

METODO PARA EVALUAR LAS PROPIEDADES DINAMICAS DE UN VEHICULO AUTOMOTOR

J. PRZYHYLSKI, *) J.D. NAVA A. **)

*) Universidad del Zulia

***) Universidad de Los Andes

RESUMEN

El uso de la quinta rueda colocada adicionalmente en la parte trasera de un vehículo de prueba, método donde no se requiere equipos de medición especial, condición imprescindible al emplear otros métodos, permite evaluar las propiedades dinámicas de los vehículos automotores en base a los resultados de experimentos realizados en condiciones reales, o sea en la carretera.

El método garantiza una elevada exactitud y confiabilidad en la obtención del ángulo máximo admisible a la pendiente que puede un vehículo alcanzar y en los gráficos que representa el factor dinámico D en función de la velocidad de avance V del vehículo, para todas las marchas de la caja de velocidad.

En este trabajo se presentan los resultados experimentales aplicando el método de la quinta rueda a un vehículo convencional.

ABSTRACT

Dynamic properties of vehicles: Measuring method.

The addition of a fifth wheel is a way of measuring the dynamic properties of vehicles under real road conditions. Even when remounted, unlike in all the methods, the fifth wheel approach is accurate in obtaining both: the maximum admissible inclination angle for the vehicle and the graphics representing the dynamic factor (D) as a function of the velocity (V) for all different gears.

In this paper, the experimental results obtained after applying to a conventional car the fifth wheel method are presented.

INTRODUCCION

Por regla general, para la evaluación de las propiedades dinámicas de los vehículos automotores se utilizan los gráficos que representan la variación del factor dinámico D en función de la velocidad de avance V del vehículo, para todas las marchas de la caja de velocidades. El factor dinámico por su parte, representa una relación entre la reserva de la fuerza de tracción F_R y el peso total G del vehículo.

Es decir

$$D = \frac{F_R}{G} = \frac{F_T - R_a}{G} = \frac{R_{\psi} - R_{ac}}{G} \quad (1)$$

donde F_T - fuerza de tracción, en Kg,
 R_a - resistencia aerodinámica, en Kg,
 R_ψ - resistencia de la carretera, en Kg
 R_{ac} - resistencia a la aceleración, en Kg

Resistencia aerodinámica

$$R_a = 0,0048 C_x \cdot A \cdot V^2 \quad (2)$$

siendo

C_x - coeficiente aerodinámico, que depende de la forma del vehículo,
 A - área frontal del vehículo, en m^2 ,
 V - velocidad relativa del vehículo respecto al aire, en km/h.

La resistencia de la carretera puede determinarse según la siguiente fórmula

$$R_\psi = G(f \cdot \cos \alpha + \text{sen} \alpha) \quad (2)$$

donde f - coeficiente de la rodadura,
 α - ángulo de la inclinación de la carretera con la horizontal.

La resistencia a la aceleración será igual a

$$R_{ac} = \frac{G}{g} \frac{dV}{dt} \delta = \frac{G}{g} \delta a \quad (4)$$

siendo

g - aceleración de gravedad, en m/s^2 ,
 a - aceleración del avance, en m/s^2 ,
 δ - coeficiente de la participación de las masas giratorias

Analizando las resistencias al avance en base de las ecuaciones (2), (3) y (4), se observa que la determinación del factor dinámico requiere el conocimiento previo del valor del coeficiente aerodinámico C_x , o por el contrario, el coeficiente de la rodadura f . No obstante, en la mayoría de los casos no se disponen de estas magnitudes, lo que dificulta una aplicación directa de la característica dinámica para evaluar las propiedades, del

vehículo. La finalidad del método que se presenta a continuación, es obviar la dificultad anteriormente mencionada, evaluando las propiedades dinámicas del vehículo en base de las curvas características de tracción, obtenidas como resultado de los experimentos.

