

TEMA 63

EL VEHÍCULO I. MOVIMIENTO DE LOS VEHÍCULOS. RESISTENCIA AL AVANCE. TRAYECTORIA DE LOS VEHÍCULOS EN RECTA Y CURVA. INTERACCIÓN RUEDA-PAVIMENTO. INFLUENCIA DEL TIPO DE SUPERFICIE Y DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL NEUMÁTICO. MEDIDA DE COEFICIENTES DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO.

- 1 EL MOVIMIENTO DE LOS VEHÍCULOS
- 2 RESISTENCIA AL AVANCE
 - 2.1 RESISTENCIA A LA RODADURA
 - 2.2 RESISTENCIA AERODINÁMICA
 - 2.3 RESISTENCIA DE PENDIENTE
- 3 MARCHA DE LOS VEHÍCULOS EN RECTA
 - 3.1 ESFUERZOS VERTICALES
 - 3.2 DINÁMICA LONGITUDINAL
 - 3.3 DINÁMICA DE FRENADO
 - 3.3.1 SITUACIONES DE BLOQUEO EN RECTA
- 4 TRAYECTORIA DE LOS VEHÍCULOS EN LAS CURVAS
 - 4.1 DISEÑO DE LA TRAZA DE UNA CARRETERA
 - 4.1.1 SOBREALCHO DE UNA CURVA
 - 4.2 CONTROL DEL EQUILIBRIO EN CURVA DE UN VEHÍCULO
 - 4.2.1 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE ESTABILIDAD
- 5 INTERACCIÓN ENTRE RUEDA Y PAVIMENTO EN RECTAS
 - 5.1 RESISTENCIA A LA RODADURA
 - 5.1.1 DESARROLLO DEL CONCEPTO
 - 5.1.2 RODADURA CON Y SIN DESLIZAMIENTO
 - 5.2 ESFUERZO DE FRENADO
 - 5.2.1 DISTANCIA MÍNIMA DE FRENADO
 - 5.2.2 REPARTO DE CARGAS ENTRE EJES
- 6 INTERACCIÓN ENTRE RUEDAS Y PAVIMENTO EN CURVAS
 - 6.1 CURVA SIN PERALTE
 - 6.2 CURVA CON PERALTE
 - 6.3 ESTABILIDAD DE UN VEHÍCULO
- 7 INFLUENCIA DEL TIPO DE SUPERFICIE Y DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL NEUMÁTICO.
- 8 RODADURA SIMPLE: RODADURA Y DESPLAZAMIENTO
- 9 MEDIDA DE COEFICIENTES DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO
- 10 EVOLUCIÓN DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO AL DESLIZAMIENTO
- 11 VALORES MÍNIMOS DE LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO

1 EL MOVIMIENTO DE LOS VEHÍCULOS

Según las leyes de la Mecánica Clásica, cualquier cuerpo que deba moverse de forma continua y uniforme deberá recibir una fuerza impulsora que iguale y anule las fuerzas que se opongan al movimiento.

De tal forma que solo en una situación ideal sin fuerzas de oposición, un cuerpo podría moverse a velocidad constante sin necesidad de un esfuerzo o aporte energético exterior.

Según estas mismas leyes físicas para que un cuerpo experimente una variación de su velocidad, lo que se denomina aceleración, dicho cuerpo debe sufrir una fuerza neta que aumentará su cantidad de movimiento si esta es positiva; si la fuerza es negativa, es decir, opuesta al movimiento, la cantidad de movimiento del cuerpo disminuirá pues estará sometido a una deceleración, como es el caso de una frenada de un vehículo.

En el caso concreto de un vehículo de motor, éste ha de vencer unas fuerzas que se oponen a su avance y que detallaremos más adelante gracias a la potencia del motor, sea de explosión, diesel o tal vez en un futuro próximo, eléctrico.

Estos elementos del vehículo que intervienen de modo secundario, pero no por ello poco relevante, son la suspensión y la dirección.

Obviamente, la dirección interviene cuando el vehículo ha de trazar las curvas; y si bien la suspensión tiene un papel primordialmente de búsqueda de comodidad para el conductor y los pasajeros cuando el vehículo se desplaza en línea recta, su papel en el equilibrio dinámico del vehículo es muy grande en el trazado de curvas.

2 RESISTENCIA AL AVANCE

De cara a aprovechar mejor el carburante que consume el motor y obtener un transporte más eficiente, es necesario saber cómo se desplazan los vehículos por las vías. En este sentido, tiene importancia conocer las resistencias que intervienen en el movimiento de los vehículos.

Dichas resistencias son:

- Resistencia a la rodadura
- Resistencia aerodinámica
- Resistencia de pendiente

2.1 RESISTENCIA A LA RODADURA

La resistencia a la rodadura se produce por el desplazamiento del vehículo. Se opone a la fuerza de empuje y su valor depende de la masa del vehículo, de la geometría de dirección, del tipo, perfil y presión de inflado de los neumáticos, de la velocidad de marcha, estado de la carretera y de la superficie de la misma.

Se calcula multiplicando el peso que recae sobre cada rueda por el coeficiente de resistencia a la rodadura que es un valor que depende del material y de los factores ambientales.

La resistencia será mayor cuanto mayor sea el trabajo de flexión de los neumáticos, el rozamiento del aire en la rueda y la fricción en el rodamiento de rueda.

2.2 RESISTENCIA AERODINÁMICA

El aire se opone a que el vehículo pase a través suyo en función de su forma exterior. La fuerza de la resistencia del aire depende del tamaño y forma del vehículo, de la velocidad de marcha, de la densidad del aire y de la dirección y fuerza del viento. El coeficiente de resistencia aerodinámica C_x se determina en los ensayos realizados a escala en los túneles de viento.

$$F_L = \frac{1}{2} * C_x * A * \rho * v^2$$

Siendo:

- C_x : coeficiente de resistencia aerodinámica
- A: superficie frontal del vehículo
- ρ : densidad del aire.
- V: velocidad del vehículo

Al aumentar la velocidad de marcha aumenta la resistencia aerodinámica a la segunda potencia. Por ello, la relación velocidad – consumo no es lineal sino que dicho consumo se dispara a altas velocidades.

En el diseño y construcción tiene especial importancia el coeficiente aerodinámico, que permitirá un menor esfuerzo del motor y mejorara la estabilidad. Por tanto, a menor coeficiente, menor resistencia al avance y menor esfuerzo demandado al motor, mayor estabilidad y mayor ahorro de carburante.

El coeficiente aerodinámico indica lo aerodinámica que es la forma de la carrocería. Mediante del coeficiente y la superficie de la parte delantera del vehículo es posible calcular la cantidad de energía necesaria para vencer la resistencia del aire en el sentido de avance a cualquier velocidad.

Los factores que modifican este coeficiente son:

- La forma exterior de la estructura tanto en la parte delantera y trasera, como en la superior e inferior.
- La pendiente del parabrisas.
- Tamaño y forma de los retrovisores exteriores.
- La existencia de alerones, deflectores, etc. Que, si existen, conforman la forma exterior del vehículo.

La fuerza que el aire ejerce sobre el vehículo actúa en tres direcciones:

- Resistencia al avance, en sentido longitudinal al vehículo.
- Resistencia de sustentación, en sentido vertical.
- Resistencia de deriva, en sentido transversal y puede variar la trayectoria que marca el conductor.

En el caso de vehículos con caja de carga abierta puede producirse un incremento en el consumo de carburante de hasta 30% en comparación con vehículos con la caja de carga cerrada, debido al peor coeficiente –la mayor potencia de resistencia aerodinámica debe compensarse con un mayor potencia del motor-.

2.3 RESISTENCIA DE PENDIENTE

La resistencia de una pendiente depende del perfil de la calzada y de la masa del vehículo. El vehículo precisa disponer de una mayor fuerza de propulsión para vencer la resistencia ofrecida por la pendiente. Es necesario contar por lo tanto con una mayor potencia de motor para evitar un descenso de la velocidad y compensar la potencia de pendiente. Esta resistencia puede minimizarse si:

- Se engrana oportunamente la relación de transmisión adecuada antes de comenzar la subida.
- Cambiar lo menos posible durante la subida.
- Circular con brío en el motor dentro de los límites fijados.

La fuerza de resistencia de pendiente se calcula:

$$F_s = m \cdot g \cdot \sin \alpha$$

La fuerza de resistencia de pendiente puede expresarse así mismo en grados o en % de desnivel. Es decir, un desnivel del 6% significa que en un tramo de 100 metros se incrementa la altura en 6 metros.

Ahora bien, es un error extendido en algunos documentos y libros (incluso patrocinado por el Organismo) igualar el valor de $\sin \alpha$ con la pendiente de la calzada cuando ello es una mera aproximación.

La pendiente de una carretera es el valor de la tangente del ángulo que forma con la horizontal.

Obviamente, en casos de pendiente negativa (cuesta abajo) esta fuerza de pendiente o gravitatoria cambia de signo y deja de ser una fuerza de oposición al movimiento del vehículo para convertirse en un apoyo al esfuerzo motor del móvil.

3 MARCHA DE LOS VEHÍCULOS EN RECTA

El estudio de la marcha de un vehículo en línea recta, o más técnicamente, la dinámica longitudinal del vehículo, comprende el estudio del comportamiento de automóvil cuando circula en recta o en curvas de amplísimo radio. En tales circunstancias se desprecian tanto la aceleración lateral como el resto de esfuerzos que crean sobre el vehículo fuerzas asimétricas.

Para ello se aplican las ecuaciones fundamentales de la mecánica al eje longitudinal del vehículo -también al eje vertical del mismo- definiendo los esfuerzos resistentes que actúan sobre el desplazamiento y estableciendo los esfuerzos tractores que son necesarios para vencer dichas resistencias. Una vez se determinan los esfuerzos tractores máximos que motor y caja de cambios son capaces de alcanzar, es necesario determinar las limitaciones o resistencias a vencer. Conocidas las resistencias se determinan las prestaciones efectivas del vehículo.

3.1 ESFUERZOS VERTICALES

La componente vertical del peso de vehículo se contrarresta con la fuerza de reacción del suelo sobre los neumáticos. Con el vehículo en marcha aparece también una fuerza aerodinámica vertical hacia arriba, que también es función cuadrática de la velocidad. Esta fuerza ascensional hace que disminuya el peso aparente del vehículo y si bien no es relevante a velocidades legales, a alta velocidad, disminuye la fuerza normal ejercida por el suelo y, en consecuencia, la capacidad de tracción por adherencia, lo cual como veremos más adelante, puede llegar a ser crítico en el paso por curva.

3.2 DINÁMICA LONGITUDINAL

Al aplicar las ecuaciones de fuerzas sobre el vehículo en sentido longitudinal, tenemos en primer lugar las fuerzas resistivas indicadas anteriormente en el punto 4 (resistencia gravitatoria o de pendiente, resistencia de rodadura y resistencia aerodinámica).

En oposición a estas fuerzas resistivas, está el esfuerzo tractor proporcionado por el motor. Véase figura en anexo gráfico.

Si el esfuerzo tractor supera a las fuerzas resistivas habrá una fuerza neta \vec{F} hacia delante que impulsará al vehículo con un movimiento uniformemente acelerado

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Cuando el esfuerzo tractor sea igual a las fuerzas resistivas, la fuerza neta \vec{F} será igual a cero, por tanto la aceleración también será nula y el vehículo se moverá con velocidad constante. Si el esfuerzo motor no es capaz de igualar a las fuerzas resistivas, el vehículo sufrirá una deceleración e irá perdiendo velocidad.

