

2. EL NEUMÁTICO

2.1 INTRODUCCIÓN.

Las funciones a desarrollar por el neumático, como enlace elástico entre el vehículo automóvil y el suelo, son las de transportar carga, contribuir a la suspensión y amortiguación, aportar flotación y permitir la guía y tracción por medio del desarrollo de fuerzas de estabilidad direccional y pares motrices y de freno.

Por otra parte, el neumático debe reunir características apropiada como las de resistencia al desgaste, resistencia a las sollicitaciones dinámicas a que está sometido, poca resistencia a la rodadura y las indispensables de seguridad.

Se puede decir que el neumático es el componente más significativo de todo vehículo. El resto de la motocicleta se debe diseñar en función de los neumáticos que se hayan elegido como óptimos. Luego de su elección se determina por ejemplo la anchura de llantas, el tamaño de los frenos, horquillas, tijas, basculantes, recorrido de la cadena, (afecta a la instalación del motor) e incluso a la geometría de la dirección.

Como consecuencia de lo anterior es fundamental tener datos experimentales de cómo se comporta el neumático y que fuerzas actúan en su rodadura sobre la carretera.

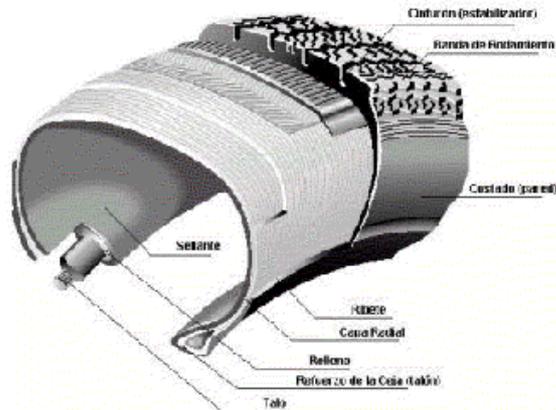
2.2 ESTRUCTURA DEL NEUMÁTICO.

La forma de la superficie de contacto y la manera en que se deforma el neumático son factores críticos para su rendimiento. La resistencia del neumático proviene de las capas, capas de nylon, rayón, kevlar, e incluso de acero en algunos neumáticos de automóvil. El material tejido suele estar formado de hilos con trama y urdimbre que se cruzan aproximadamente a noventa grados y que se entretejen.

Cuando este material se utilizó por primera vez en los neumáticos se consiguió la flexibilidad multidireccional que se buscaba, por los puntos en que el material de la trama se cruzaba con el de la urdimbre se producían roces, desgastes y averías imprevisibles. Luego se creó un material de “cuerdas” sin tramas, que tenía todos los hilos de la urdimbre paralelos y sujetos entre sí por hilos delgados que estaban colocados a intervalos de poco más de un centímetro y que servían para poder manejar el material hasta la fabricación del neumático.

Las capas se aseguran a unos cables de acero que siguen el borde del neumático. El material de las capas, su número y el ángulo que forman entre sí determinan la resistencia de la cubierta, y estas capas se llaman capas de cubierta. Cuando forman un ángulo entre sí, de tal manera que los hilos se cruzan formando ángulos bastantes cerrados, la cubierta se llama de capas axiales.

El material de las capas, su ángulo y el número de capas se pueden variar para modificar la resistencia la deformación del neumático sometido a esfuerzos. Lo más corriente es que tenga cuatro capas, a veces con un relleno de sección angular para reforzar el perfil así se consigue un neumático flexible y barato, aunque bastante pesado.



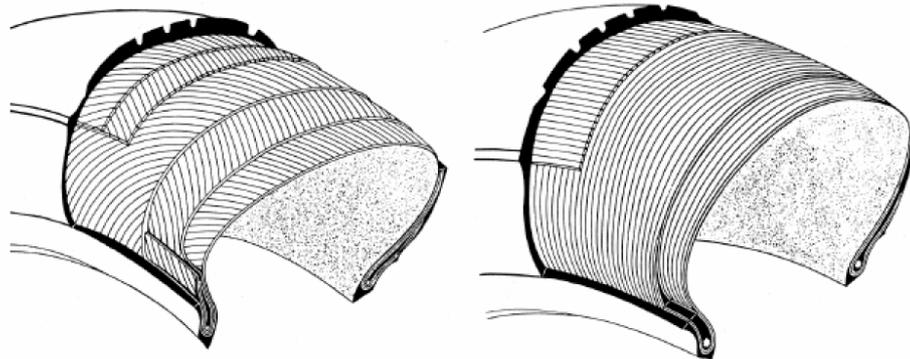
- **Banda de Rodamiento.** Interfaces entre la estructura de la llanta y el camino.
- **Cinturón (estabilizador):** Elemento de acero que entrega resistencia y estabiliza banda de rodamiento.
- **Capa Radial:** Contiene la presión del aire.
- **Costado (pared):** Resiste la flexión y protege la capa radial.
- **Sellante: 1 o 2 capas de hule (neumáticos sin cámara);** resiste la difusión del aire y reemplaza la función de las cámaras.
- **Relleno.** Se usa para llenar el área de la ceja (talón).
- **Refuerzo de la Ceja (talón).** Amarra la capa radial y estabiliza la zona de transición de la ceja.
- **Ribete.** Elemento usado como referencia para el asentamiento adecuado de la ceja sobre el anillo.
- **Talo.** Cuerpo de alambres de acero de alta resistencia, que da robustez y mantiene el diámetro de la llanta.