DESARROLLO DEL METODO

Durante el movimiento de un vehículo automotor de la fuerza de tracción F_T tiene que superar todas las resistencias al avance, lo que puede expresarse por medio de la siguiente ecuación.

$$F_T = R + R_a + R_{ac} = R_f + R_p + R_a + R_{ac} \quad (5)$$

donde R_p - resistencia de avance relacionada con la superación de una pendiente, en Kg,

R_f - resistencia a la rodadura, en Kg.

La fórmula (5) expresa analíticamente el balance de tracción del vehículo automotor, se conoce también como ecuación del movimiento del vehículo. La representación gráfica del balance de tracción, lo demuestra la figura 1.

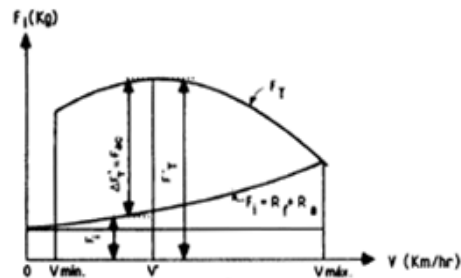


FIG. 1.-GRÁFICO DE BALANCE DE TRACCIÓN PARA LA MARCHA DIRECTA.

Durante el movimiento del vehículo automotor originado solamente por inercia, la fuerza de tracción es igual a cero. Suponiendo que la carretera es horizontal, el avance del vehículo puede describirse por medio de la siguiente ecuación

$$F_i = \frac{G}{g} \delta_0 a_0 = R_f + R_a \quad (6)$$

donde a_0 - deceleración, en m/s^2 ,

δ_0 - coeficiente de la participación de las masas giratorias para el movimiento del vehículo debido a la inercia. Este coeficiente puede calcularse utilizando la siguiente fórmula.

$$\delta_0 = 1 + \frac{J_R}{G r_d} g \quad (7)$$

siendo J_R - suma de los momentos de inercia de las ruedas del vehículo, en Kgm/s^2 ,

r_d - radio dinámico de las ruedas del vehículo, en m.

Par el caso en que el vehículo automotor acelera su movimiento en una carretera horizontal, el balance de las fuerzas de tracción está expresado por la siguiente ecuación

$$F_T = R_f + R_a + R_{ac} = F_i + F_{ac} \quad (8)$$

Es decir, para el movimiento acelerado la fuerza de aceleración $F_{ac} = R_{ac}$ sería igual a la fuerza de tracción F'_T o sea

$$F'_T = F_T - F_i = F_{ac} \quad (9)$$

La resistencia a la aceleración se determinará según la fórmula (4) siendo, sin embargo, en el caso de aceleración el coeficiente de participación de las masas giratorias igual a

$$\delta = 1 + \frac{(J_v \cdot i_{cv}^2 \cdot i_0^2 \cdot \eta_m + J_R)}{r_d^2 \cdot G} g \quad (10)$$

donde J_v - momento de inercia del volante del motor, en Kgm/s^2 ,

i_{cv} - relación de transmisión de la caja de velocidades,

i_0 - relación de transmisión del puente motriz

η_m - rendimiento mecánico del sistema de transmisión

La fórmula (10) puede ser sustituida por la siguiente expresión

$$\delta = 1 + a \cdot i_{cv}^2 + b$$

donde

$$a = \frac{J_v \cdot i_0^2 \cdot \eta_m \cdot g}{r_d^2 \cdot G}$$

mientras que

$$b = \frac{J_R \cdot g}{r_d^2 \cdot G}$$

En el caso de las cajas de velocidades mecánicas, el valor aproximado del coeficiente de participación de las masas giratorias puede determinarse utilizando la siguiente fórmula <1>

$$\delta = 1 + 0,07 i_{cv} \quad (12)$$

El valor del coeficiente del rendimiento mecánico para un sistema de transmisión con caja de velocidades mecánica se calculará utilizando la siguiente expresión

$$\eta_m = 0,98^x \cdot 0,97^y \cdot 0,99^z$$

donde x, y - número de partes de engranajes cilíndricos y cónicos, respectivamente

z - número de acoplamientos (juntas) cardan del árbol de transmisión

Para determinar los valores de la fuerza de inercia F_i y la resistencia de aceleración R_{ac} se utilizan los gráficos $V = f(t)$, obtenidos experimentalmente (Fig. 2 y 3), como resultados de los ensayos de deceleración y aceleración del vehículo. En el último caso se realiza la aceleración en marcha directa, o en su defecto, a la más elevada.