3.3 DINÁMICA DE FRENADO

El frenado es el proceso por el que se permite reducir la velocidad del vehículo en marcha llegando si fuera preciso o voluntad del conductor a detenerlo. En el proceso se hace necesario vencer tanto las resistencias de las masas rotativas de las ruedas como la propia desaceleración. Representa uno de los sistemas fundamentales del automóvil, tanto en lo referente a la seguridad como en materia de estabilidad, requiriendo un correcto reparto de la fuerza de frenado.

En el modelo de frenado se acepta como hipótesis que el vehículo es un sólido rígido en movimiento rectilíneo uniforme. Dicho modelo se muestra en el anexo gráfico. Como se puede apreciar en él aparecen las fuerzas de frenado por eje, F_{fd} y F_{ft} , así como la resistencia a la rodadura al representar centrada las fuerzas sobre los neumáticos.

3.3.1 SITUACIONES DE BLOQUEO EN RECTA

El proceso de frenado se encuentra al igual que la máxima tracción limitado por la adherencia calzada-neumático debiendo evitarse en todo caso el bloqueo de las ruedas que suponen que las mismas sin girar se desplacen longitudinalmente a velocidad no nula, con lo que de un lado se disminuye la fuerza de frenado que actúa y por otro se deterioran sensiblemente los neumáticos produciéndose lo que se conoce como planos en los mismos debido a la fricción plana con la calzada induciendo un desgaste claramente irregular y por tanto un comportamiento dinámico inestable.

Si se bloquea el eje trasero aparece un momento de guiñada sobre el vehículo creciente que genera una importante inestabilidad direccional.

En el caso en que se bloquee el eje delantero el momento de guiñada al contrario que en el caso anterior disminuye a partir de cierto valor con la perturbación lateral, con lo que el sistema no es inestable. De ambas situaciones se desprende que aunque los dos bloqueos lógicamente deben ser evitados, la ha de ser en especial el trasero en cuanto que provoca inestabilidad.

4 TRAYECTORIA DE LOS VEHÍCULOS EN LAS CURVAS

4.1 DISEÑO DE LA TRAZA DE UNA CARRETERA

Para cambiar la trayectoria de un vehículo, el conductor acciona el volante, haciendo variar el ángulo que forman las ruedas delanteras con la dirección del eje del vehículo.

Definimos radio de giro mínimo de un vehículo, el radio de la circunferencia descrita por su rueda delantera exterior al girar a pequeña velocidad cuando su dirección ha sido girada totalmente. Este valor es fundamental para el diseño de accesos, intersecciones, estacionamientos, y todo tipo de maniobras a velocidad reducida, pues nos da el espacio que necesita un vehículo para cambiar el sentido de marcha.

La trayectoria del vehículo puede estudiarse teniendo en cuenta que el centro del eje delantero D sigue una trayectoria cuya normal tiene la dirección de dicho eje. El centro del eje trasero T se desplazará siguiendo una trayectoria cuya tangente coincidirá con el eje longitudinal del vehículo, ya que el eje posterior sigue siendo perpendicular a dicho eje longitudinal. El centro instantáneo de rotación del punto T es la combinación de dos rotaciones, una alrededor del centro de curvatura de la trayectoria de D y otra alrededor de D debida al giro de la dirección.

Se puede demostrar que cuando un vehículo toma una curva a velocidad constante el radio de curvatura de la trayectoria del vehículo es inversamente proporcional a la longitud de la curva recorrida.

Esta es precisamente la definición de la clotoide, por ello, las curvas de transición en una carretera desde el tramo recto hasta el tramo de circunferencia es una clotoide (ver anexo gráfico).

4.1.1 SOBREALCHO DE UNA CURVA

Adicionalmente, y pensando en los vehículos pesados y articulados, la curva de una calzada se diseña con un sobrealcho tal como se muestra en el anexo gráfico.

El sobrealcho o anchura adicional con que se dota a una curva para facilitar el giro de los vehículos se obtiene aplicando la siguiente expresión:

$$S = \frac{I^2}{2 \cdot R}$$

donde S es el sobreancho de cada carril
 l es la longitud de los vehículos
 R es el radio de la curva

El sobreancho o anchura adicional con que se dota a una curva también se ve afectado por el radio de giro; entra entonces en acción valor del radio de giro estándar, muy útil para determinar la zona más externa del vehículo que se halla en contacto con el firme. Los valores mínimos del radio de giro suelen oscilar alrededor de 5 metros para vehículos ligeros y de 9 metros para pesados.

4.2 CONTROL DEL EQUILIBRIO EN CURVA DE UN VEHÍCULO

Hasta no hace muchos años resultaba frecuente que los coches derrapasen en una curva o que se bloqueasen sus ruedas al frenar, cuando se producían estas situaciones el conductor no tenía más remedio que confiar en su habilidad al volante para evitar el peligro. Hoy en día el conductor cuenta con la existencia de una serie de modernos dispositivos electrónicos que le ayudan a mantener el control de su vehículo en estas situaciones.

El avance tecnológico permite la introducción de nuevos sistemas de seguridad activa en el vehículo. Destacan entre estos los de control de estabilidad, cuya difusión está aumentando, ya que presentan una mejora potencial en el control de guiado del vehículo. El Sistema de Control de Estabilidad, es conocido por una gran variedad de siglas, según el fabricante de automóviles incorpore a sus modelos, aunque quizá la denominación más extendida sea la de ESP –Electronic Stability Program–.

Los sistemas de seguridad activa, como el control de estabilidad, están pensados para tratar de evitar que se produzcan los accidentes, mejorando las prestaciones de los vehículos, pero no hay que olvidar que estos sistemas no permiten superar las limitaciones impuestas por las leyes de la física, ni tampoco corrigen las limitaciones o los errores del conductor.

En concreto, el sistema de control de estabilidad ayuda al conductor en situaciones críticas en la conducción y en carreteras difíciles. Este sistema tiene diferentes nombres según el fabricante del sistema o del constructor que lo implanta en su vehículo, lo cual puede crear cierta confusión, sin embargo el propósito de todos ellos es similar, así como sus principios de funcionamiento. Como la denominación de este sistema más extendida es la de ESP, a partir de ahora nos vamos a referir a este sistema mediante estas siglas.

Las causas de esta pérdida de control son varias, entre ellas se encuentra la conducción a elevadas velocidades, el desconocimiento del estado de la carretera o un viraje repentino, por ejemplo ante un obstáculo.

El ESP puede evitar eficazmente los accidentes graves ya que estabiliza el vehículo en situaciones críticas. Los estudios de importantes fabricantes de vehículos demuestran que el ESP reduce el número de accidentes graves hasta en un 50%. El objetivo es que mediante la implantación de este sistema en los vehículos, se reduzca el número de accidentes por pérdida de control.

4.2.1 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE ESTABILIDAD

Este sistema evita el deslizamiento del vehículo en sentido transversal, lo que permite conservar la trayectoria del vehículo en curva, previniendo el inicio de derrapajes y tratando de subsanar los errores de pérdida de trayectoria que pueden ser difíciles de controlar, para la mayoría de los conductores, en situaciones difíciles.

El ESP engloba las capacidades del ASR (Sistema de Control de Tracción) del ABS (Antibloqueo del Sistema de Frenos), del EBD (Distribución Electrónica de la Fuerza de Frenado) y del AYC (Control del Giro entorno al Eje Vertical).

El sistema de control de estabilidad actúa cuando la trayectoria del automóvil no se corresponde con el ángulo de giro del volante. Cuando el automóvil realiza un viraje, debido a la fuerza centrífuga, puede suceder que en una o varias ruedas disminuya la adherencia lateral de contacto neumático-asfalto, produciendo un movimiento de derrape, entonces entra en funcionamiento el sistema de control de estabilidad.

Cuando se produce un subviraje y el coche tiende a seguir recto en una curva, el sistema de control de estabilidad compara el ángulo de giro del volante con el ángulo de giro real del vehículo, si no concuerdan actúa sobre el freno de la rueda trasera interior, lo que corrige la desviación de la trayectoria del automóvil con el efecto de que el coche se gira de delante hacia el interior de la curva.

Cuando se produce un sobreviraje o tendencia del vehículo a girar más de lo indicado por el volante, el coche se va de atrás en la curva y tiende a cerrar la trayectoria, el sistema de control de estabilidad actúa frenando la rueda delantera exterior, corrigiendo la desviación del vehículo.

5 INTERACCIÓN ENTRE RUEDA Y PAVIMENTO EN RECTAS

Como ya hemos visto anteriormente, las distintas fuerzas que actúan sobre un vehículo y que definen su movimiento son ejercidas fundamentalmente sobre el punto de contacto rueda pavimento. Así, la transmisión del esfuerzo tractor y del esfuerzo de frenada al suelo es posible a su vez debido a la existencia de la fuerza de rodadura que es una fuerza de contacto.

5.1 RESISTENCIA A LA RODADURA

La resistencia a la rodadura se presenta cuando un cuerpo rueda sobre una superficie, deformándose uno de ellos o ambos. Como veremos, no tiene sentido alguno hablar de resistencia a la rodadura en el caso de un sólido rígido (indeformable) que rueda sobre una superficie rígida (indeformable).

El concepto de coeficiente de rodadura es similar al de coeficiente de rozamiento, con la diferencia de que este último hace alusión a dos superficies que deslizan o resbalan una sobre otra, mientras que en el coeficiente de rodadura no existe tal resbalamiento entre la rueda y la superficie sobre la que rueda, disminuyendo por regla general la resistencia al movimiento.

Por un lado, a escala microscópica una rueda no presenta un alzado exactamente circular, y la superficie sobre la que rueda no constituye tampoco un perfil plano, puesto que en ambos casos existen irregularidades. No obstante, este no es el principal factor que influye en el coeficiente, sino la histéresis. La rueda, en función del material con el que esté construida y su propio peso, además del de la carga que soporta, sufre una deformación que al rotar provoca repetidos ciclos de deformación y recuperación, estos ciclos propician la disipación de energía por calor. Además, esta deformación supone que no apoye una línea únicamente sobre el piso, sino una superficie.

El fin del coeficiente de rodadura es establecer un parámetro empírico, sobre el conjunto completo, que proporcione la fuerza que se ha de ejercer bien para poner en movimiento el sistema (coeficiente de rodadura estático), o bien para mantener su velocidad (coeficiente de rodadura dinámico). Este último también depende de la velocidad.

5.1.1 DESARROLLO DEL CONCEPTO

En efecto, la resistencia a la rodadura aparece cuando el cuerpo que rueda, o la superficie sobre la que rueda, o ambos a la vez, se deforma, aunque sólo sea

ligeramente, a causa de las grandes presiones existentes en los puntos de contacto. Pensemos en el caso de un cilindro que se apoya sobre una superficie plana; todo el peso del cilindro gravita sobre una exigua superficie de contacto (una generatriz, desde un punto de vista estrictamente geométrico). Es fácil comprender que la presión en el contacto será tan grande que hasta el material más rígido se deformará. De ese modo, el cuerpo, la superficie que lo soporta o ambos, se deforman, aumentando el área de contacto hasta que la presión disminuye y se restablece una situación de equilibrio elastostático. En resumen, al rodar un cuerpo real sobre una superficie real se producen unas deformaciones, como se muestra en el anexo gráfico, de modo que el cuerpo tiene que “vencer” continuamente un pequeño obstáculo que se le presenta por delante y que se opone a su rodadura.