Está formado de materiales gruesos por necesidad, y su flexión hace que se caliente bastante; la deformación de la superficie de rodamiento en la superficie de contacto origina unas deformaciones en forma de bultos salientes por delante y por detrás de esta.

Esta deformación localizada hace que sea más difícil controlar la forma de la superficie de contacto; además, hace también que neumático se caliente más.

Un efecto secundario de la estructura de los neumáticos de este tipo es que a altas velocidades se ensancha en el sentido del diámetro de la rueda, debido a la fuerza centrífuga. Este efecto aumenta la relación de multiplicación de las marchas, modifica el perfil de la rueda y muchas veces también hace que se desgasten partes del guardabarros.

Los primeros intentos de reforzar los neumáticos de moto consistieron en utilizar capas de kevlar y ceñir un “cinturón” grueso alrededor de todo el neumático, bajo la superficie de rodamiento, acero grados de la línea de la rueda o formando un ángulo cerrado con la misma. Este cinturón pretendía evitar las deformaciones de las axiales corrientes, con lo que se conseguiría un mejor control del neumático y podría funcionar recalentándose menos, eso permitiría a su vez fabricarlo de un compuesto más blando que diera mayor adherencia.



Neumático convencional

Neumático radial

Al ir avanzando los progresos técnicos, se hizo posible construir neumáticos con menos elementos; esta construcción más ligera permitió un funcionamiento más frío lo que permitió a su vez el empleo de materiales todavía más blandos. En esta etapa se estaban construyendo neumáticos axiales con capas a ángulos muy abiertos; sólo faltaba un paso para llegar a las capas que no se

cruzaban para nada sino que eran paralelas ente sí y formaban un ángulo de 90° con respecto al borde del neumático: los neumáticos radiales.

Esta construcción tiene varias ventajas. Cada capa recorre el camino más corto entre los cables de anclaje, así, cada hilo es más resistente que el mismo hilo usado en una construcción axial, y para la misma carga se producirá una deformación menor. Un cinturón recorre la circunferencia exterior, a cero grados, y aumenta la resistencia de la superficie de rodamiento reduciendo la deformación a altas velocidades. Esta construcción también permite que el neumático se deforme de manera bastante regular sobre toda su superficie, en vez de formar los abultamientos localizados cerca de la superficie de contacto que son característico del neumático axial. Esto permite un mejor control de neumático, y reduce su temperatura de funcionamiento.

2.3 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS.

Bajo el punto de vista mecánico, el neumático puede entenderse como un cuerpo de forma toroidal compuesto por una carcasa flexible constituida por un conjunto de cables “cord” de elevada tenacidad anclados a dos aros metálicos -talones- que sujetan el conjunto firmemente a la llanta. La presión interna del aire comprimido que encierra el neumático, somete la carcasa a tensión, de tal modo que la deforme. La naturaleza de las fuerzas de reacción varía substancialmente según la dirección y punto de aplicación de las fuerzas exteriores.

2.3.1 Flexión vertical.

La *flexión vertical* o aplastamiento del neumático es una característica que depende de la variación de tensiones que experimentan los cables de la carcasa en donde se aplica la carga, y del número de ellos que quedan involucrados en el cambio. Cuando este se aplasta por una carga vertical,

aparece por dicha causa, y en virtud de la nueva forma de equilibrio que adopta la carcasa en la región deformada, una fuerza contraria a la que causa el aplastamiento.

La presión de inflado es el principal factor del que depende la flexión, aunque también interviene, con mucha menor cuantía, la rigidez de la carcasa.

El cambio en la presión de inflado debido a la disminución de volumen que sigue a la flexión, es muy pequeño y de importancia despreciable en las características carga-flexión del neumático.

2.3.2 Capacidad de carga.

La capacidad de un neumático depende de varios factores como son la presión de inflado, tamaño del neumático, flexión, velocidad y longitud de recorrido.

La experiencia enseña que cada tipo de neumático, ya sea diagonal o radial, trabajará en condiciones satisfactorias si la flexión no excede de cierto valor, que normalmente se expresa en tanto por ciento referido a la altura de la sección del neumático.

Así pues, el nivel aceptable de flexión viene fijado por consideraciones de limitación en la generación de calor, pues si se sobrepasa, la temperatura resultante degrada los compuestos de goma e incluso las fibras de algunos tejidos de la carcasa.