Estos gráficos se obtienen utilizando durante la realización de los ensayos la llamada "quinta rueda", la cual se fija a la parte trasera del vehículo. La velocidad inicial para el ensayo de deceleración es igual a $0,9 V_{max}$ aproximadamente.

Los valores de deceleración y aceleración serán respectivamente iguales a

$$a_0 = \frac{V_0}{3,6 \text{ t}} \quad a = \frac{V}{3,6 \text{ t}}$$

Los valores t se determinan en los propios gráficos, considerando que

$$V_0 = V.$$

Una vez determinados los valores de a_0 y a , se calcularán, según fórmulas (6) y (4), las magnitudes de la fuerza de inercia y de la resistencia a la aceleración, para las mismas velocidades de avance. Posteriormente, sumando los valores de la fuerza de inercia F_i con los valores de la fuerza de tracción necesaria para superar la resistencia a la aceleración F_{ac} , se obtienen los valores de la fuerza de tracción F_T . Precisamente esta fuerza es la que garantiza un movimiento acelerado del vehículo en una carretera horizontal.

En base de los resultados obtenidos se construye la parte inferior del gráfico de la característica de tracción, representada en la figura 4.

Los valores de la fuerza de tracción para las demás marchas se determinan de la siguiente fórmula

$$F_T' = F_T \cdot \eta_m \cdot i_{cv}' \frac{1}{i_{cv}} \quad (14)$$

siendo i_{cv} - relación de transmisión de la caja de velocidades utilizada durante el experimento,

i_{cv}' - relación de transmisión de la caja de velocidades, para la cual se efectúan los cálculos,

η_m - coeficiente de rendimiento mecánico, el cual considera las pérdidas adicionales con respecto a la marcha directa.

El valor de la fuerza de tracción F_T' corresponderá al siguiente valor de la velocidad de avance.

$$V' = V \frac{i_{cv}}{i_{cv}'} \quad (15)$$

Una vez dibujado el diagrama $F_T = f(V)$ para todas las marchas, se elaborará la característica correspondiente a los valores de las pendientes, que pueden superarse para determinadas velocidades de avance del vehículo automotor, utilizando diferentes marchas de la caja de velocidades.

En el caso en que el vehículo suba una pendiente, el balance de tracción será igual a

$$F_T = R_\psi + R_a + R_{ac}$$

Suponiendo que la velocidad de avance es constante ($V = \text{const.}$), y por lo tanto $F_{ac} = R_{ac} = 0$, la fuerza de tracción será igual a

$$F_T = R_{\psi} + R_a = R_f + R_a + R_p$$

Sin embargo, debido a que $R_f + R_a = F_i$, entonces

$$F_T = F_i + R_p \quad (16)$$

El valor de esra resistencia puede determinarse utilizando la siguiente ecuación

$$R_p = G \cdot \text{sen } \alpha \quad G \cdot \tan \alpha = G \frac{h}{100} \quad (17)$$

donde h - pendiente de la carretera, en %.

Para el caso en cuestión, o sea, para $V = \text{const.}$ la reserva de la fuerza de tracción se utilizará solamente para superar una pendiente. Por lo tanto

$$F'_T = F_T - F_i = F_p \quad (18)$$

Comparando las fórmulas (9) y (18) se observa que

$$F_p = F_{ac}$$

entonces
$$G \frac{h}{100} = G \frac{a}{g}$$

definitivamente, la pendiente

$$h = \frac{a}{g} \cdot 100 \quad \% \quad (19)$$

Basándose en los resultados obtenidos en los cálculos de los valores de las pendientes, efectuados para diferentes velocidades de avance y todas las marchas de la caja de velocidades, se construye un gráfico $h = f(V)$. Este

gráfico constituye una de las características que se utilizarán para evaluar las propiedades dinámicas del vehículo automotor.