- Cuerpos rígidos (ideales)

Consideremos, para comenzar, el caso ideal de un cuerpo indeformable (un cilindro o una rueda, por ejemplo) que puede rodar sobre una superficie plana también indeformable. Si la superficie es horizontal, las fuerzas que actúan sobre el cilindro son su peso P y la reacción normal del plano N . Si ahora aplicamos una fuerza F sobre el eje del cilindro, paralelamente al plano y perpendicularmente al eje, aparecerá una fuerza de rozamiento, f en A, en dirección opuesta a la fuerza aplicada F . El momento de la fuerza de rozamiento respecto del eje del cilindro, $M = fR$ hace girar el cilindro alrededor de su eje. Así, en el caso de cuerpos indeformables soportados por superficies indeformables, por pequeña que sea la fuerza F se producirá la rodadura (siempre que exista suficiente rozamiento estático para evitar el deslizamiento). En estas condiciones no tienen sentido hablar de resistencia a la rodadura.

- Cuerpos deformables (reales)

En las situaciones reales, los cuerpos se deforman, por poco que sea. El contacto no se realiza entonces a lo largo de una generatriz (como en el ejemplo anterior) sino a lo largo de una estrecha banda $A'A''$, como se muestra en el gráfico anexo. Ello da lugar a que aparezcan reacciones en los apoyos; reacciones que dan lugar a la aparición de un par que se opone a la rodadura. Con la finalidad de simplificar el problema, podemos imaginar que en cada instante el cilindro debe rotar sobre la generatriz que pasa por A'' para poder rodar superando el pequeño obstáculo que se opone a ello. Eso equivale a considerar desplazada la línea de acción de la reacción normal N una distancia que designaremos por μ_r , como se muestra en la figura. El par de resistencia a la rodadura y el par aplicado valen, respectivamente.

$$M_{\text{res}} = \mu_r N \quad (1)$$

$$M_{\text{apl}} = RF \quad (2)$$

En las condiciones críticas, cuando comienza la rodadura, el par aplicado o de arranque será mayor que el par resistencia, de modo que arranque

$$M_{\text{arranque}} \geq M_{\text{res}} \quad \Rightarrow \quad RF \geq \mu_r N \quad (3)$$

de modo que el cilindro comenzará a rodar si

$$F \geq \frac{\mu_r N}{R} = C_{rr} N \quad (4)$$

que nos da el valor de la fuerza mínima necesaria para el arranque.

▪ Coeficientes

La magnitud μ_r , que tiene dimensiones de una longitud, es el llamado coeficiente de resistencia a la rodadura. De las expresiones anteriores se deduce que el par de arranque es proporcional a la reacción normal N y que la fuerza de tracción necesaria para el arranque es inversamente proporcional al radio del cilindro; esa es la ventaja de las ruedas grandes sobre las pequeñas. El valor del coeficiente μ_r depende de la naturaleza de los cuerpos en contacto (fundamentalmente de su rigidez).

La magnitud adimensional

$$C_{rr} = \frac{\mu_r}{R} \quad (5)$$

es el llamado coeficiente de rodadura.

En general, el coeficiente de rodadura tiene un valor muy inferior al de los coeficientes de rozamiento por deslizamiento (estático y cinético); así pues, es mucho más conveniente, al efecto de disminuir las pérdidas energéticas, sustituir en los mecanismos y máquinas los deslizamientos por las rodaduras; esa es la ventaja que aportó el invento de la rueda, la ventaja del carro sobre el trineo.

La dependencia del coeficiente de rodadura es característico de cada sistema, dependiendo de rozamiento, hace que no sea siempre operativo calcular el coeficiente de rodadura a través del ángulo de rozamiento.

El valor del coeficiente de rodadura es característico de cada sistema, dependiente de:

- la rigidez o dureza de la rueda y superficie,
- el radio de la rueda (a mayor radio menor resistencia),
- el peso o carga al que se somete cada rueda (en esto se diferencia del coeficiente de rozamiento),
- en el caso de ruedas neumáticas o hidráulicas, de su presión (a mayor presión menor resistencia),
- temperatura, el acabado de las superficies en contacto, velocidad relativa, etc.

5.1.2 RODADURA CON Y SIN DESLIZAMIENTO

La ecuación (4) da la respuesta al problema de qué fuerza horizontal es la mínima necesaria para que dicha fuerza horizontal pueda empezar a mover una rueda o cilindro. Otro problema relacionado con ese es si un determinado par aplicado por un eje motor sobre una rueda permitiría desplazar una cierta carga o si por el contrario la rueda patinaría ocasionando una situación de deslizamiento sin rodadura (tal como sucede por ejemplo cuando un automóvil trata de arrancar sobre hielo o sobre un suelo en el que existe un fluido lubricante). La condición necesaria para que haya rodadura sin deslizamiento es que:

$$\frac{\mu r}{R} \leq \mu$$

Donde:

μr , es el coeficiente de resistencia a la rodadura

μ el coeficiente de rozamiento para deslizamiento.

5.2 ESFUERZO DE FRENADO

De forma idéntica a como se transmite el esfuerzo tractor del motor al suelo, en el caso de la detención del vehículo, el esfuerzo de frenado ha de ser transmitido al suelo.

5.2.1 DISTANCIA MÍNIMA DE FRENADO

Partiendo de la consideración energética de que el trabajo de la fuerza de frenado ha de ser igual a la energía cinética del móvil:

$$m \cdot g \cdot \mu \cdot d = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

De aquí resulta que $d = \frac{v^2}{2 \cdot g \cdot \mu}$

siendo:

d = distancia mínima de frenado

v = velocidad de vehículo

g = aceleración de la gravedad

μ = coeficiente de rozamiento estático

En la práctica una frenada normal suele generar una deceleración entre 0,1 g y 0,2 g. Una frenada brusca llegaría hasta 0,4 g.

5.2.2 REPARTO DE CARGAS ENTRE EJES

En una situación de movimiento uniforme, el reparto de pesos entre los ejes del vehículo depende únicamente de la posición del centro de gravedad del vehículo.

Sin embargo en una frenada, se puede demostrar planteando las ecuaciones de equilibrio de momentos del sólido rígido respecto al centro de gravedad que el eje delantero resulta sobrecargado durante el frenado y descargado el trasero. Es por ello que los frenos del eje delantero siempre son de mayores dimensiones, en un turismo, que los traseros, pues aquellos están en disposición de ejercer en mayor esfuerzo de frenada sobre el pavimento.

6 INTERACCION ENTRE RUEDAS Y PAVIMENTO EN CURVAS

Al trazar una curva un vehículo, aparece una fuerza centrífuga que tiende a desplazarlo hacia el exterior de la curva. Para contrarrestar esta fuerza, aparece una nueva fuerza de rozamiento entre pavimento y neumático proporcional a un coeficiente de rozamiento estático semejante al ya visto en el caso de una frenada. En esta ocasión, la fuerza de rozamiento es perpendicular a la trayectoria del vehículo.

6.1 CURVA SIN PERALTE

Un automóvil describe una trayectoria circular de radio R con velocidad constante V . Las fuerzas que actúan son:

- el peso
- la reacción de la carretera
- la fuerza de rozamiento

Como hay equilibrio en sentido vertical, la reacción de la calzada es igual al peso del vehículo.

Aplicamos la segunda ley de Newton en la dirección radial se puede deducir que la velocidad máxima que puede alcanzar el vehículo es $V = \sqrt{\mu g R}$

siendo μ el coeficiente de rozamiento y g la aceleración de la gravedad.

6.2 CURVA CON PERALTE

Para facilitar el paso por curva con mayor agarre y por tanto mayor seguridad, las curvas pueden hacerse con un peralte α .

Las fuerzas que actúan sobre el vehículo son las mismas que en el caso de curva sin peralte, pero con distinta orientación, salvo el peso que siempre es vertical.

Aplicando de nuevo la segunda ley de Newton se llega a la ecuación siguiente para el valor de la velocidad máxima de paso por curva.

$$V = \sqrt{R \cdot g \frac{\operatorname{sen} \alpha + \mu \cos \alpha}{\cos \alpha - \mu \operatorname{sen} \alpha}}$$

6.3 ESTABILIDAD DE UN VEHÍCULO

En los apartados anteriores hemos visto que la presencia de un peralte en la vía aumenta la velocidad máxima de paso por curva antes de producirse el deslizamiento del neumático sobre el pavimento.

Pero un peligro adicional al derrapaje de un vehículo es el peligro de vuelco por exceso de velocidad en curva.

El vuelco de un vehículo depende no sólo de las fuerzas ejercidas sobre el móvil sino además de un factor geométrico como es la posición del centro de gravedad del vehículo.

Desde un punto de vista físico, el vuelco de un vehículo es el giro del mismo entorno al punto de apoyo de las ruedas exteriores. Esto se llega a producir porque aunque haya un equilibrio de fuerzas en todos los ejes inerciales se produce un desequilibrio de momentos entorno al punto de apoyo que son las ruedas exteriores.

Planteando el equilibrio de momentos se obtiene la siguiente ecuación

$$N_1 = \frac{m \cdot g \cdot x_c - m \frac{v^2}{R} \cdot Y_c}{a}$$

$$N_1 = m \frac{g \cdot x_c - \frac{v^2}{R} \cdot Y_c}{a}$$

siendo N_1 = esfuerzo vertical o peso que descansa sobre las ruedas interiores

x_c = coordenada en el eje X del centro de gravedad

Y_c = coordenada en el eje Y del centro de gravedad

a = anchura del vehículo

v = velocidad

R = radio de la curva

m = masa del vehículo

La condición de vuelco se cumplirá cuando $N_1 \leq 0$.

Los vehículos de transporte de mercancías tienen un centro de gravedad muy elevado por lo que son más propensos al vuelco que los turismos. Más aun cuando la carga no está correctamente estibada y asegurada y por efecto de la fuerza centrífuga se desplaza hacia el exterior de la curva, modificando la posición del centro de gravedad hacia una situación aun más inestable.

7 INFLUENCIA DEL TIPO DE SUPERFICIE Y DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL NEUMÁTICO.

Las necesidades de adherencia y de capacidad de evacuación de agua en los huecos que quedan entre neumático y pavimento se pueden asegurar construyendo firmes que tengan las condiciones de microtextura y macrotextura adecuadas. La microtextura influye en la fricción, y la macrotextura en la capacidad de evacuar agua con rapidez (lo que impide la aparición del peligroso fenómeno del aquaplaning)

En superficies secas y limpias, la resistencia al deslizamiento es siempre suficiente. Para cuando la superficie está mojada, dicha resistencia depende de las características del pavimento y del neumático. Para conseguir una resistencia adecuada, es preciso desplazar el agua en la zona de contacto y asegurar la adherencia entre el pavimento y la cubierta. Al aumentar la velocidad es más difícil conseguir el desplazamiento del agua, por lo que la resistencia al deslizamiento disminuye, generalmente al aumentar la velocidad, mientras que superficies rugosas y ásperas tienen una resistencia relativamente alta que se mantiene a altas velocidades.

En el caso de carreteras cubiertas por nieve, hielo u otras sustancias (barro, aceite...) las características de la superficie tienen muy poca influencia en la resistencia al deslizamiento, que suele ser muy pequeña.