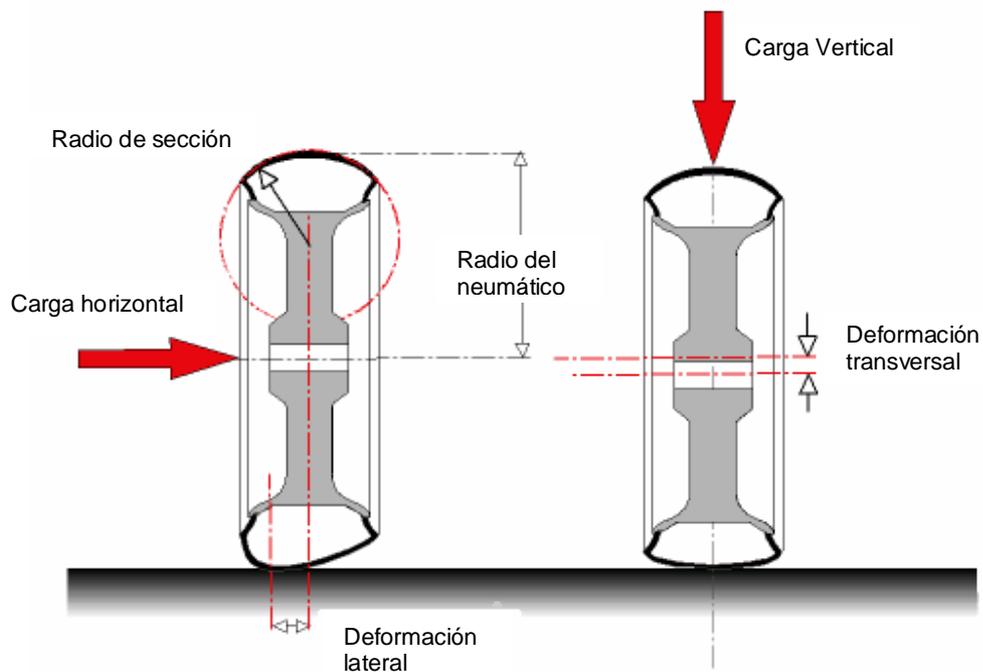
2.3.3. Deformación elástica

El neumático es un cuerpo elástico que se comporta como resorte con tres grados de libertad.

El coeficiente elástico radial se obtiene midiendo la pendiente de la curva de carga en función de la flexión en el punto correspondiente a las condiciones de trabajo. Generalmente se determina el coeficiente de rigidez estático, por ser más fácil, aunque resulta mayor que el dinámico. El cambio mayor ocurre en las

cubiertas diagonales, y sobre todo a velocidades bajas. La presión de inflado es la variable que más afecta al coeficiente de rigidez radial, aumentando ésta con aquella aunque también crece con un menor ángulo del cable "cord", mayor ancho y radio del rodamiento, mayor coeficiente de elasticidad del tejido y superior número de capas.

Las sollicitaciones transversales que más influyen en la respuesta elástica son las que perturban la marcha direccional del vehículo y a las de transferencia de carga. Igual como en la deformación vertical, se define como coeficiente elástico transversal la pendiente en un punto dado de la curva que relaciona la fuerza y la deformación lateral de un neumático parado.



2.4 FUERZAS EN EL NEUMÁTICO.

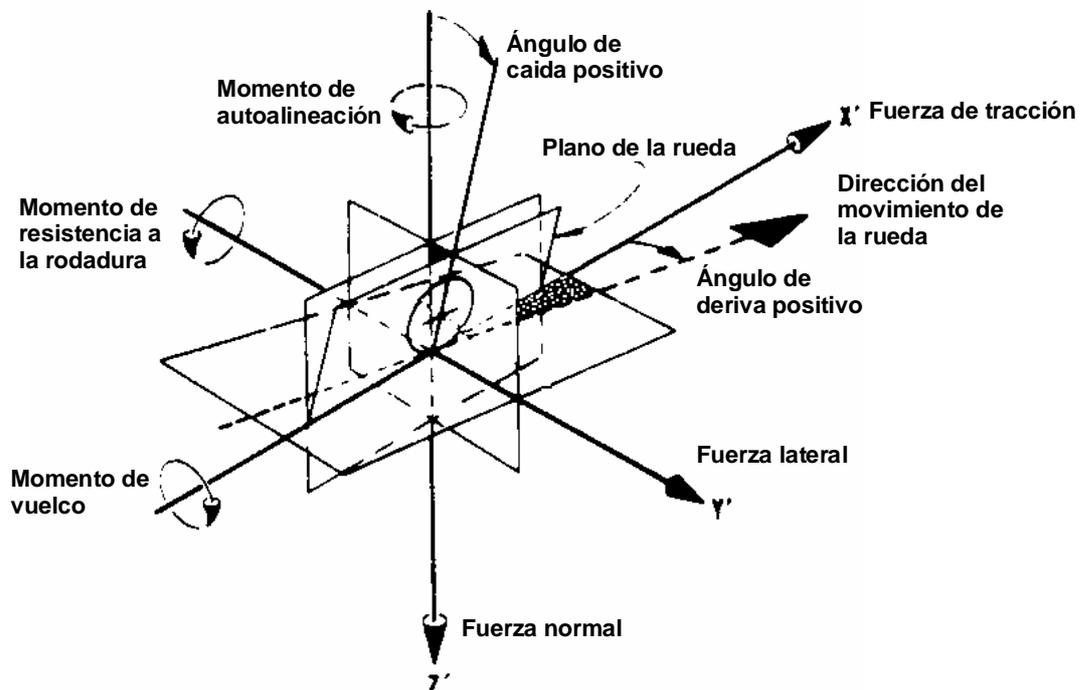
Para el diseño de una máquina con la cuál se quieren obtener las fuerzas que actúan en la interacción neumático-carretera es necesario conocer la relación que existe y las fuerzas y momentos que se producen.

