

Construcción de aeropuertos

FRANCISCO LOPEZ PEDRAZA
Ingeniero Aeronáutico.

Cálculo de pavimentos.

(Continuación.)

Para aclarar los conceptos dados en el artículo anterior, estudiamos el siguiente ejemplo:

Características del avión.—Carga estática por rueda = 22,500 kgs.; presión de inflado de neumáticos = 5,25 kg/cm².

Rueda sencilla de medida, 21,00 × 23.

Rueda sencilla de sección, $S = 51,5$ cms.

Superficie de repartición de la carga estática, fórmulas (2) y (3). (REVISTA núm. 75.)

$$L_1 = \sqrt{\frac{22.500}{1,1 \cdot 5,25 \cdot \pi \cdot 2,35}} = 23 \text{ cms.}$$

$$L_2 = 2,35 \times 23 = 53;$$

presión unitaria sobre el pavimento = $1,1 \times 5,25 = 5,80$ kg/cm².

Superficie de repartición de la carga con impacto.—Factor de impacto = 2; carga de impacto por rueda = $2 \times 22,500 = 45.000$ kgs.

$$L'_1 = \sqrt{\frac{45.000}{1,66 \cdot 5,25 \cdot \pi \cdot 2,35}} = 26,5 \text{ cms.}$$

Como es mayor que la mitad de la sección $\frac{51,5}{2}$, tomamos

$$L'_1 = \frac{51,5}{2} = 25,75 \text{ cms.,}$$

y entonces

$$L'_2 = \frac{45.000}{1,66 \times 25,75 \times 5,25} = 64 \text{ cms.}$$

Presión unitaria sobre el pavimento = $1,66 \times 5,25 = 8,7$ kgs/cm².

Area de la superficie de contacto = $\frac{45.000}{8,7} = 5.150$ cm².

Diámetro del círculo equivalente, 80 cms.

Dimensiones de la superficie rectangular equivalente, $51,5 \times 100$ cms.

Compresiones máximas que produce la carga sobre el suelo.—De la fórmula (8). (REVISTA número 73.)

$$\sigma_2 = p \left[1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{a}{z}\right)^2} \right] \frac{3}{2},$$

en la que $p = 8,70$ kgs/cm², y $a = \frac{80}{2} = 40$ centímetros (radio del círculo equivalente), se obtienen las presiones máximas a diferentes profundidades, suponiendo la carga distribuida sobre área circular.

Estas presiones están obtenidas en el cuadro siguiente y llevadas a la figura 10.

Compresiones medias que produce la rueda sobre el suelo.—Conocidas las presiones máxi-

mas σ_z y las relaciones $\frac{\sigma_z}{\sigma_m}$, que se obtienen de la figura 6, se conocerá σ_m , cuyos valores están en el cuadro siguiente y también se han llevado a la figura 10.

Cuadro de valores de

Profundidad z en cms.	$\sigma_z = 8,7 \left(1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{40}{z}\right)^2} \right)^3$ Kgs/cm ²	$\frac{\sigma_z}{\sigma_m}$	σ_m Kgs/cm ²
12	7,54	1,19	6,32
25	5,35	1,34	3,99
30	4,45	1,37	3,24
40	3,05	1,40	2,18
50	2,14	1,45	1,48

Características del suelo. — Cohesión. — Los análisis de muestras sacadas del terreno nos han

llevado al conocimiento de las siguientes cohesiones:

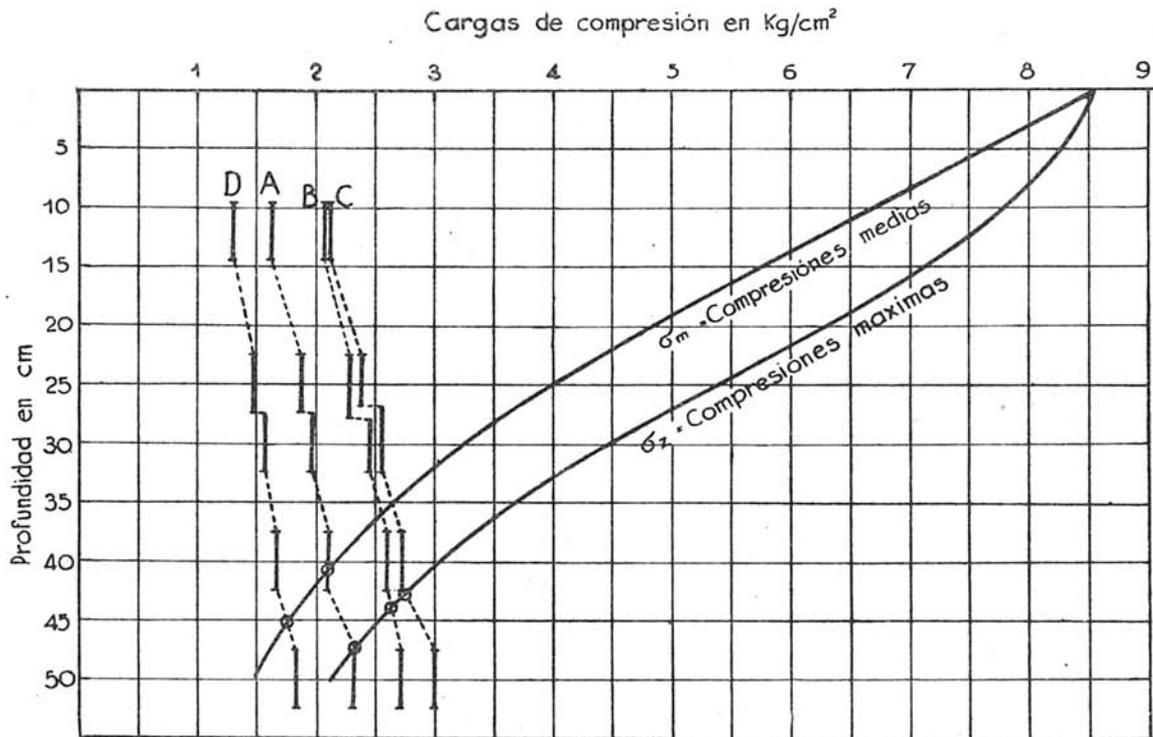
Profundidad media de la muestra cms.	Cohesión obtenida Kgs/m ²
12	5.400
25	6.000
30	6.400
50	7.500