La característica más importante del neumático es la disposición y profundidad de los dibujos de la cubierta. Cuando la rueda se mueve sobre una superficie mojada, estos dibujos forman canales que permiten la salida del agua, facilitando su desplazamiento. Cuando el neumático se desgasta y la profundidad de estos dibujos es menor que 1 mm. Su influencia llega a ser inapreciable.

Como es lógico, el efecto de los dibujos del neumático dependerá del tipo de superficie por la que se mueva. En superficies muy rugosas, en las que existen numerosos canales para la salida de agua, se obtendrá prácticamente la misma resistencia al deslizamiento con neumáticos lisos que con dibujos. Al favorecer el desplazamiento del agua, permitirán mantener una cierta resistencia al deslizamiento a alta velocidad, mientras que con neumáticos lisos se producirá una marcada disminución de los coeficientes al aumentar la velocidad.

La influencia de los dibujos es también notable en el caso de carreteras con hielo, nieve o barro. En estos casos, el neumático con dibujos puede proporcionar un coeficiente de resistencia muy superior al del neumático liso, aunque de todas formas será pequeño. En países de clima frío se utilizan cubiertas de invierno de perfil pronunciado, y en algunos casos se permite, incluso, el empleo de neumáticos con clavos para un mejor agarre sobre superficies heladas.

En general, se puede decir que el neumático tiene un efecto secundario sobre la resistencia al deslizamiento, mientras el pavimento tenga unas características adecuadas. Solo en el caso de pavimentos deslizantes el neumático tiene una influencia mayor, permitiendo mejorar la pequeña resistencia al deslizamiento disponible en estas condiciones.

Importancia del dibujo de los neumáticos y la presión de inflado en las condiciones de adherencia

Como norma general, el desgaste máximo admisible que puede tener el dibujo de los Neumáticos es de 1,6 mm. Es muy recomendable que cada vez que se inflen los neumáticos se verifiquen los TWI (Tread Wear Indicators) que son unas pequeñas protuberancias ubicadas en los flancos del neumático y actúan como testigos del desgaste.

En caso de lluvia, es recomendable (sobre todo si es muy intensa) circular al menos con una profundidad de 3 mm.

Las consecuencias de circular con una profundidad de dibujo inadecuada son la pérdida de eficacia del neumático, la pérdida de estabilidad, el aumento de la distancia de frenado, y un mayor peligro de aquaplaning.

En cuanto a la presión de los neumáticos, ha de ser la que se recomienda en el manual del mantenimiento del vehículo, y siempre ha de ser comprobada en frío.

Circular con presión inferior a la recomendada, además de impactar negativamente en la adherencia, da lugar a un mayor desgaste del neumático y con ello un mayor riesgo de pinchazos. Otro efecto negativo aparejado es el endurecimiento de la dirección y el aumento de la distancia de frenado.

8 RODADURA SIMPLE: RODADURA Y DESPLAZAMIENTO

Cuando un vehículo se mueve en línea recta sobre terreno llano, existe un equilibrio vertical de fuerzas conforme las leyes de Newton en el que el peso del vehículo viene a ser compensado por tantas reacciones verticales como ruedas tenga el vehículo. Si bien en un modelo teórico perfecto estas reacciones pasarían por el centro de las ruedas, en la realidad la deformación del neumático y del pavimento hace que dichas reacciones estén desplazadas en el sentido de la marcha, lo que origina una resistencia a la rodadura que ha de ser compensada aplicando un par motor.

Es por lo anterior que para que un vehículo se mantenga a velocidad constante, es preciso que se aplique un par motor que compense la resistencia a la rodadura.

Si desde una situación de marcha a velocidad constante se pretende acelerar el vehículo, se presionará el acelerador y en tanto la fuerza motriz superará la resistencia a la rodadura, se logrará una aceleración. Tengamos en cuenta que al acelerar, la fuerza de rozamiento va en el sentido de la marcha, mientras que al frenar (caso siguiente) va en sentido contrario a la marcha.

Si lo que se pretende por el contrario es reducir la velocidad, la acción de los frenos sobre las ruedas hará disminuir la velocidad de rotación de las mismas. Si cuando vamos a velocidad constante, la velocidad de giro y la de avance del vehículo se ligan por la expresión $V = \omega R$ (relación elemental teniendo en cuenta que la longitud de una circunferencia es $2\pi R$), donde V es la velocidad de avance del vehículo, ω la velocidad de giro de la rueda, y R el radio de la misma.

Supongamos ahora que bajamos la velocidad y disminuye la velocidad de giro de la rueda. Debido a la inercia, en ese momento $V > \omega R$, lo que provoca un rozamiento que se opone a que el vehículo avance. Nótese que el efecto del frenado es consecuencia de la aparición de la fuerza de rozamiento, caso de no existir la misma, sería imposible.

Ahora bien, existe una deceleración máxima que se puede conseguir, que teniendo en cuenta que $\text{Fuerza de rozamiento} = \text{Masa} \times \text{Deceleración máxima}$, y que $\text{Fuerza de rozamiento} = \text{Peso} \times f = M \times g \times f$ nos lleva a una deceleración de $f \times g$, donde f es el Coeficiente de rozamiento al deslizamiento y g la aceleración de la gravedad (9,8). Si por la acción de frenado superamos esta deceleración, lo que se conseguirá es que el vehículo deslice sobre el pavimento con las ruedas bloqueadas, con el consiguiente peligro.

El coeficiente f es importante en el diseño de pavimentos. Como norma general, con pavimento seco en buenas condiciones este coeficiente viene a tender a 1 (valores mayores no son obtenibles, y además darían lugar a deceleraciones muy bruscas

para el usuario), pero con pavimento húmedo puede bajar a 0,3-0,4 , valores estos que harían la parada en seco bastante arriesgada. En la práctica, se suele exigir que las carreteras den un f de al menos 0,4 – 0,5 con pavimento húmedo.

Atención a que, en los casos anteriormente descritos, estamos refiriéndonos a paradas en las cuales se desarrolla la deceleración máxima (pisar a fondo el freno), lo que en una conducción convencional y segura tampoco es habitual. Lo normal es que se desarrollen aceleraciones de entre 0,1 g y 0,2 g.

El diseño del sistema debe buscar, en definitiva, un equilibrio entre una deceleración suficiente para no colisionar, pero no tan alta que resulte incómoda y el cuerpo salga despedido.

Es interesante tener en cuenta que en una curva la carrocería del vehículo se desplaza hacia el exterior, aumentando el peso sobre las ruedas exteriores y disminuyéndolo sobre las interiores. Así, el rozamiento de las ruedas exteriores con el suelo aumenta, mientras el de las ruedas interiores disminuye.

GUIADO LATERAL

La fuerza de rozamiento se descompone vectorialmente en una componente longitudinal y otra lateral. La fuerza de rozamiento del neumático es:

- completamente de agarre longitudinal en línea recta.
- completamente de guiado lateral recorriendo curvas a velocidad constante.
- mixta cuando se producen aceleraciones o deceleraciones en curva.

De la misma manera que en recta se puede producir un deslizamiento si se llega al rozamiento límite, en curva se puede producir una pérdida de la trayectoria original.

Lo más recomendable cuando se toma una curva, es no acelerar ni frenar bruscamente, esto reduciría la fuerza de guiado lateral. También resultaría peligroso bloquear las ruedas en frenadas, pues el neumático que no gira no puede transmitir fuerzas de guiado lateral. En ambas situaciones, el vehículo puede experimentar movimientos por las inercias, y pueden producirse situaciones de peligro.

La importancia del ABS y otros sistemas como elemento de evitación de pérdidas de adherencia.

El Sistema ABS tiene como objetivo evitar el bloqueo de las ruedas durante el frenado, ayudar a mantener la trayectoria del vehículo y reducir la distancia de frenado. Su función, como sistema de seguridad activa, es la de dosificar el esfuerzo de frenado y adecuarlo a las condiciones de adherencia de cada una de las ruedas, de manera que nunca se llegue a la situación de bloqueo.

Con posterioridad al ABS han aparecido sistemas más sofisticados que potencian en mayor medida la seguridad al volante:

-REPARTO ELECTRÓNICO DE FRENADA: (se suele conocer como EBV o EBD según los distintos fabricantes) Es un sistema que, utilizando los mismos sensores que el ABS, determina cuanta fuerza hay que aplicar a cada rueda para detener el vehículo en una distancia mínima y sin perder el control. Es un sistema más sofisticado, en tanto permite repartir el esfuerzo entre los distintos frenos, evitando llegar a situaciones como tener un lado del eje bloqueando y desbloqueando continuamente y el otro infrutilizado.

-CONTROL DE TRACCIÓN: Es un sistema electrohidráulico diseñado para prevenir la pérdida de adherencia de las ruedas y que estas patinen cuando se acelera en exceso o el firme está muy deslizante (p.ej. con hielo). Utilizando los mismos sensores y accionamientos que el ABS, controla si en la aceleración alguna de las ruedas del eje motor patina, es decir, gira a mayor velocidad de la que debería, y en tal caso actúa reduciendo el par de giro y de esta manera recuperando la adherencia entre neumático y firme, realizando una (o más de una a la vez) de las siguientes acciones

- Retardar o suprimir la chispa de uno o más cilindros
- Reducir la inyección de combustible a uno o más cilindros
- Frenar la rueda que ha perdido adherencia

Este sistema actuará por ejemplo en aceleraciones bruscas sobre firmes mojados y/o grava, así como sobre caminos de tierra y en superficie helada. En determinadas situaciones (acumulación de nieve virgen, barro o arena) conviene desconectar el sistema a través del botón de desconexión, ya que en ese tipo de situaciones la única forma de que el vehículo avance es que las ruedas patinen. Si el sistema en esa situación permaneciese activo, lo detectaría y comenzaría a cortar la inyección, y por tanto parar el motor, con lo que las ruedas tenderían a enterrarse aun mas.

Las siglas más comunes para este sistema son ASR (Automatic Stability Control o Anti-slip Regulation) y TCS (Traction Control System).

-CONTROL DE ESTABILIDAD: Es un sistema aun más sofisticado que los anteriores, que mediante la centralización de las funciones del ABS, reparto electrónico de frenada y control de tracción, actúa frenando individualmente las ruedas en situaciones de riesgo para evitar derrapes, tanto sobrevirajes como subvirajes.

Se suele conocer como ESP (fue la primera patente, desarrollada por Bosch y montada en los Mercedes Benz Clase S), que corresponde a las iniciales en Alemán de “programa electrónico de estabilidad”. Otros desarrollos comerciales se conocen por las iniciales VDC, DSC, ESC o VSC.

El sistema se compone de una unidad de control, un grupo hidráulico y un conjunto de sensores:

-Sensor de ángulo de dirección: se ubica en la dirección y proporciona información del movimiento del volante.

-Sensor de Velocidad de giro de la rueda: el mismo del ABS, informa sobre el comportamiento de las mismas (si están bloqueadas, si patinan...)

-Sensor de ángulo de giro y aceleración transversal: proporciona información sobre desplazamientos del vehículo alrededor de su eje vertical y desplazamientos y fuerzas laterales, es decir, si el vehículo tiende a derrapar y desviarse de la trayectoria deseada por el conductor.