El neumático entre otras funciones cumple dos importantes para el control direccional del vehículo:

- Desarrolla las fuerzas de tracción – motrices y de frenado –
- Genera las fuerzas laterales para la guía del vehículo.

Por lo tanto las variables que entran en juego son fuerzas y momentos.

Las fuerzas que aparecen entre el neumático y la carretera obran sobre el área de contacto entre ambos. Consta de fuerzas normales contra la superficie de apoyo del neumático y de fuerzas perpendiculares a aquéllas, contenidas en el plano de la propia superficie de contacto.



Estas fuerzas resultantes van acompañadas de momentos, cuyo sistema de ejes coordenados, cuyo origen es el centro de contacto del neumático, es decir, el punto de intersección del plano central de simetría de la rueda – perpendicular al eje de rotación – con la proyección del eje de rotación sobre el plano de contacto entre neumático y suelo.

Los ejes tienen la siguiente dirección:

- X – Intersección del plano central de la rueda con el apoyo, con sentido positivo según el eje de avance de la moto.
- Y – Contenido en el plano de contacto, tiene sentido positivo hacia la derecha mirando en el sentido de la “X” positiva.
- Z – Perpendicular al plano de contacto

Los valores de fuerzas y momentos considerados en este sistema, son los de reacción de la carretera contra el neumático. Así pues, las F_x son fuerzas de tracción, las F_y las laterales y las F_z las de gravedad que transmite el neumático. El momento M_x produce tendencia al vuelco de la rueda; el M_y es el creado por la resistencia a la rodadura en la zona de contacto; y el M_z , de giro, reversibilidad o autoalineamiento, es el producido por las fuerzas de rozamiento de la zona de contacto con respecto al eje Z.

El momento de vuelco, dividido por la fuerza normal al área de contacto, da el desplazamiento lateral del centro de aplicación de dicha fuerza, mientras que el desplazamiento longitudinal del mismo se obtiene dividiendo el momento de resistencia a la rodadura por la misma fuerza.

El momento de tracción (T), motriz o de frenado, que se aplica al eje de la

$$T = F_x \cdot R_c + M_y \cdot \cos \gamma + M_z \cdot \sin \gamma$$

Siendo R_c el radio bajo carga dinámico, es decir, la distancia que separa los centros de contacto y el de la rueda, y γ el ángulo del plano de la rueda con el eje de Z.

Del mismo modo la resistencia a la rodadura:

$$F_R = \frac{M_y}{R_c \cos \gamma}$$

Donde M_y es el valor del momento correspondiente cuando no hay par de reacción aplicado a la rueda.

El mecanismo principal que causa la resistencia a la rodadura, en una carretera de piso rígido, es la disipación de energía debida a la deformación que sufre la banda de rodaje del neumático cuando se aplasta contra el suelo a lo largo de la superficie de contacto común. Esto hace que los esfuerzos verticales de contacto sean más elevados en la parte delantera de la huella que en la posterior de ésta, en el sentido de avance del neumático. Por esta razón, el momento de las fuerzas verticales con respecto al eje de rotación no es cero.

2.4.1 Fuerzas laterales.

Las fuerzas laterales que genera el neumático pueden considerarse divididas en dos grupos:

- Fuerzas de reacción por sollicitaciones externas
- Fuerzas debidas a la estructura propia

Las primeras son producidas por deformaciones del neumático debidas a la carga que soporta y por la forma con que hace el contacto con el suelo a través de dos ángulos importantes: el de deriva, creado por las fuerzas laterales de viraje, y el de caída de la rueda.

Las segundas, de carácter parásito, se deben a la falta de total uniformidad del neumático, las cuales, a efectos de su influencia en el vehículo, se agrupan en tres tipos: a) fuerzas de empuje lateral o de conicidad, b) variación de fuerzas laterales, y c) variación de fuerzas radiales.

Las de tipo a) dan lugar a tiro lateral en dirección perpendicular al plano de la rueda, las de tipo c) serpienteo lateral, y las d) a vibraciones o sacudidas rítmicas verticales.