Angulo de rozamiento. — El ángulo de rozamiento medido en las muestras es constante:

$$\varphi = 15^\circ$$

Carga de rotura por esfuerzo cortante del terreno. — Se obtiene por la fórmula:

$$S = c + \sigma \operatorname{tag} \varphi,$$



LEYENDA.

- A - Línea de cargas de rotura de BOUSSINESQ $q_c = ns$
- B " " " de PRANDTL 11-9
- C " " " de TERZAGHI con carga circular 15-9
- D " " " id con carga rectangular 13-9

FIG. 10

siendo σ en cada punto la sobrecarga de tierras $\sigma = \gamma z$.

$\gamma = 1.600 \text{ kg/m}^3$, $\text{tag. } 15^\circ = 0,268$.

Cargas de rotura a esfuerzo cortante.

Profundidad z en cms.	Cohesión c en kgs/m ²	$\sigma = \gamma z$ Kgs/m ²	$\sigma \text{ tag } \varphi$ Kgs/m ²	$S = c + \sigma \text{ tag } \varphi$ Kgs/m ²
12	5.400	192	52	6.452
25	6.000	400	108	6.108
30	6.400	480	130	6.530
50	6.800	640	173	6.973
	7.500	800	216	7.716

Espesor necesario conservando las presiones máximas en la superficie del cemento por debajo la carga de rotura de Boussinesq.—Multiplicando los valores de S por π y reduciéndolos a kgs/cm² se obtiene:

Profundidad z cms.	q_c Kgs/cm ²
12	1,63
25	1,87
30	1,96
40	2,10
50	2,32

Trazando la línea A de cargas de rotura q_c (figura 10), se encuentra que corta a la línea de presiones máximas, a una profundidad de 47,5 centímetros, que será el espesor requerido con este criterio de cálculo.

Profundidad z en cms.	c Kgs/m ²	c' Kgs/m ²	$108(c + c')$ Kgs/m ²	$p = 1.600 \times z$ Kgs/m ²	$3,9 p$ Kgs/m ²	q_c Kgs/m ²	$\frac{q_c}{3}$ Kgs/m ²
12	5.400	210	5.610	192	750	61.250	2.04
25	6.000		6.210	400	1.560	68.560	2.29
30	6.400		6.610	480	1.870	73.230	2.44
40	6.800		7.010	640	12.500	78.100	2,60
50	7.500		7.710	800	3.120	88.120	2,71

Trazada la curva B de los valores q_c en la figura 10, corta a la de presiones máximas a 44 centímetros de profundidad, que será el espesor requerido por este medio.

Espesor necesario por la fórmula de Terzaghi para repartición sobre superficie circular.—Empleando la fórmula 15 del artículo "Resistencia de los suelos" para terrenos deformables

Espesor necesario conservando las presiones medias en el terreno por debajo de la carga de rotura de Boussinesq.— $q_c = \pi s$.

La línea A de los valores q_c corta a la de presiones medias a una profundidad de 40,5 centímetros, que será el espesor requerido.

Espesor necesario empleando la fórmula de Prandtl.—Aplicando la fórmula de Prandtl (11). (REVISTA núm. 73.)

$$q_c = \frac{c + c'}{\text{tag } \varphi} \left(\frac{1 + \text{sen } \varphi}{1 - \text{sen } \varphi} e^{\pi \text{ tag } \varphi} \right) + p \frac{1 + \text{sen } \varphi}{1 - \text{sen } \varphi} e^{\pi \text{ tag } \varphi}$$

$\frac{1 + \text{sen } 15^\circ}{1 - \text{sen } 15^\circ} e^{\pi \text{ tag } 15^\circ} = 3,9$, $\text{tag } 15^\circ = 0,268$,

$q_c = 10,8(c + c') + 3,9 p$,

$p = \gamma z = 1.600 z$,

$C' = h \times 1.600 \times \text{tag } 15^\circ$,

$h = \frac{\text{área de cuñas y sectores}}{\text{longitud } GE}$

(figura 19, del artículo "Resistencia de los suelos"). El área de cuñas y sectores medidos con un planímetro resulta = 6250 cm².