El microordenador del ESP controla las señales de los sensores y las chequea 25 veces por segundo. Para comprobar que la dirección que desea el conductor a través del volante se corresponde con la de movimiento real del vehículo. En caso de detectar una disparidad, el ESP generará la fuerza contraria necesaria para que el vehículo en efecto reaccione según las ordenes del conductor. Su actuación no tiene porque limitarse a los frenos, sino que también puede reducir el par del motor. De esta manera el coche se mantiene seguro y estable, dentro de los límites de la física.

El control de estabilidad puede tener algunas funciones adicionales:

-Hill Hold Control o control de ascenso en pendientes: es un sistema que evita que el vehículo retroceda al reanudar la marcha en una pendiente.

-BSW o sistema de secado de los discos de frenado

-Overboost, que permite compensar la presión del líquido de frenos cuando el mismo está sobrecalentado

-Trailer Sway Mitigation: mejora la estabilidad cuando se lleva un remolque, evitando el efecto tijera.

-Load Adaptive control: que permite controlar posición y volumen de la carga en vehículos industriales ligeros y de esa forma evitar un posible vuelco por pérdida de estabilidad.

Numerosas organizaciones relacionadas con la seguridad vial, como EuroNCAP, así como clubes de automovilismo como RACC, RACE o CEA aconsejan la compra de automóviles equipados con el control de estabilidad, ya que ayuda a evitar los accidentes por salida de la carretera, entre otros, y podría disminuir el índice de mortalidad en las carreteras en más de un 20%.

El ESP reduce el número de accidentes por derrape. Los estudios globales que han realizado los fabricantes de coches, las compañías de seguros y los ministerios de transporte han demostrado que el sistema ESP previene hasta el 80 % de los accidentes por derrape. Esto también se refleja en los gráficos de accidentes respectivos. Cuando hablamos de sistemas de seguridad que salvan vidas, el ESP está en segundo lugar, sólo después de los cinturones de seguridad.

En junio de 2009, la Unión Europea aprobó una legislación que hace obligatorio el uso del ESP para todos los vehículos de las categorías N1, N2, N3 y M1, M2, M3: turismos, vehículos industriales ligeros, autobuses y vehículos industriales medianos y pesados a partir de noviembre de 2014.

9 MEDIDA DE COEFICIENTES DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO

Existen 2 grandes grupos de métodos para medir el CRD.

-Los métodos de medida puntual de bajo rendimiento: El más destacable es el péndulo TRRL

-Péndulo TRRL mas correctamente denominado como British Portable Skid Resistance Tester. El ensayo consiste en evaluar la pérdida de energía de un péndulo terminado en una zapata de caucho cuando esta roza en la caída sobre la superficie a ensayar. La citada pérdida de energía se evalúa en base a la alteración en el ángulo de oscilación del péndulo.

Como en todo sistema de medida, es preciso una definición muy concreta de las características del equipo y de las condiciones de la medida, a fin de que mediciones realizadas con péndulos TRRL diferentes sean comparables (a tal efecto, conviene ya señalar que las medidas de los distintos sistemas aquí descritos y otros que puedan existir no tienen porqué ser idénticas, si bien existen en algunos casos métodos empíricos de conversión).

Volviendo al Péndulo TRRL, describiremos a continuación sus características: El péndulo debe pesar 1500 g (con un error admisible de 30g). Su centro de gravedad debe estar situado en el eje del brazo. A 411 mm del centro de suspensión (con un error de 4 mm). Y la circunferencia descrita por el borde de la zapata, con centro en el eje de suspensión, deberá tener un radio de 508 mm.

No es un método práctico para campañas de medición masivas, tanto por la imposibilidad de hacerlo desde un vehículo en movimiento como por la necesidad de nivelar el péndulo al medir (mediante tornillos de ajuste y un nivel de burbuja) lo que haría muy lenta la medición. Debemos considerarlo mas bien como un método “de laboratorio”).

-Los métodos de medición continua de alto rendimiento: Entre ellos a nivel internacional destacan el SCRIM, el Mu-Meter y el Grip Tester

-Mu-Meter: Consiste en un pequeño Trailer de 3 ruedas que realiza las medidas, pudiendo ser arrastrado por un vehículo no especializado (no es un equipo muy voluminoso). Los datos de los sensores se transmiten a un PC convencional montado en el Vehículo Tractor (FIG 6A)

-Grip Tester : físicamente similar al Mu-Meter, utiliza un neumático de goma lisa normalizada mediante la cual mide la resistencia al deslizamiento con rueda bloqueada al 15% sobre pavimento mojado (0,25 mm de película de agua). El vehículo que arrastra el Grip Tester debe ir dotado de un depósito de agua de 500 o 1000 litros.

-SCRIM: (Sideway-force coefficient routine investigation machine), de origen británico, se utiliza para la medida en continuo del coeficiente de rozamiento transversal. Estos equipos se vienen empleando en España para las campañas de auscultación sistemática de la RGE del estado, así como en algunas CCAA (FIG 6B)

En el SCRIM la rueda de medida, lisa e inclinada, va montada en una caja dentro del propio camión. Este lleva un dispositivo de riego para mojar la superficie por delante de la rueda.

La velocidad de medida suele ser de 50 km/h en carreteras ordinarias y de 60-80 Km/h en carreteras de dos calzadas.

De lo expuesto deducimos: que existen dos coeficientes de rozamiento: el longitudinal y el transversal. La medida de uno u otro dependen de si el coeficiente lo medimos con la rueda en sentido de la marcha, o que giremos esta con un cierto ángulo de deriva.

Como característica, podemos destacar que ambos coeficientes dependen de la velocidad, aunque el transversal en menor proporción. Para pequeñas derivas, su valor es proporcional al ángulo e independiente del estado de pavimento y neumáticos. Para ángulos mayores, el valor se mantiene prácticamente constante, siendo menor en pavimentos mojados que secos (FIG 7)

Aunque el coeficiente transversal es en general mayor que el longitudinal, las normas de carreteras vienen proponiendo usar valores bastante menores, y función también de la velocidad específica de la curva

V	30	40	50	60	70	80	90	100	120
Ct	0.21	0.191	0.171	0.156	0.148	0.141	0.135	0.126	0.112

En el caso del coeficiente de rozamiento longitudinal, la Instrucción de carreteras fija los valores en función de la velocidad específica o máxima velocidad admisible en condiciones ideales.

V	30	40	50	60	70	80	100	120
CI	0.40	0.38	0.365	0.35	0.34	0.33	0.325	0.32

Los coeficientes obtenidos con los diversos procedimientos presentan naturales diferencias, incluso con aparatos del mismo tipo se presentan diferencias debido a las muy numerosas variables que intervienen. Aun así, los distintos aparatos clasifican de la misma forma los pavimentos, es decir, si se mide la resistencia al deslizamiento a una velocidad dada de varios pavimentos por distintos métodos y se clasifican según los valores obtenidos, estas clasificaciones serán iguales, aunque los valores numéricos obtenidos sean distintos.

Un factor muy importante es la velocidad a que se realiza la medida, ya que prácticamente no puede interpretarse el coeficiente de resistencia al deslizamiento sin conocer esta velocidad. La variación del valor del coeficiente en función de la velocidad depende del tipo de pavimento y otras variables, aunque en general tiende a bajar al aumentar la velocidad.

EL ÍNDICE DE FRICCIÓN INTERNACIONAL

La existencia de una disparidad de equipos de medida del CRD ha venido conduciendo a situaciones complicadas, como por ejemplo que los autores del proyecto de una carretera hayan empleado para el cálculo de las distancia de detención valores del coeficiente de rozamiento longitudinal que no se corresponden a los criterios empleados en la construcción y la conservación.

Es por ello que desde determinados organismos de carreteras se ha promovido la definición de un índice que represente las características de seguridad vial en condiciones de frenado (CRD y Textura) y se ha llegado a la definición del IFI (International Friction Index, o índice de fricción internacional).

El IFI viene expresado por dos números expresados entre paréntesis y separados por una coma: el primero representa la fricción y el segundo la macrotextura. El primero es un número adimensional y el segundo un número positivo sin límites determinados. Un valor cero de la fricción indica deslizamiento perfecto, y un valor uno adherencia. En cuanto al segundo número, no es posible describirlo mediante una relación sencilla.

En definitiva, lo que se pretende con el IFI es posibilitar transformar (mediante ecuaciones y curvas) los datos obtenidos por los distintos equipos de medición a una escala común y comparable.

10 EVOLUCIÓN DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO AL DESLIZAMIENTO

La resistencia al deslizamiento de un pavimento recién ejecutado es en general muy elevada. Mientras que con superficie seca se conserva prácticamente constante después de usada por el tráfico, la resistencia con superficie mojada sí que se ve afectada.

Como ejemplo, podemos considerar la evolución de la resistencia al deslizamiento sobre superficies mojadas en los pavimentos de un tramo de ensayo (describiremos el citado ensayo)

Las medidas se realizarán con el péndulo TRRL

Los altos valores iniciales del coeficiente de resistencia al deslizamiento disminuyeron rápidamente durante los tres primeros meses, y a partir de entonces los valores obtenidos oscilaron respecto a un valor medio al que superan durante el invierno, mientras que descienden por debajo de la media durante el verano. Es decir, que existe una marcada variación estacional de la resistencia al deslizamiento.

La variación de la resistencia al deslizamiento se debe a los cambios en las propiedades de la superficie producidas por el tráfico y a los agentes meteorológicos. El factor principal es el paso de las ruedas de los vehículos, por lo que se concluye que el valor del coeficiente de resistencia al deslizamiento varía dentro de una misma sección transversal.

11 VALORES MÍNIMOS DE LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO

La resistencia al deslizamiento debería ser suficiente para que los conductores pudieran realizar las maniobras normales sin que los vehículos deslizaran. En realidad, es posible conducir aun cuando sus ruedas deslicen, pero son muy pocos los conductores no profesionales que son capaces de hacerlo. La mayoría de los mismos se asustaran en estas situaciones y sus reacciones probablemente agravaran el problema.

Como se ha visto, las aceleraciones de frenado o centrífugas durante los giros rara vez superan los 4 m/s². Por ello, parecería que un valor del coeficiente de resistencia al deslizamiento del orden de 0,4 a velocidades medias (50 a 80 Km/h) debería ser suficiente en la mayor parte de los casos. Sin embargo, factores tales como el mal reparto de la carga entre ejes, las diferencias del sistema de frenado, etc. Pueden producir el deslizamiento en algunas ruedas, aunque la aceleración media no sobrepase los 4 m/s². Por ello, en algunos sitios como curvas muy cerradas, accesos a intersecciones donde muchos vehículos deben frenar etc. Puede ser preciso obtener valores más elevados.

Posiblemente, el método más racional para determinar los valores aceptables de la resistencia al deslizamiento sea el de relacionar los índices de accidentes registrados en distintos tramos con los coeficientes de resistencia al deslizamiento medio en los mismos. Ya que los pavimentos secos no ocasionan ningún problema al deslizamiento, se deben estudiar los accidentes ocurridos cuando la calzada está mojada y en los que algunos de los vehículos implicados haya deslizado. Se han realizado estudios muy extensos de este tipo en Gran Bretaña. De ellas se deduce que el riesgo que existe de accidentes por deslizamiento en un cierto punto de la carretera aumenta muy rápidamente cuando el coeficiente de resistencia al deslizamiento a 50 Km/h es menor de 0,40 mientras que es muy pequeño cuando el coeficiente es mayor que 0,50.