El valor máximo de la fuerza de tracción $F_{Tm\acute{a}x}$ debe verificarse desde el punto de vista de la adherencia entre las ruedas motrices y la carretera. El deslizamiento no se producirá si se cumple la condición expresada por la siguiente desigualdad

$$F_{Tm\acute{a}x} \leq F_{adh} = G_N \cdot \mu \quad (20)$$

donde F_{adh} - fuerza de adherencia, en Kg,
 G_N - fuerza de reacción normal entre las ruedas motrices y la carretera, $G_N = G \cdot \cos \alpha$,
 μ - coeficiente de adherencia.

Con el objeto de verificar las condiciones de la adherencia entre las ruedas motrices y la carretera, es conveniente construir un gráfico $F_{Tm\acute{a}x} = f(\alpha)$ y $F_{adh} = f(\alpha)$, en base del cual será posible, tal como se indica en la figura 6, determinar el ángulo máximo admisible de la inclinación de la carretera.

INVESTIGACIONES PROPIAS

a) Datos característicos del automóvil

Peso total	- $G = 1370$ Kg.
Radio dinámico de la rueda	- $r_d = 0,287$ m.
Relaciones de transmisión:	
- puente motriz	- $i = 4,1$
- caja de velocidades	- $i_4 = 1; i_3 = 1,49$
	- $i_2 = 2,3; i_1 = 3,753$
Coefficiente de rendimiento	- $\eta_m = 0,93$; directa
	- $\eta_m = 0,88$; indir.
Momento de inercia de las ruedas	- $J_R = 0,36$ Kg.m.s
Momento de inercia del volante	- $J_v = 0,05$ Kg.m.s

b) Resultados del ensayo de deceleración

El ensayo comienza con una velocidad de avance $V_0 = 140$ Km/h, a partir de la cual el vehículo avanza solamente debido a su inercia. La prueba se realiza en una carretera horizontal, con marchas de la caja de velocidades desconectadas. La Tabla 1 y la figura 2 representan los resultados del ensayo.

TABLA 1.-RESULTADOS DEL ENSAYO DE DECELERACION.

ΔV_0	V_1	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
V_2		130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
Σt		3,6	7,7	12,3	17,6	23,7	30,9	39,2	49,2	61,0	75,0	91,5	110,8	132,5	156,3
t		3,6	4,1	4,6	5,3	6,1	7,2	8,4	9,9	11,8	14,0	16,5	19,3	21,7	23,8
a_0		0,78	0,69	0,60	0,53	0,45	0,39	0,33	0,29	0,24	0,20	0,17	0,15	0,13	0,11

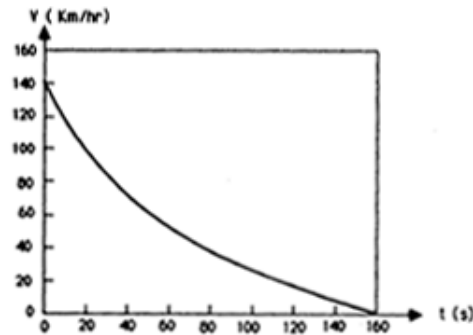


FIG.2.-GRAFICO DE DECELERACION

La deceleración

$$a_0 = \frac{\Delta V_0}{3,6 t} \quad \text{m/s}$$

donde $\Delta V_0 = 10$ km/h - intervalo de la velocidad de avance

t - tiempo correspondiente al intervalo en cuestión, en s.

c) Resultados del ensayo de aceleración

Durante la realización de este ensayo el vehículo avanza con la mariposa del carburador abierta por completo, y la marcha directa conectada, partiendo de una velocidad $V_0 = 20$ km/h hasta la velocidad máxima. Los resultados del ensayo están representados en la tabla 2 y la figura 3. La aceleración media corresponde a cada intervalo de velocidad de avance $\Delta V = 10$ Km/h, es igual a

$$a = \frac{\Delta V}{3,6 \cdot t} \quad \text{m/s}$$

TABLA 2.-RESULTADOS DEL ENSAYO DE ACCELERACION.