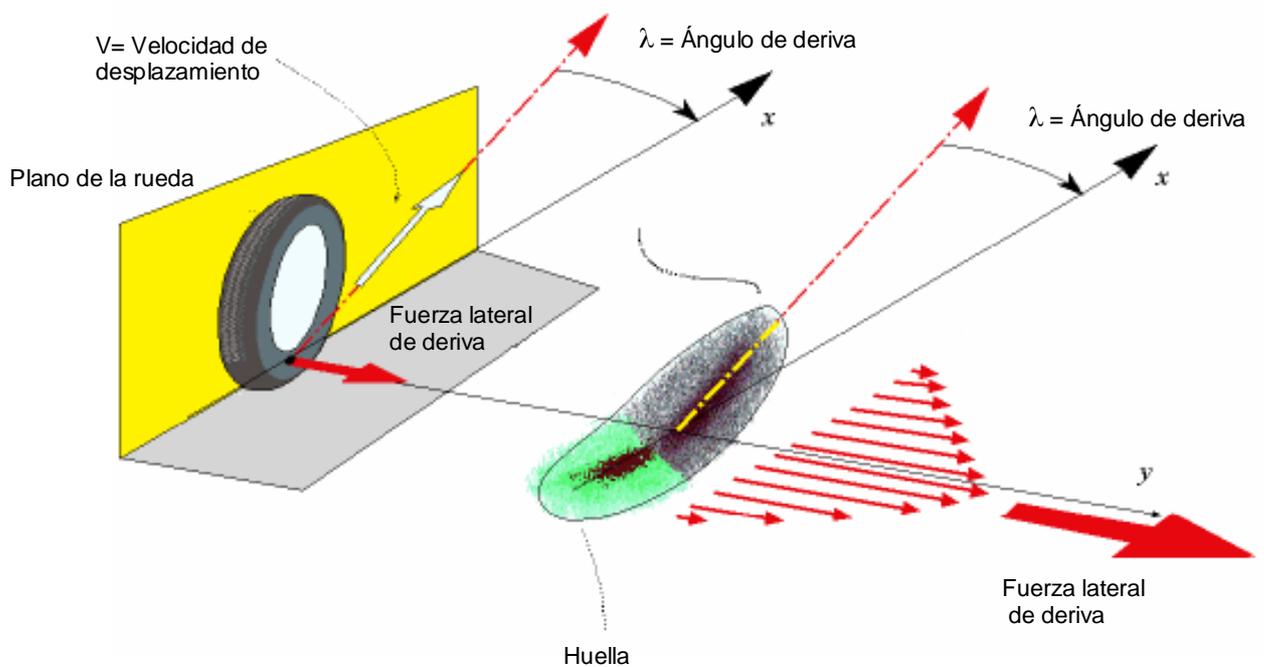
Por lo tanto se puede decir que las fuerzas laterales de falta de uniformidad se presentan a pesar de que, en teoría, las fuerzas laterales y de los momentos de alineación y vuelco deben ser nulos, por la condición de ángulo de caída y de deriva nulos.

La *flexión vertical* o aplastamiento del neumático es una característica que depende de la variación de tensiones que experimentan los cables de la carcasa en donde se aplica la carga, y del número de ellos que quedan involucrados en el cambio. se deduce de la expresión:

2.4.1.1 Fuerzas de reacción.

- **Fuerza de deriva**

La fuerza lateral producida por un neumático que rueda, es una función de varias variables. La más importante es el ángulo de deslizamiento o de deriva, que forma la dirección de avance real del neumático y la recta de intersección de la superficie de contacto con el plano central de la rueda.

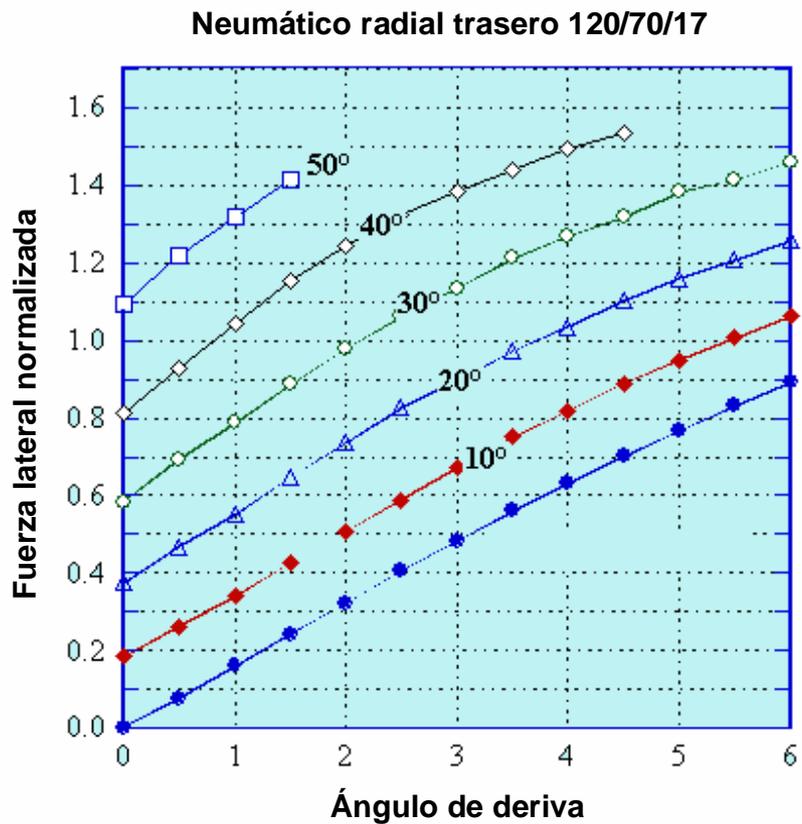


En este dibujo se puede ver la distribución que toman las fuerzas laterales debido al ángulo de deriva.