Naturalmente, en ciertos puntos como curvas de pequeño radio, el riesgo de accidentes es mayor que en secciones de mejor trazado. En carreteras de alta velocidad como las autopistas, el riesgo de accidentes está más directamente relacionado con la resistencia al deslizamiento a mayor velocidad.

A continuación se describen los valores mínimos del coeficiente de resistencia al deslizamiento propuestos por el comité Marshall de Gran Bretaña, en el que se pone de manifiesto la influencia de las características del tramo.

Tramos muy difíciles: V de medida 50 Km/h CRD transversal mínimo deseable 0,55

En este grupo incluiríamos: Glorietas, curvas de menos de 150m de radio en carreteras sin limitación de velocidad, pendientes iguales o superiores al 5% y más de 100 m de longitud, accesos a intersecciones con semáforos en vías sin limitación de velocidad.

Tramos de tipo medio:

-Autopistas y Otras carreteras de alta velocidad: V de medida 80 Km/h y CRD transversal mínimo deseable de 0,45

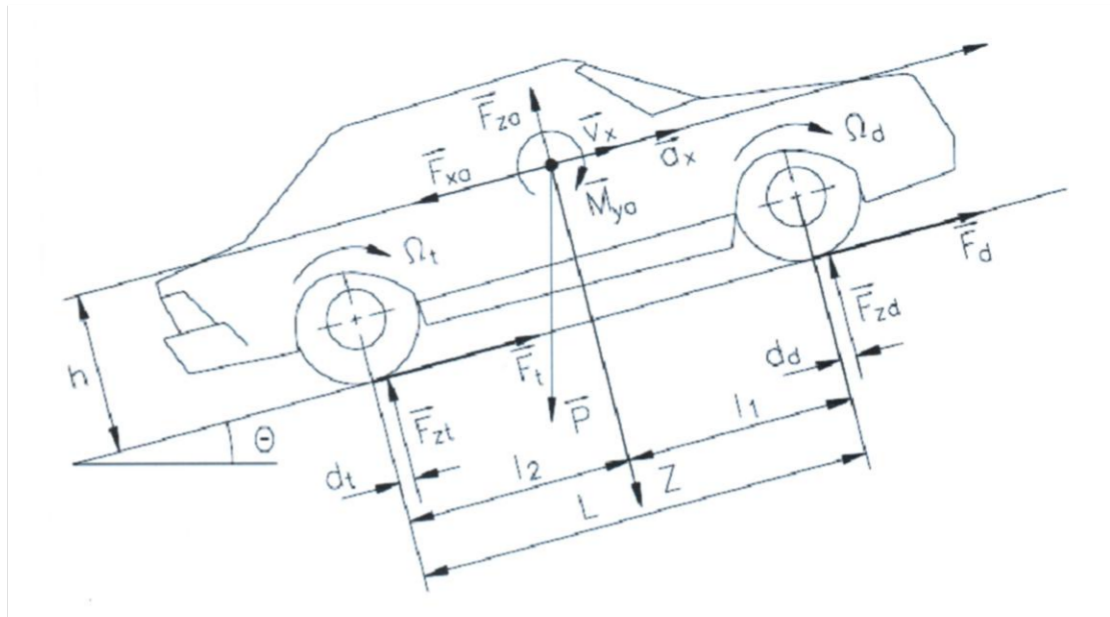
-Carreteras principales y vías urbanas con más de 2000 vehículos/día: V de medida 50 Km/h CRD transversal mínimo deseable 0,50

Otros tramos: V de medida 50 Km/h CRD transversal mínimo deseable 0,40

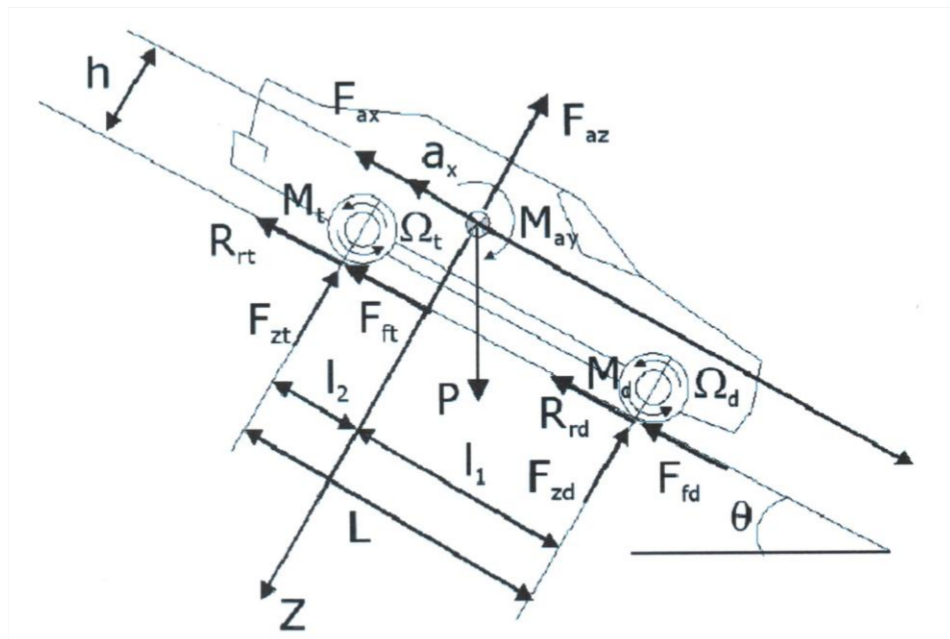
En este grupo meteríamos: carreteras generalmente rectas, con pendientes y curvas suaves, sin intersecciones y libres de factores que pueden provocar situaciones de emergencia.

