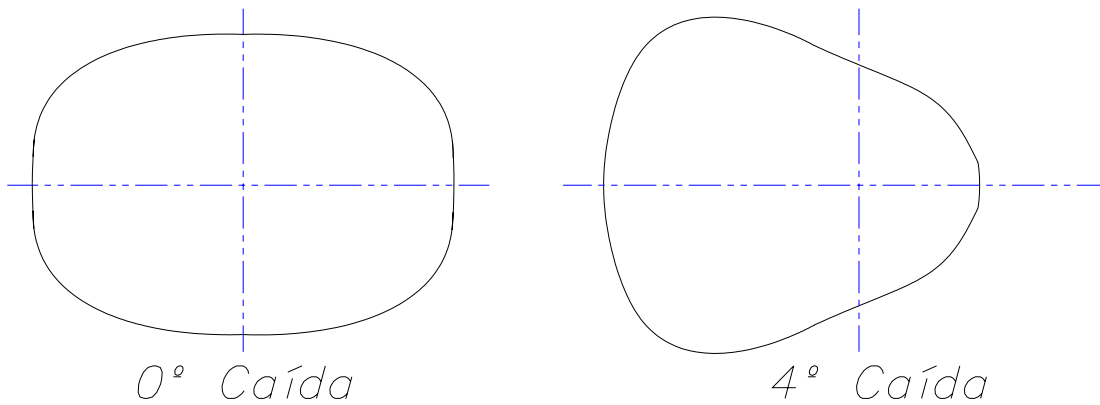


Figura 31: Variación de la huella de contacto con el ángulo de caída del neumático.

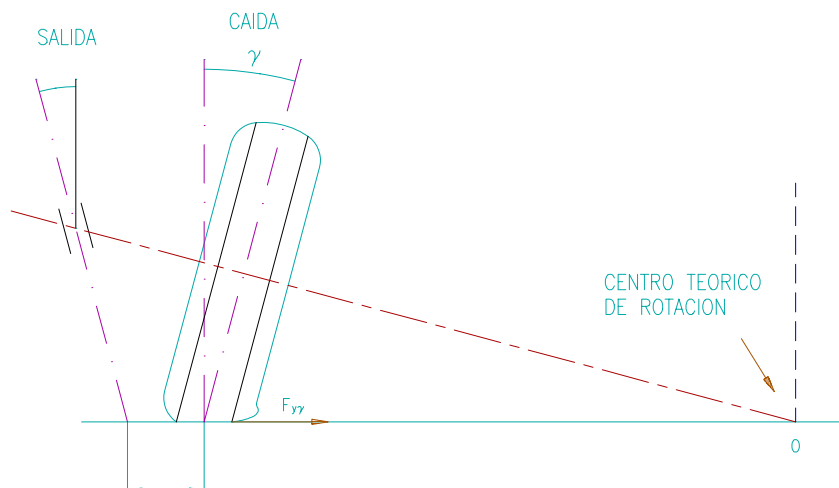


Figura 32: Ángulo de caída del neumático.

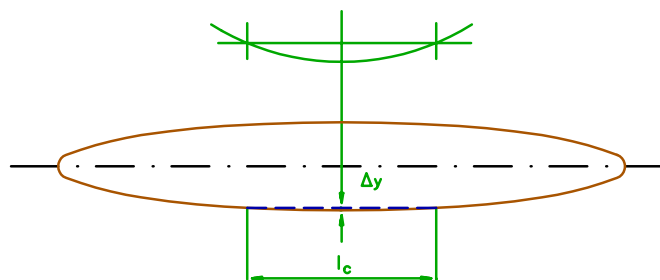


Figura 33: Deformación lateral de un neumático inclinado.

La relación entre la fuerza lateral F_Y y el ángulo de caída, considerando nulo el ángulo de deriva, se muestra en la figura 34. Los factores que influyen en el empuje debido a la inclinación de la rueda, son esencialmente los mismos que afectan a la relación fuerza transversal-ángulo de deriva, entre ellos, la presión de inflado y la carga normal. En lo que se refiere a la presión de inflado, ésta influye poco en la rigidez de caída de los neumáticos radiales. En cuanto a la carga normal, afecta apreciablemente a la fuerza transversal correspondiente a $\gamma = Cte$ como puede apreciarse en la figura 34.

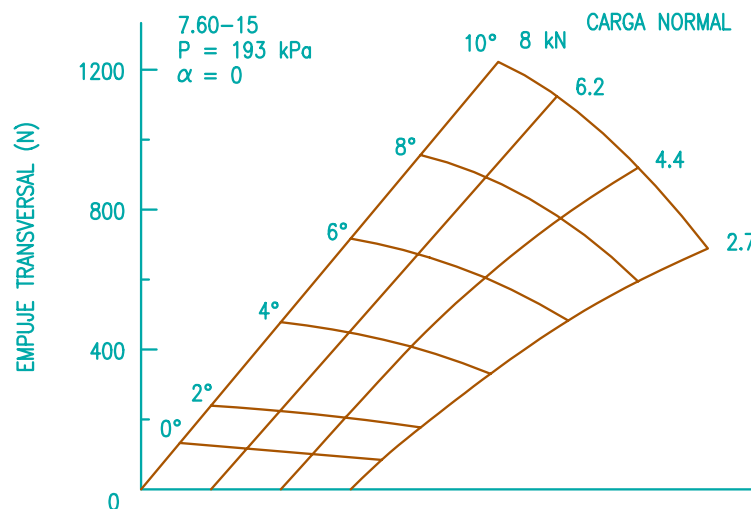


Figura 34: Variación del empuje transversal con el ángulo de caída, para varios valores de la carga normal.