ΔV_0	V_1	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
V_2		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
Σt		5,5	9,9	13,8	17,5	21,2	25,0	29,0	33,3	38,0	43,7	51,0	61,7	83,1
t		3,5	4,4	3,9	3,7	3,7	3,8	4,0	4,3	4,7	5,7	7,3	10,7	21,4
n		0,51	0,63	0,71	0,76	0,76	0,74	0,70	0,65	0,59	0,49	0,38	0,26	0,13

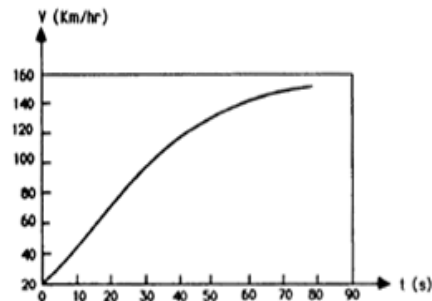


FIG.3.-GRÁFICO DE ACCELERACION

d) Elaboración de la característica de tracción

- Coeficiente de participación de las masas giratorias durante el movimiento del vehículo a la inercia.

$$\delta_0 = 1 + \frac{J_R}{G \cdot r_d^2} \quad g = 1 + \frac{0,36}{1370 \cdot 0,287^2} \cdot 9,81 = 1,031$$

- Fuerza de inercia

$$F_i = R_f + R_a = \frac{G}{g} \cdot \delta_0 \cdot a_0 = \frac{1370}{9,81} \cdot 1,031 \cdot a_0 = 143,983 a_0$$

- Coeficiente de participación de las masas giratorias para el caso en que el motor acciona las ruedas del vehículo.

$$\delta_4 = \delta_0 + \frac{J_v \cdot i_0^2 \cdot i_{cv}^2 \cdot \eta_m}{G \cdot r_d^2} \quad g = 1,037 + \frac{0,05 \cdot 4,1^2 \cdot 0,93}{1370 \cdot 0,287^2} \cdot 9,81 = 1,099$$

- Fuerza de aceleración

$$F_{ac} = R_{ac} = \frac{G}{g} \cdot \delta_4 \cdot a = \frac{1370}{9,81} \cdot 1,099 a = 153,479 a$$

- Fuerza de tracción para la marcha directa

$$F_{T4} = F_i + F_{ac}$$

- Fuerza de tracción para la tercera marcha

$$F_{T3} = F_{T4} \cdot \eta_m \cdot i_3 = F_{T4} \cdot \frac{0,88}{0,93} \cdot 1,49 = 1,4099 F_{T4}$$

- Fuerza de tracción para la segunda marcha

$$F_{T2} = F_{t4} \cdot \eta_m \cdot i_2 = F_{t4} \cdot \frac{0,88}{0,93} \cdot 2,30 = 2,1763 F_{T4}$$

- Fuerza de tracción para la primera marcha

$$F_{T1} = F_{T4} \cdot \eta_m \cdot i_1 = F_{T4} \cdot \frac{0,88}{0,93} \cdot 3,753 = 3,5512 F_{T4}$$

- Velocidades de avance para la tercera, segunda y primera marcha respectivamente.

$$\begin{aligned} v_3 &= v_4 \frac{i_4}{i_3} = \frac{1}{1,49} v_4 = 0,6711 v_4 \\ v_2 &= v_4 \frac{i_4}{i_2} = \frac{1}{2,30} v_4 = 0,4348 v_4 \\ v_1 &= v_4 \frac{i_4}{i_1} = \frac{1}{3,753} v_4 = 0,2665 v_4 \end{aligned}$$

Los resultados de los cálculos de las fuerzas de tracción y las velocidades de avance aparecen en la tabla 3. En base a estos resultados se construye el diagrama de la característica de tracción del vehículo, representado en la figura 4.