ANEXO GRÁFICO

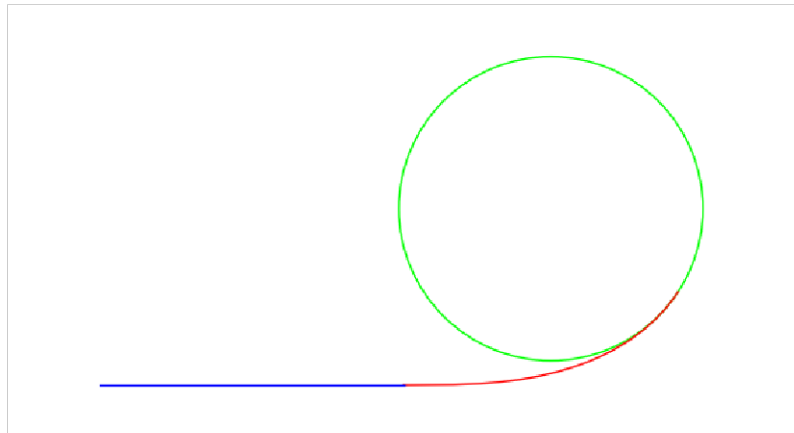
▪ Dinámica longitudinal



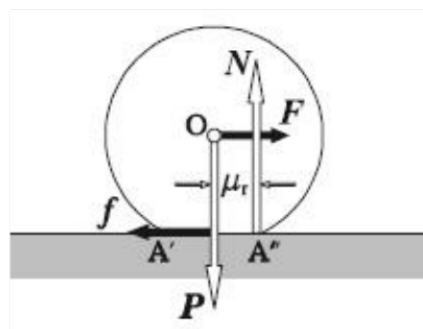
▪ Dinámica de frenado



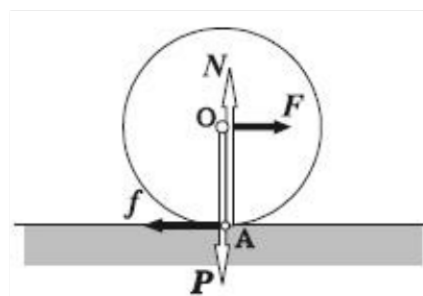
▪ Gráfico de clotoide



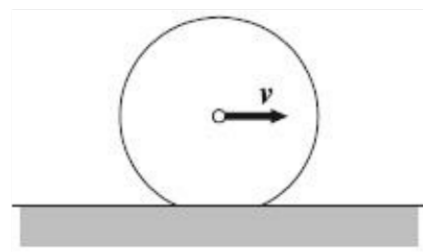
- Figuras de resistencia a la rodadura



Rodadura de cilindro deformable sobre pavimento indeformable

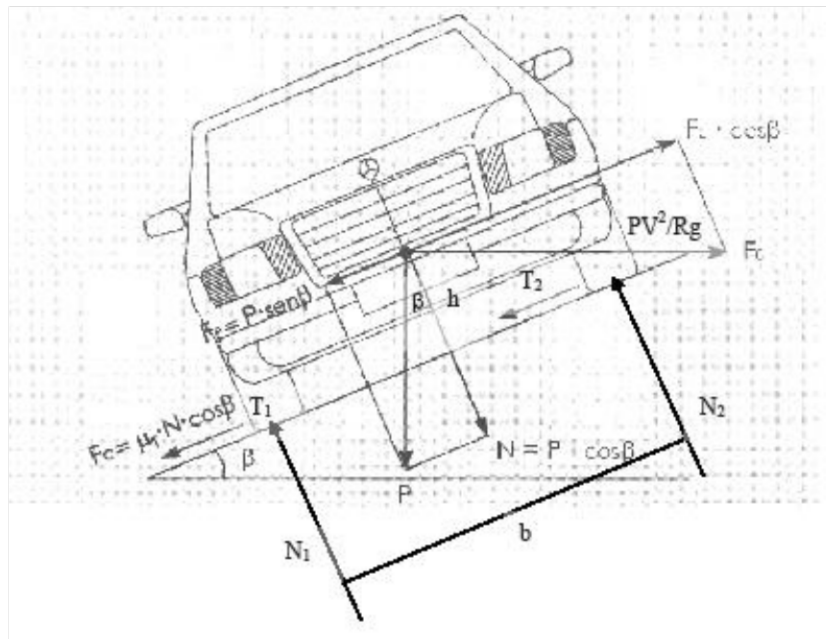


Rodadura ideal

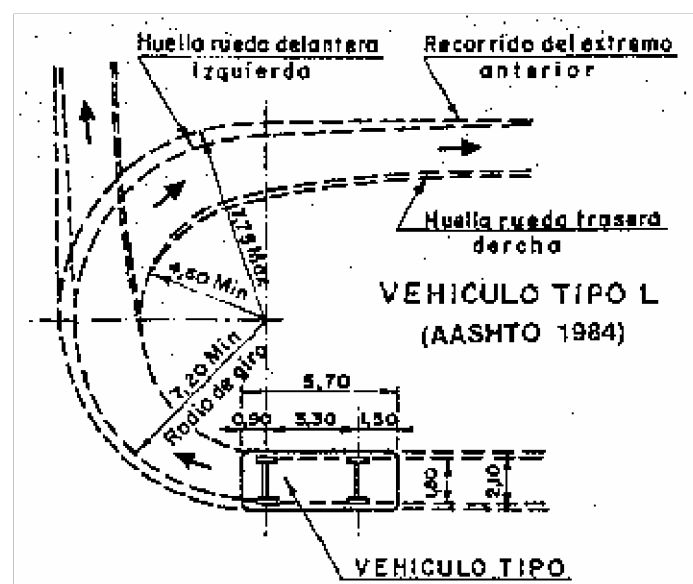


Deformación en la generatriz de apoyo

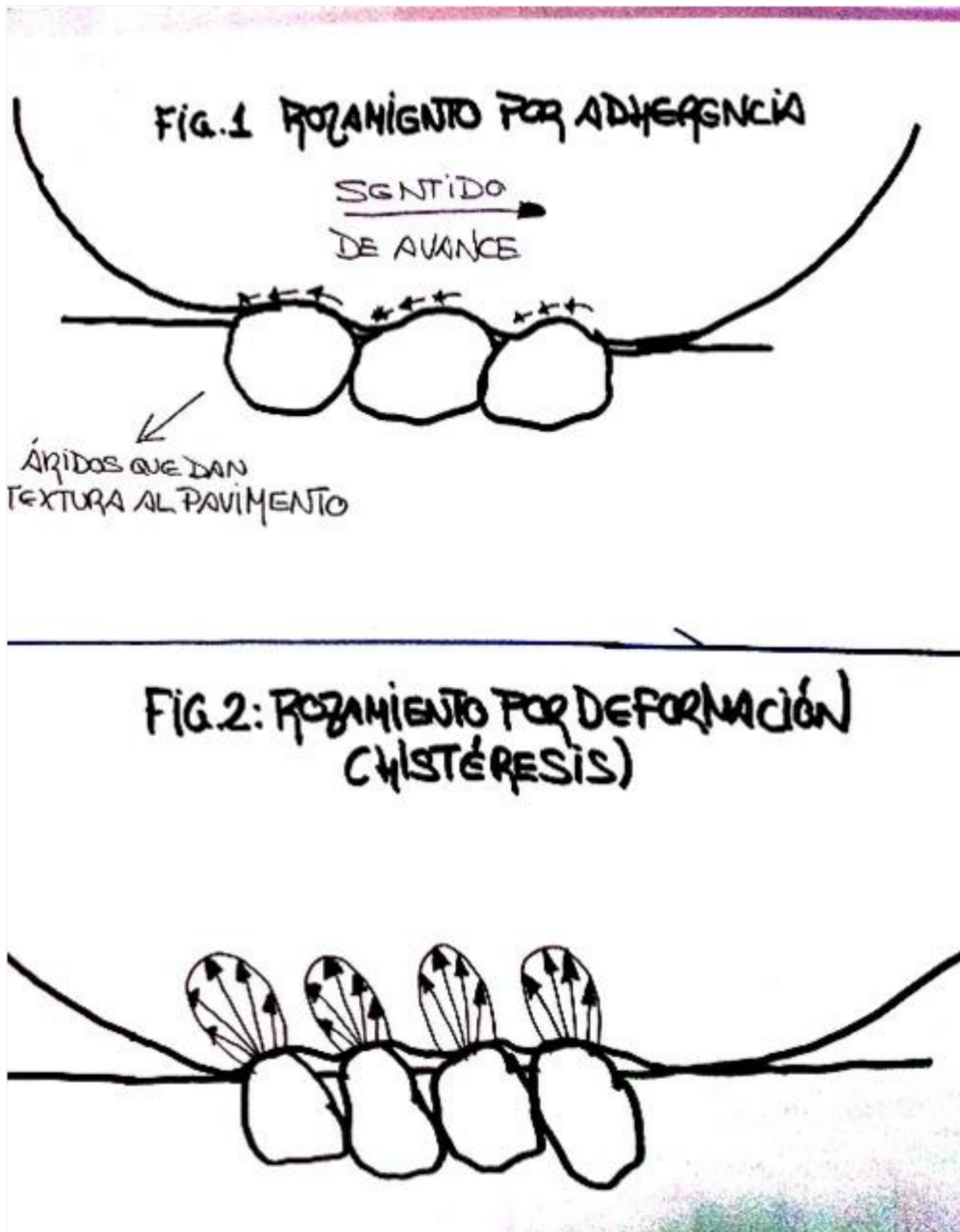
- Interacción ruedas pavimento - peralte



- Trayectoria de un vehículo en curva



- Figuras de rozamiento por adherencia o por deformación



- Métodos de medición continua de alto rendimiento

FIG. 6A : MU-METER

Mu-Meter P16 S - Specifications

Trailer Part No.	450000-1000
Dimensions	
Length	1000 mm (33 ft)
Width	1000 mm (33 ft)
Height to top frame	275 mm (10.8 in)
Working Height	
From trailer top	100 mm (4 in)
to ground	175 mm (6.9 in)
Operational Weight	
including fuel	210 kg (463 lb)
Wheels	
Single Pressure Type	Special duty
Double Pressure Type	Std. 10 x 4 x 6 in
Testing Speed	
Runway friction testing	0.1 km/h (0.1 mph) to 100 km/h (62 mph)
	10 km/h (6.2 mph) to 100 km/h (62 mph)
Surface Calibration	
may be operated at	0.1 to 10 km/h (0.1 to 6.2 mph)
	10 to 100 km/h (6.2 to 62 mph)
Operating Voltage	12V DC
Electronic Module Processor Unit (Supplies P16)	
Dimensions (mm) (inches)	100 x 100 x 100 mm (4 x 4 x 4 in)

Working Methods Interface

May be used with P16 controllers or external module system.

Water resistance system

A range of water delivery systems are available as options and can be modified to supplement the Mu-Meter when it is required to deliver water to a surface in the appropriate authority nominated location.

Computer processing

The computer of the Mu-Meter can store up to 1000 test results for manual processing and the long historical processing is available.

Hard disk system

The hard disk can store the ability to store up to 1000 test results for manual processing and the long historical processing is available.

Douglas Equipment Limited, Special Products Division
Hills Road, Walsby, Chatterkirk, Leicestershire LE14 6AG,
United Kingdom
Tel: +44 (0) 1533 610000
Fax: +44 (0) 1533 610001
E-mail: sp@douglasequipment.com
Web site: www.douglasequipment.com

Electronic control and processing methods

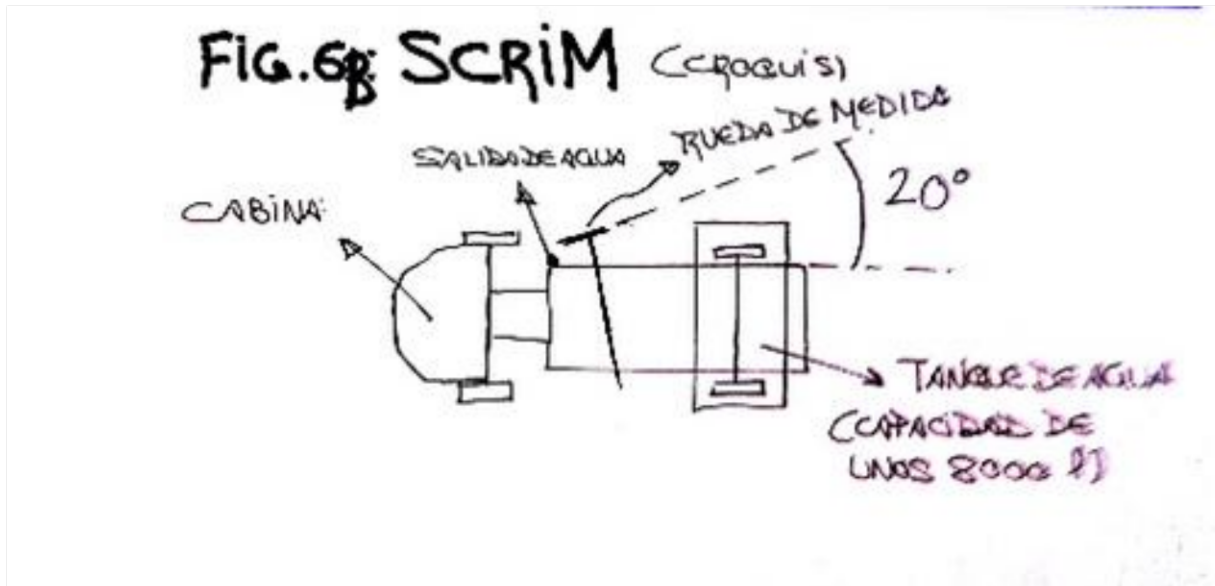
Information arising, monitoring, processing, recording, saving and recall data are all contained in the electronic system. It is contained in a secure system, using the test data, allowing secure storage and the control system and processor are mounted in the testing vehicle.

The monitoring and control system are mounted in the testing vehicle.

Controlled operations between the unit are made through a standardised interface system giving immediate feedback to the system of control to that the data is always available to the system. All of the data being used is available to the system to allow the system to control when the test is selected.