Un parámetro utilizado para comparar las características de diferentes neumáticos en cuanto al ángulo de caída, es la rigidez de caída que se define como:

$$K_{\gamma} = \left(\frac{\partial F_{Y\gamma}}{\partial \gamma} \right)_{\gamma = 0}$$

la fuerza transversal total que actúa sobre una rueda con ángulo de caída no nulo es:

$$F_Y = F_{Y\alpha} \pm F_{Y\gamma}$$

El signo dependerá de la coincidencia o no de los sentidos de $F_{Y\alpha}$ y $F_{Y\gamma}$ y ésta, a su vez, del sentido del empuje lateral que actúa sobre el vehículo y de la inclinación (positiva o negativa) de cada rueda.



Para valores pequeños de los ángulos de deriva y caída, las relaciones entre éstos y las correspondientes fuerzas transversales son lineales, pudiéndose expresar por:

$$F_Y = K_\alpha \pm K_\gamma \gamma$$

5.5 MOMENTO AUTOALINEANTE

Como se indicó al principio, la fuerza transversal de contacto entre el neumático y el suelo, $F_{Y\alpha}$, actúa generalmente retrasada respecto al centro de la huella de contacto, una distancia que denominamos avance del neumático. El producto de esta distancia por la fuerza transversal ($dn \times F_{Y\alpha}$) es el momento autoalineante MZ .

El momento autoalineante es, en realidad, la suma de los momentos, respecto al eje Z de las fuerzas transversales de deriva y de caída; sin embargo, la primera de ellas tiene una mayor importancia que la segunda.

Para dar una idea de lo importante que puede llegar a ser el momento autoalineante, en un vehículo de Fórmula 1, el valor del momento autoalineante puede llegar a ser del orden de 28-30 daN*m por rueda.

Todos los factores que afectan al valor de $F_{Y\alpha}$, y que han sido analizados anteriormente, influirán en el momento autoalineante. Así mismo, modificarán su valor, e incluso su signo, aquellos parámetros que afecten al valor de dn .

Por ejemplo, al aumentar la carga normal sobre la rueda, o disminuir la presión de inflado, aumenta el tamaño de la huella de contacto y con ésta el avance del neumático y el momento autoalineante.

En la figura 35 puede verse la relación entre fuerza transversal y momento autoalineante para diferentes cargas normales, con expresión de la variación del ángulo de deriva. En esta figura se ha representado un haz de curvas que pasa por el origen de coordenadas y que corresponden a valores constantes del avance de neumático.

Puede observarse, que para un valor constante de la carga normal, al aumentar la fuerza transversal, aumenta el ángulo de deriva; como consecuencia de este aumento, se amplía la zona de deslizamiento en la parte posterior de la huella de contacto, disminuye el avance de neumático y se incrementa el momento autoalineante, alcanzando éste un valor máximo y disminuyendo posteriormente. Cuando sobrepasa un cierto valor, MZ puede cambiar de signo haciéndose negativo.