TABLA 3.-RESULTADOS DE LOS CALCULOS NECESARIOS PARA CONSTRUIR LA CARACTERISTICA DE TRACCION Y EL GRAFICO DE LAS PENDIENTES A SUPERAR.

MARCHAS													
4					3			2		1			
V_4	F_1	F_{Rc}	F_{T4}	h_4	V_3	F_{T3}	h_3	V_2	F_{T2}	h_2	V_1	F_{T1}	h_1
20	18,5	77,5	96,0	5,7	13,4	136,0	8,1	8,7	210,0	12,4	5,3	342,0	20,3
30	20,9	96,1	117,0	7,0	20,1	166,0	9,9	13,0	256,0	15,3	8,0	417,0	24,9
40	24,4	108,6	133,0	7,9	26,9	189,0	11,2	17,4	291,0	17,2	10,7	474,0	28,1
50	28,8	116,2	145,0	8,5	33,6	206,0	12,0	21,8	317,0	18,5	13,3	517,0	30,2
60	34,2	116,8	151,0	8,5	40,3	214,0	11,9	26,1	330,0	18,5	16,0	538,0	30,2
70	40,6	113,4	154,0	8,3	47,0	219,0	11,7	30,4	337,0	18,1	18,7	549,0	29,5
80	48,0	108,0	156,0	7,9	53,7	222,0	11,1	34,8	341,0	17,2	21,3	556,0	28,1
90	56,3	99,7	156,0	7,3	60,4	222,0	10,3	39,1	341,0	15,9	23,9	556,0	25,9
100	66,0	89,8	155,0	6,6	67,1	220,0	9,3	43,5	339,0	14,4	16,7	553,0	23,1
110	76,0	75,0	151,0	5,5	73,8	214,0	7,8	47,8	330,0	12,0	29,3	538,0	19,5
120	87,4	58,6	146,0	4,3	80,3	207,0	6,1	52,2	319,0	9,4	32,0	521,0	15,3
130	99,6	40,4	140,0	3,0	87,3	199,0	4,2	56,5	306,0	6,5	34,6	499,0	10,7
140	113,0	20,0	133,0	1,5	94,0	189,0	2,1	60,9	291,0	3,3	37,4	474,0	5,4

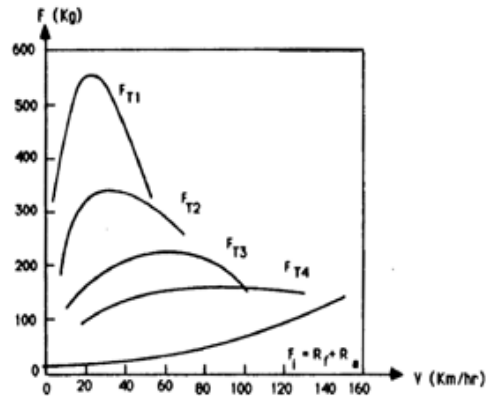


FIG. 4.-CARACTERISTICA DE TRACCION

- e) Determinación de los valores máximos de la pendiente de la carretera.
El valor de la pendiente para la marcha directa

$$F_p = F_{ac}, \text{ entonces } F_{ac} = \frac{h_4}{100} \cdot G$$

por lo tanto

$$h_4 = \frac{100}{G} \cdot F_{ac} = \frac{100}{1370} \cdot F_{ac} = 0,073 F_{ac}$$

Los valores de la pendiente para las demás marchas

$$h_3 = 1,4099 h_4$$

$$h_2 = 2,1763 h_4$$

$$h_1 = 3,5512 h_4$$

Los resultados se representan en la figura 5.