Logging processor

The processor comprises a 100 MHz computer with an 80486, 386, 486, 586, 686, 786, 886, 986, 1086, 1186, 1286, 1386, 1486, 1586, 1686, 1786, 1886, 1986, 2086, 2186, 2286, 2386, 2486, 2586, 2686, 2786, 2886, 2986, 3086, 3186, 3286, 3386, 3486, 3586, 3686, 3786, 3886, 3986, 4086, 4186, 4286, 4386, 4486, 4586, 4686, 4786, 4886, 4986, 5086, 5186, 5286, 5386, 5486, 5586, 5686, 5786, 5886, 5986, 6086, 6186, 6286, 6386, 6486, 6586, 6686, 6786, 6886, 6986, 7086, 7186, 7286, 7386, 7486, 7586, 7686, 7786, 7886, 7986, 8086, 8186, 8286, 8386, 8486, 8586, 8686, 8786, 8886, 8986, 9086, 9186, 9286, 9386, 9486, 9586, 9686, 9786, 9886, 9986, 10086, 10186, 10286, 10386, 10486, 10586, 10686, 10786, 10886, 10986, 11086, 11186, 11286, 11386, 11486, 11586, 11686, 11786, 11886, 11986, 12086, 12186, 12286, 12386, 12486, 12586, 12686, 12786, 12886, 12986, 13086, 13186, 13286, 13386, 13486, 13586, 13686, 13786, 13886, 13986, 14086, 14186, 14286, 14386, 14486, 14586, 14686, 14786, 14886, 14986, 15086, 15186, 15286, 15386, 15486, 15586, 15686, 15786, 15886, 15986, 16086, 16186, 16286, 16386, 16486, 16586, 16686, 16786, 16886, 16986, 17086, 17186, 17286, 17386, 17486, 17586, 17686, 17786, 17886, 17986, 18086, 18186, 18286, 18386, 18486, 18586, 18686, 18786, 18886, 18986, 19086, 19186, 19286, 19386, 19486, 19586, 19686, 19786, 19886, 19986, 20086, 20186, 20286, 20386, 20486, 20586, 20686, 20786, 20886, 20986, 21086, 21186, 21286, 21386, 21486, 21586, 21686, 21786, 21886, 21986, 22086, 22186, 22286, 22386, 22486, 22586, 22686, 22786, 22886, 22986, 23086, 23186, 23286, 23386, 23486, 23586, 23686, 23786, 23886, 23986, 24086, 24186, 24286, 24386, 24486, 24586, 24686, 24786, 24886, 24986, 25086, 25186, 25286, 25386, 25486, 25586, 25686, 25786, 25886, 25986, 26086, 26186, 26286, 26386, 26486, 26586, 26686, 26786, 26886, 26986, 27086, 27186, 27286, 27386, 27486, 27586, 27686, 27786, 27886, 27986, 28086, 28186, 28286, 28386, 28486, 28586, 28686, 28786, 28886, 28986, 29086, 29186, 29286, 29386, 29486, 29586, 29686, 29786, 29886, 29986, 30086, 30186, 30286, 30386, 30486, 30586, 30686, 30786, 30886, 30986, 31086, 31186, 31286, 31386, 31486, 31586, 31686, 31786, 31886, 31986, 32086, 32186, 32286, 32386, 32486, 32586, 32686, 32786, 32886, 32986, 33086, 33186, 33286, 33386, 33486, 33586, 33686, 33786, 33886, 33986, 34086, 34186, 34286, 34386, 34486, 34586, 34686, 34786, 34886, 34986, 35086, 35186, 35286, 35386, 35486, 35586, 35686, 35786, 35886, 35986, 36086, 36186, 36286, 36386, 36486, 36586, 36686, 36786, 36886, 36986, 37086, 37186, 37286, 37386, 37486, 37586, 37686, 37786, 37886, 37986, 38086, 38186, 38286, 38386, 38486, 38586, 38686, 38786, 38886, 38986, 39086, 39186, 39286, 39386, 39486, 39586, 39686, 39786, 39886, 39986, 40086, 40186, 40286, 40386, 40486, 40586, 40686, 40786, 40886, 40986, 41086, 41186, 41286, 41386, 41486, 41586, 41686, 41786, 41886, 41986, 42086, 42186, 42286, 42386, 42486, 42586, 42686, 42786, 42886, 42986, 43086, 43186, 43286, 43386, 43486, 43586, 43686, 43786, 43886, 43986, 44086, 44186, 44286, 44386, 44486, 44586, 44686, 44786, 44886, 44986, 45086, 45186, 45286, 45386, 45486, 45586, 45686, 45786, 45886, 45986, 46086, 46186, 46286, 46386, 46486, 46586, 46686, 46786, 46886, 46986, 47086, 47186, 47286, 47386, 47486, 47586, 47686, 47786, 47886, 47986, 48086, 48186, 48286, 48386, 48486, 48586, 48686, 48786, 48886, 48986, 49086, 49186, 49286, 49386, 49486, 49586, 49686, 49786, 49886, 49986, 50086, 50186, 50286, 50386, 50486, 50586, 50686, 50786, 50886, 50986, 51086, 51186, 51286, 51386, 51486, 51586, 51686, 51786, 51886, 51986, 52086, 52186, 52286, 52386, 52486, 52586, 52686, 52786, 52886, 52986, 53086, 53186, 53286, 53386, 53486, 53586, 53686, 53786, 53886, 53986, 54086, 54186, 54286, 54386, 54486, 54586, 54686, 54786, 54886, 54986, 55086, 55186, 55286, 55386, 55486, 55586, 55686, 55786, 55886, 55986, 56086, 56186, 56286, 56386, 56486, 56586, 56686, 56786, 56886, 56986, 57086, 57186, 57286, 57386, 57486, 57586, 57686, 57786, 57886, 57986, 58086, 58186, 58286, 58386, 58486, 58586, 58686, 58786, 58886, 58986, 59086, 59186, 59286, 59386, 59486, 59586, 59686, 59786, 59886, 59986, 60086, 60186, 60286, 60386, 60486, 60586, 60686, 60786, 60886, 60986, 61086, 61186, 61286, 61386, 61486, 61586, 61686, 61786, 61886, 61986, 62086, 62186, 62286, 62386, 62486, 62586, 62686, 62786, 62886, 62986, 63086, 63186, 63286, 63386, 63486, 63586, 63686, 63786, 63886, 63986, 64086, 64186, 64286, 64386, 64486, 64586, 64686, 64786, 64886, 64986, 65086, 65186, 65286, 65386, 65486, 65586, 65686, 65786, 65886, 65986, 66086, 66186, 66286, 66386, 66486, 66586, 66686, 66786, 66886, 66986, 67086, 67186, 67286, 67386, 67486, 67586, 67686, 67786, 67886, 67986, 68086, 68186, 68286, 68386, 68486, 68586, 68686, 68786, 68886, 68986, 69086, 69186, 69286, 69386, 69486, 69586, 69686, 69786, 69886, 69986, 70086, 70186, 70286, 70386, 70486, 70586, 70686, 70786, 70886, 70986, 71086, 71186, 71286, 71386, 71486, 71586, 71686, 71786, 71886, 71986, 72086, 72186, 72286, 72386, 72486, 72586, 72686, 72786, 72886, 72986, 73086, 73186, 73286, 73386, 73486, 73586, 73686, 73786, 73886, 73986, 74086, 74186, 74286, 74386, 74486, 74586, 74686, 74786, 74886, 74986, 75086, 75186, 75286, 75386, 75486, 75586, 75686, 75786, 75886, 75986, 76086, 76186, 76286, 76386, 76486, 76586, 76686, 76786, 76886, 76986, 77086, 77186, 77286, 77386, 77486, 77586, 77686, 77786, 77886, 77986, 78086, 78186, 78286, 78386, 78486, 78586, 78686, 78786, 78886, 78986, 79086, 79186, 79286, 79386, 79486, 79586, 79686, 79786, 79886, 79986, 80086, 80186, 80286, 80386, 80486, 80586, 80686, 80786, 80886, 80986, 81086, 81186, 81286, 81386, 81486, 81586, 81686, 81786, 81886, 81986, 82086, 82186, 82286, 82386, 82486, 82586, 82686, 82786, 82886, 82986, 83086, 83186, 83286, 83386, 83486, 83586, 83686, 83786, 83886, 83986, 84086, 84186, 84286, 84386, 84486, 84586, 84686, 84786, 84886, 84986, 85086, 85186, 85286, 85386, 85486, 85586, 85686, 85786, 85886, 85986, 86086, 86186, 86286, 86386, 86486, 86586, 86686, 86786, 86886, 86986, 87086, 87186, 87286, 87386, 87486, 87586, 87686, 87786, 87886, 87986, 88086, 88186, 88286, 88386, 88486, 88586, 88686, 88786, 88886, 88986, 89086, 89186, 89286, 89386, 89486, 89586, 89686, 89786, 89886, 89986, 90086, 90186, 90286, 90386, 90486, 90586, 90686, 90786, 90886, 90986, 91086, 91186, 91286, 91386, 91486, 91586, 91686, 91786, 91886, 91986, 92086, 92186, 92286, 92386, 92486, 92586, 92686, 92786, 92886, 92986, 93086, 93186, 93286, 93386, 93486, 93586, 93686, 93786, 93886, 93986, 94086, 94186, 94286, 94386, 94486, 94586, 94686, 94786, 94886, 94986, 95086, 95186, 95286, 95386, 95486, 95586, 95686, 95786, 95886, 95986, 96086, 96186, 96286, 96386, 96486, 96586, 96686, 96786, 96886, 96986, 97086, 97186, 97286, 97386, 97486, 97586, 97686, 97786, 97886, 97986, 98086, 98186, 98286, 98386, 98486, 98586, 98686, 98786, 98886, 98986, 99086, 99186, 99286, 99386, 99486, 99586, 99686, 99786, 99886, 99986, 100086, 100186, 100286, 100386, 100486, 100586, 100686, 100786, 100886, 100986, 101086, 101186, 101286, 101386, 101486, 101586, 101686, 101786, 101886, 101986, 102086, 102186, 102286, 102386, 102486, 102586, 102686, 102786, 102886, 102986, 103086, 103186, 103286, 103386, 103486, 103586, 103686, 103786, 103886, 103986, 104086, 104186, 104286, 104386, 104486, 104586, 104686, 104786, 104886, 104986, 105086, 105186, 105286, 105386, 105486, 105586, 105686, 105786, 105886, 105986, 106086, 106186, 106286, 106386, 106486, 106586, 106686, 106786, 106886, 106986, 107086, 107186, 107286, 107386, 107486, 107586, 107686, 107786, 107886, 107986, 108086, 108186, 108286, 108386, 108486, 108586, 108686, 108786, 108886, 108986, 109086, 109186, 109286, 109386, 109486, 109586, 109686, 109786, 109886, 109986, 110086, 110186, 110286, 110386, 110486, 110586, 110686, 110786, 110886, 110986, 111086, 111186, 111286, 111386, 111486, 111586, 111686, 111786, 111886, 111986, 112086, 112186, 112286, 112386, 112486, 112586, 112686, 112786, 112886, 112986, 113086, 113186, 113286, 113386, 113486, 113586, 113686, 113786, 113886, 113986, 114086, 114186, 114286, 114386, 114486, 114586, 114686, 114786, 114886, 114986, 115086, 115186, 115286, 115386, 115486, 115586, 115686, 115786, 115886, 115986, 116086, 116186, 116286, 116386, 116486, 116586, 116686, 116786, 116886, 116986, 117086, 117186, 117286, 117386, 117486, 117586, 117686, 117786, 117886, 117986, 118086, 118186, 118286, 118386, 118486, 118586, 118686, 118786, 118886, 118986, 119086, 119186, 119286, 119386, 119486, 119586, 119686, 119786, 119886, 119986, 120086, 120186, 120286, 120386, 120486, 120586, 120686, 120786, 120886, 120986, 121086, 121186, 121286, 121386, 121486, 121586, 121686, 121786, 121886, 121986, 122086, 122186, 122286, 122386, 122486, 122586, 122686, 122786, 122886, 122986, 123086, 123186, 123286, 123386, 123486, 123586, 123686, 123786, 123886, 123986, 124086, 124186, 124286, 124386, 124486, 124586, 124686, 124786, 124886, 124986, 125086, 125186, 125286, 125386, 125486, 125586, 125686, 125786, 125886, 125986, 126086, 126186, 126286, 126386, 126486, 126586, 126686, 126786, 126886, 126986, 127086, 127186, 127286, 127386, 127486, 127586, 127686, 127786, 127886, 127986, 128086, 128186, 128286, 128386, 128486, 128586, 128686, 128786, 128886, 128986, 129086, 129186, 129286, 129386, 129486, 129586, 129686, 129786, 129886, 129986, 130086, 130186, 130286, 130386, 130486, 130586, 130686, 130786, 130886, 130986, 131086, 131186, 131286, 131386, 131486, 131586, 131686, 131786, 131886, 131986, 132086, 132186, 132286, 132386, 132486, 132586, 132686, 132786, 132886, 132986, 133086, 133186, 133286, 133386, 133486, 133586, 133686, 133786, 133886, 133986, 134086, 134186, 134286, 134386, 134486, 134586, 134686, 134786, 134886, 134986, 135086, 135186, 135286, 135386, 135486, 135586, 135686, 135786, 135886, 135986, 136086, 136186, 136286, 136386, 136486, 136586, 136686, 136786, 136886, 136986, 137086, 137186, 137286, 137386, 137486, 137586, 137686, 137786, 137886, 137986, 138086, 138186, 138286, 138386, 138486, 138586, 138686, 138786, 138886, 138986, 139086, 139186, 139286, 139386, 139486, 139586, 139686, 139786, 139886, 139986, 140086, 140186, 140286, 140386, 140486, 140586, 140686, 140786, 140886, 140986, 141086, 141186, 141286, 141386, 141486, 141586, 141686, 141786, 141886, 141986, 142086, 142186, 142286, 142386, 142486, 142586, 142686, 142786, 142886, 142986, 143086, 143186, 143286, 143386, 143486, 143586, 143686, 143786, 143886, 143986, 144086, 144186, 144286, 144386, 144486, 144586, 144686, 144786, 144886, 144986, 145086, 145186, 145286, 145386, 145486, 145586, 145686, 145786, 145886, 145986, 146086, 146186, 146286, 146386, 146486, 14658



- Coeficiente de rozamiento transversal