Si se observa la gráfica siguiente en la que se ha representado:

X – Ángulo de deriva

Y – Fuerza lateral normalizada, es el cociente entre la fuerza lateral y la fuerza vertical en el neumático.



La pendiente de esta curva, ángulos pequeños de deriva, es una medida de la rigidez del neumático a la deformación que sufre por causa de la fuerza lateral.

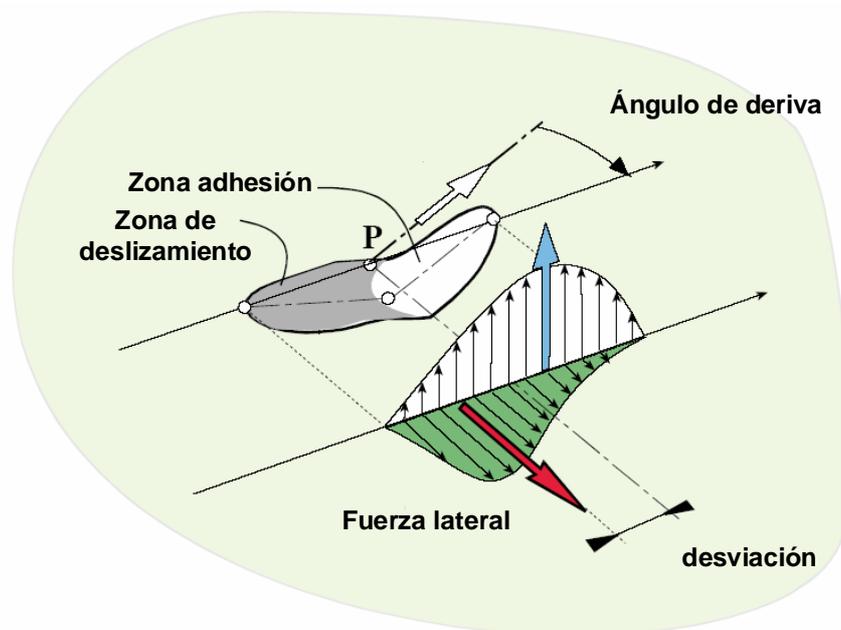
En general, la cubierta radial tienen mayor rigidez a la deriva, lo que es una cualidad que la distingue típicamente; sin embargo, el interés de esta propiedad en un neumático es cuestión de juzgarlo en el conjunto de la respuesta de la motocicleta.

La carga vertical es una variable que influye en la fuerza de deriva, pero para ángulos pequeños de deriva, la influencia de la carga es despreciable, aunque es más significativa con ángulos mayores.

También la presión de inflado afecta a la fuerza de deriva, de tal modo que ésta aumenta con un incremento de presión, particularmente con ángulos de deriva pequeños.

- **Momento de autoalineación.**

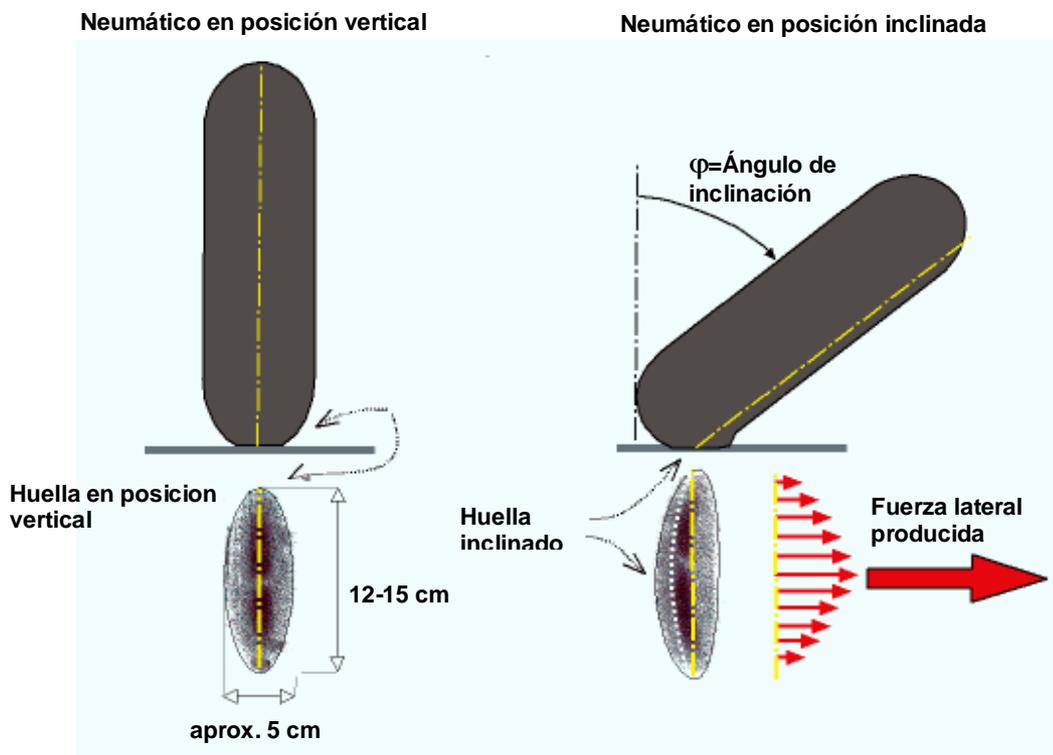
El momento de autoalineación se debe a desigual distribución de las fuerzas laterales de deriva en el área de contacto. Por tanto, es de eje vertical. El centro de aplicación de la resultante de las fuerzas laterales que aparece en dicha área, está generalmente situado detrás del centro del área de contacto. Esto da lugar a un par que se opone a la acción de la fuerza de giro transmitida desde el manillar, y tiende a hacer disminuir el ángulo y la fuerza de deriva.