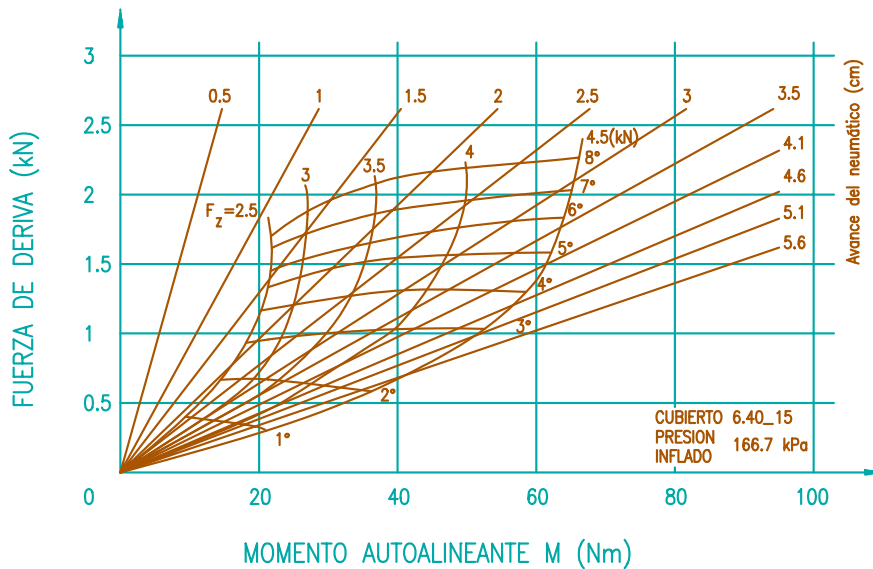


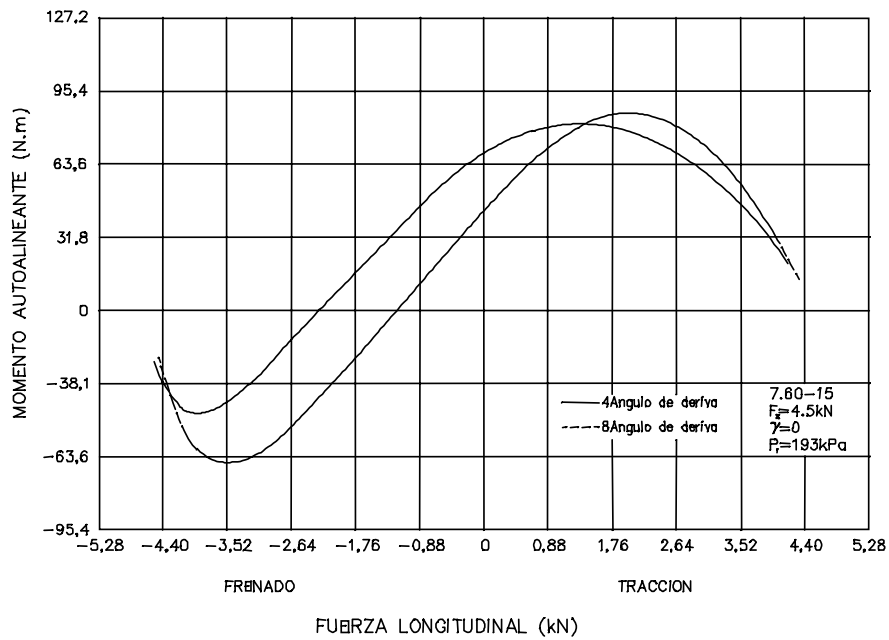
Figura 35: Variación del momento autoalineante con la fuerza transversal.

Un valor positivo del momento autoalineante, cuando α es también positivo, tiende a alinear el plano medio de la rueda, con la dirección del movimiento. Este efecto es deseable; origina un cierto momento resistente en el volante al circular en curva, y a la salida de ésta ayuda a disminuir el radio de giro de las ruedas. Un valor negativo del momento autoalineante originaría un efecto opuesto al descrito; tendería a aumentar el ángulo de giro de las ruedas, y reclamaría del conductor una acción sobre el volante, de sentido contrario al de la curva recorrida, existiendo el riesgo de inestabilidad direccional. Este efecto es sumamente indeseable.

Conviene señalar que el par necesario para modificar la orientación de las ruedas directrices, depende, no solo del momento autoalineante ocasionado por el avance de neumático, sino también del avance geométrico del pivote de la dirección.

La aplicación simultánea de esfuerzos longitudinales de tracción o frenado, afectan significativamente al valor del momento autoalineante, tal como se representa en la figura 36.

Como puede observarse en esta figura, la aplicación de un momento tractor, sobre la rueda, hace aumentar el momento autoalineante hasta alcanzar éste un valor máximo, disminuyendo después si sigue aumentando dicho esfuerzo tractor. Los esfuerzos de frenado tienen un efecto contrario, pudiendo ocasionar el cambio de signo del momento autoalineante.



VARIACION DEL MOMENTO AUTOALINEANTE CON LOS ESFUERZOS LONGITUDINA

Figura 36: Variación del momento autoalineante con los esfuerzos longitudinales.

6 EL ACUAPLANING

Con este nombre se conoce el fenómeno de pérdida de contacto entre la banda de rodadura del neumático y el suelo, cuando se está rodando en una superficie cubierta de agua. Esta situación, que produce la pérdida inmediata de cualquier esfuerzo del neumático (y la consiguiente falta de control), puede producirse tanto cuando el neumático está girando como cuando está deslizando.

Quando se circula por encima de un asfalto mojado y con cierto espesor de agua en el suelo, la rueda al girar tiene que ir desplazando la capa de agua a la que va pisando para poder “pegarse” al suelo y generar los esfuerzos necesarios para acelerar, frenar o circular en curva. Cuando se circula a baja velocidad, el neumático tiene mucho tiempo para poder quitar el agua a su paso. Cuando, por el contrario, se circula a más velocidad, el neumático ya no es capaz de evacuar el agua y se produce un empuje hacia arriba generado por la “resistencia del agua a ser evacuada”. Cuando este empuje es superior al peso que soporta la rueda, se pierde el contacto entre neumático y suelo. La velocidad a la que se produce se denomina “velocidad crítica de acuaplaning” y depende de muchos factores tales como peso sobre la rueda, anchura de la banda de rodadura, número y tamaño de los canales del dibujo del neumático, espesor de la capa de agua sobre la carretera, etc.



7 BIBLIOGRAFÍA

- ◆ Tyres, suspension and handling. J. Dixon.
- ◆ Teoría de vehículos automóviles. F. Aparicio, C. Vera, V. Díaz.
- ◆ Fundamental vehicle dynamics. T. Gillespie.