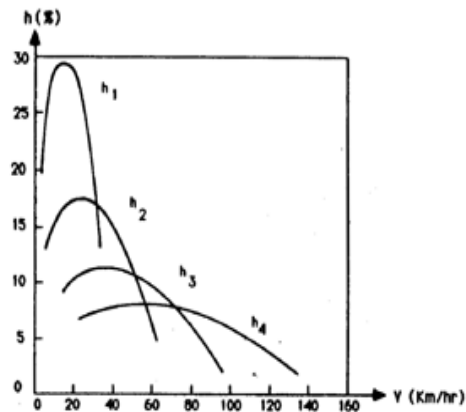


FIG.5.-GRÁFICO DE LAS PENDIENTES MÁXIMAS, POSIBLES PARA SUPERAR POR EL VEHÍCULO A DIFERENTES MARCHAS, EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE AVANCE

f) Verificación de la adherencia

Valor máximo de la fuerza de tracción al superar el vehículo una pendiente.

$$F_{Tmáx} = R_p = G \cdot \text{sen} \alpha = 1370 \text{ sen} \alpha$$

Fuerza de adherencia entre las ruedas motrices y la carretera, en las mismas condiciones.

$$F_{adh} = G_N \cdot \mu \cdot \cos \alpha = 1370 \cdot 0,5 \cdot \cos \alpha = 685 \cos \alpha$$

Los resultados están representados en la tabla 4 y la figura 6.

En el gráfico de la figura 6 se observa que el ángulo máximo admisible de la pendiente es igual a $\alpha_0 = 26^\circ$ aproximadamente. Esto significa, que para todos los ángulos $\alpha < \alpha_0$ se cumple la condición de que $F_{Tm\acute{a}x} < F_{adh}$.

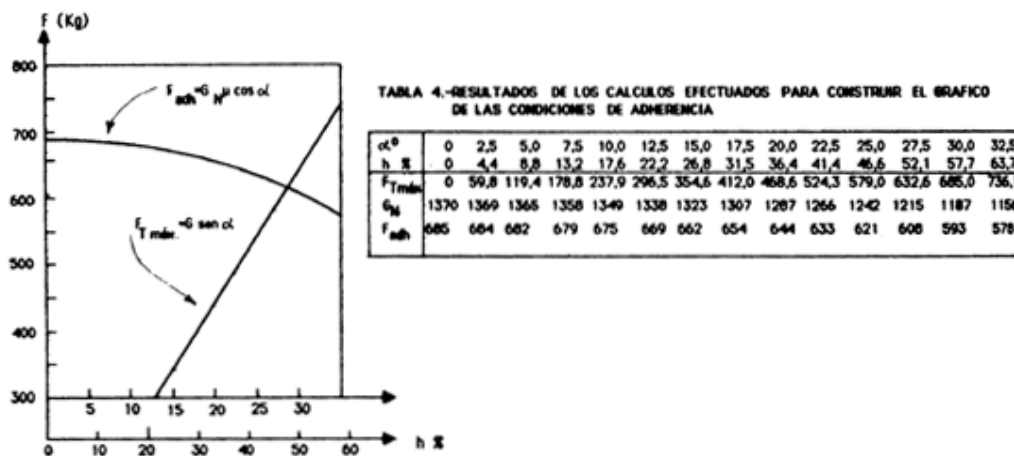


FIG.6.-GRAFICO PARA DETERMINAR EL ANGULO MAXIMO DE INCLINACION DE LA CARRETERA.

CONCLUSIONES

El método propuesto en esta publicación permite evaluar las propiedades dinámicas de los vehículos automotores en base a los resultados de experimentos realizados en las condiciones reales, o sea, directamente en la carretera, lo que garantiza una elevada exactitud y confiabilidad.

Para efectuar los ensayos no se requieren equipos de medición especiales, condición imprescindible al emplear otros métodos. La quinta rueda utilizada en la realización de las mediciones en la carretera, se considera equipo de rutina.

REFERENCIAS

- <1> PRZYBYLSKI, J: Introducción a la teoría de vehículos automotores. Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, Maracaibo (1979)