El par de autoalineación adquiere un valor máximo a valores de ángulo de deriva más pequeños que para los que lo hace la fuerza de deriva. Viene afectado por los mismos valores que intervienen en la fuerza de deriva, en especial aquellos que favorecen el aumento del área de contacto, tales como un incremento de carga y una disminución de la presión de inflado.

- **Influencia del ángulo de inclinación.**

Una explicación del por que aparece una fuerza lateral cuando el neumático tiene un ángulo de caída distinto de cero, es la siguiente: Se considera que un punto o elemento de la banda de rodaje sigue un camino distinto del que adoptaría si no entrase en contacto con el suelo.



Sea un neumático que, inclinado de un cierto ángulo con respecto al eje de la z , progresa en dirección de X , lo que hace que se halle sometido a una reacción del suelo en el sentido Y .

Cuando el neumático gira, cualquier punto de la banda de rodaje sigue la trayectoria circunferencia indicada por las flechas. Al entrar en el área de contacto sucede que, por ser el ángulo de caída pequeño, no sufre movimiento relativo alguno de deslizamiento con respecto al suelo, en virtud de lo cual seguirá una trayectoria rectilínea hasta que salga de dicha área de contacto.

Si el neumático no estuviese deformado por su aplastamiento contra el suelo, esta última trayectoria sería elíptica. Luego, la diferencia de trayectoria obedece a la deformación impuesta lateralmente a la banda de rodaje por unas fuerzas transversales transmitidas por el suelo y el eje de la rueda, las cuales aumentan desde la entrada en contacto con el suelo del elemento considerado hasta el centro del área, para disminuir luego hacia atrás hasta el punto de salida.

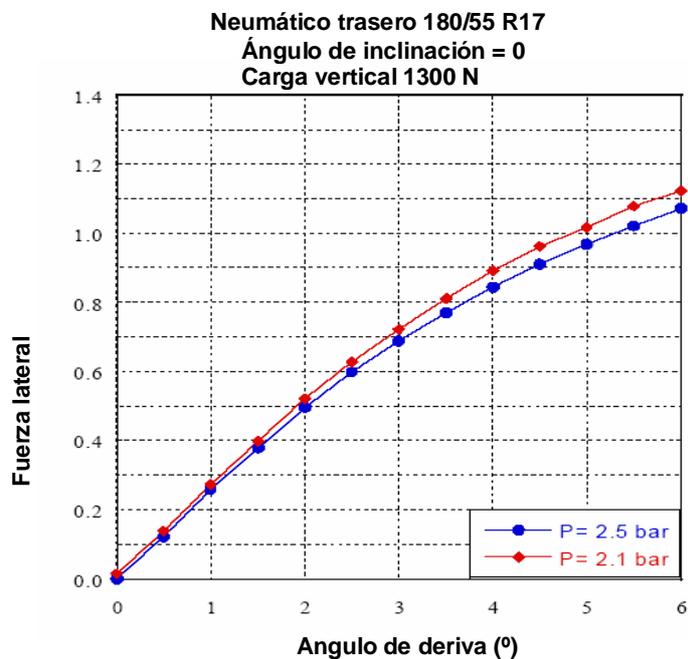
Así como el centro de presión de la fuerza lateral, debida al ángulo de deriva, está normalmente detrás del centro del área de contacto, en el caso de la fuerza lateral provocada por el ángulo de caída está por delante de dicho centro de contacto. Parecidamente, si el momento de autoalineación producido por la deriva tiende a girar la rueda reduciendo la fuerza lateral, el momento de autoalineación producido por la fuerza lateral, el momento de autoalineación producido por la fuerza lateral del ángulo de caída tienen a girar la rueda incrementándola.

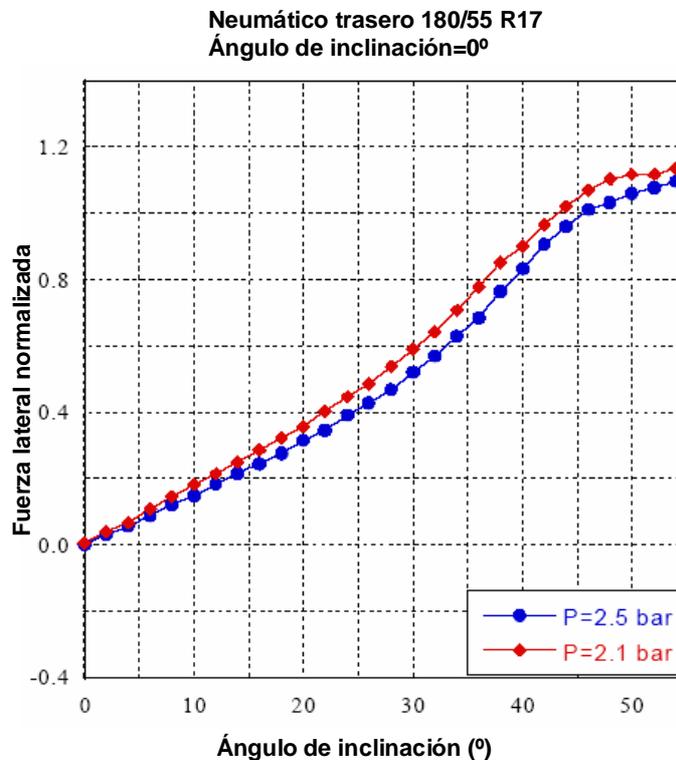
- **Presión de inflado.**

El efecto de la variación del inflado no es el mismo para todos los neumáticos. Sin embargo, se observa, en general, que un aumento de presión crea una disminución de fuerza lateral y una disminución de momento de autoalineación.

Como datos experimentales se pueden observar dos gráficas obtenidas en el ensayo de un neumático en una máquina con la misma finalidad a la que se pretende diseñar.

En las dos gráficas se considera una carga vertical igual a 1300N. En la primera el ensayo se realiza con un ángulo de inclinación igual a 0, variando el ángulo de deriva se obtuvieron los resultados de la fuerza lateral. Sin embargo en la segunda se hizo a la inversa, el ángulo de deriva es cero y lo que se varía es el ángulo de inclinación.





- **Consideraciones sobre fuerzas laterales.**

La fuerza lateral es función del ángulo de deslizamiento creado por el fenómeno de la deriva y del ángulo de caída para cada par de valores de la fuerza normal transmitida al suelo por el neumático y de la presión de inflado de éste. Esto, sin embargo, solo es cierto en el caso en que la fuerza de tracción aplicada al neumático sea nula; si no es así, la fuerza lateral resultante viene modificada según el valor de la fuerza motriz o de frenado.

De todos modos, se aprecia que lo más importante de estas variables que influyen en la fuerza lateral es el ángulo de deriva.

El coeficiente de rigidez a la deriva es función de la presión de inflado y del tipo de neumático, es decir, no sólo si es radial o diagonal, sino incluso del tipo de construcción en cada uno de éstos.

La fuerza lateral engendrada por el ángulo de caída del neumático es relativamente pequeña comparada con la creada por el ángulo de deslizamiento a la deriva de magnitud similar. Comparativamente, 1° de deriva suele ser equivalente a 4°/6° de caída en cubiertas diagonales. La cubierta radial es menos sensible, con relación a estas últimas, a efectos de caída, en la proporción de 2 a 3 veces menos.

La rigidez de caída, e decir, la medida de la capacidad del neumático para engendrar una fuerza lateral en función del ángulo de caída de la rueda, y que viene determinada por la pendiente en el origen de coordenadas de la función “fuerza lateral/ángulo de caída” aumenta con la presión de inflado, pero con menos intensidad que la de deriva.

Dadas las definiciones de rigidez a la deriva y a la caída, sus valores pueden expresarse por sus coeficientes respectivos, puesto que son las derivadas en el origen de sus funciones con respecto a sus ángulos respectivos:

$$R_d = \left(\frac{dF_L}{d\alpha} \right)_{\beta=0} \quad R_c = \left(\frac{dF_C}{d\beta} \right)_{\alpha=0}$$

R_d = Rigidez o coeficiente de rigidez a la deriva.

R_c = Rigidez o coeficiente de rigidez a la caída.

F_d = Fuerza lateral de deriva.

F_c = Fuerza lateral de deriva.

α = Ángulo de deriva.

β = Ángulo de caída.

Luego la fuerza total F_L engendrada por el neumático puede expresarse en primera aproximación (ausencia fuerzas de tracción) y para ángulos de deriva pequeños:

$$F_L = F_d + F_c = R_d \times \alpha + R_c \times \beta$$

2.4.1.2 Fuerzas de estructura propia.

- **Naturaleza**

Además de las fuerzas laterales que el neumático engendra como reacción a las deformaciones que sufre por las sollicitaciones exteriores, también origina otras fuerzas laterales y radiales debidas a que uniformidad no es total.

Estas fuerzas, que no existirían en el caso ideal de que el neumático fuese perfectamente homogéneo y simétrico respecto a su plano ecuatorial y eje de rotación, no pueden anularse totalmente en la fabricación normal de serie del neumático comercial.

- **Fuerzas laterales**

Las fuerzas laterales, o su variación, se ponen de manifiesto y se pueden medir, con exclusión de otras de procedencia exterior, cuando el neumático rueda verticalmente sobre un plano horizontal con ángulo de deriva cero.

Esta fuerza depende de la constitución de las capas que forman el neumático, e decir, del tipo de tejido, número, ancho y posición relativa de ellas y ángulo de sus cables. El sentido de esta fuerza viene dado por el de la orientación de los cables de la capa más próxima a la banda de rodamiento.