$GE = 150 \text{ cms.}$,

$h = 0,485 \text{ mts.}$,

$c' = 0,485 \times 1.600 \times \text{tag } 15^\circ = 210 \text{ kgs/m}^2$;

y, por tanto,

$q_c = 1,3 C N'_c + p N'_p + 0,6 a N'_\gamma$,

$a = 0,40 \text{ mts.}$

Para $\varphi = 15^\circ$ se obtiene en la figura 25. (REVISTA núm. 73.)

$N'_c = q$, $N'_p = 2,7$, $N'_\gamma = 0,5$,

los valores de p y de c son los mismos que en las anteriores: luego tendremos

Profundidad <i>z</i> en cms.	<i>c</i> Kgs/m ²	1,3 <i>c N'</i> _{<i>c</i>} Kgs/m ²	<i>ρ = γ z</i> Kgs/m ²	<i>ρ N'</i> _{<i>ρ</i>} Kgs/m ²	0,60 × 0,40 × <i>N'</i> _{<i>γ</i>} Kgs/m ²	<i>q_c</i> Kgs/cm ²	$\frac{q_c}{3}$ Kgs/cm ²
12	5.400	63.000	192	520	192	63.712	2,12
25	6.000	70.000	400	1.080		71.272	2,375
30	6.400	75.000	480	1.300		76.492	2,55
40	6.800	79.600	640	1.730		81.520	2,72
50	7.500	87.700	800	2.160		90.052	3,00

Trazando esta curva *C* en la figura 10, se ve que corta a la de presiones máximas a una profundidad de 42,5 cms., que será el espesor requerido con este criterio.

Espesor necesario por la fórmula de Terzaghi para repartición sobre área rectangular.—Utilizando la fórmula de Terzaghi

$$q_c = \frac{2c}{\text{tag } \beta \text{ sen}^2 \beta} + \frac{P_1}{\text{tag}^4 \beta} + b \gamma \frac{1 - \text{tag}^4 \beta}{2 \text{tag}^6 \beta},$$

siendo

$$\beta = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}, b = \frac{51,5}{2} = 25,75 \text{ cms.}, \gamma = 1.600 \text{ kgs.}$$

para $\varphi = 15^\circ$, obtenemos en las curvas de la figura 26 del artículo "Resistencia de los suelos":

$$\frac{2}{\text{tag } \beta \text{ sen}^2 \beta} = 7 \quad \frac{1}{\text{tag}^4 \beta} = 3 \quad \frac{1 + \text{tag}^4 \beta}{2 \text{tag}^6 \beta} = 1,3.$$

Profundidad <i>z</i> en cms.	<i>c</i> Kgs/m ²	7 <i>C</i> Kgs/m ²	<i>ρ I</i> Kgs/m ²	3 <i>ρ I</i> Kgs/m ²	0,2575 × 1.600 × 1,3 Kgs/m ²	<i>q_c</i> Kgs/m ²	$\frac{q_c}{3}$ Kgs/cm ²
12	5.400	37.700	192	570	565	38.875	1,29
25	6.000	42.000	400	1.200		43.765	1,46
30	6.400	45.000	480	1.440		47.005	1,58
40	6.800	47.500	640	1.920		49.985	1,66
50	7.500	52.200	800	2.400		55.165	1,84

Trazada la curva *D* en la figura 10, corta a la de presiones medias, a la profundidad de 45 cms., que será el espesor requerido con este criterio.

Espesor necesario por la fórmula de Golbeck. Aplicando la fórmula de Golbeck, con carga distribuida en la elipse,

$$e = -\frac{L'_1 + L'_2}{2} + \sqrt{\frac{K P}{\pi q_c} - L'_1 L'_2 + \left(\frac{L'_1 + L'_2}{2}\right)^2},$$

siendo

$$L'_1 = 25,75 \text{ cms. } L'_2 = 64 \text{ cms. } \therefore P = 45.000 \text{ kgs. } \gamma K = 2.$$

Suponiendo que la carga de rotura se ha obtenido directamente, como se explicó en artículos anteriores, y nos da un resultado de $q_c = 3$ kilogramos/cm².

$$e = 44,8 \text{ cms.}$$

ANÁLISIS DE ROTURAS.—Aunque los análisis de los terrenos nos dan un conocimiento bastante completo de ellos, conviene, mientras se efectúan las obras de tierras, cerciorarse de que, debido a la heterogeneidad de los suelos, no existen puntos en los cuales fallen las hipótesis establecidas. Para esto se deben construir las pistas para camiones y demás vehículos de acarreo de materiales, con espesores de pavimento lo más reducidos posible, dentro de que cumplan su cometido en las obras, y se observan los puntos en donde se han producido baches por rotura del pavimento. Taladrando éste, se cogen muestras del terreno a diferentes profundidades, tanto debajo del bache como de los alrededores, comprobando la resistencia al esfuerzo cortante del mismo, y dibujando las curvas de las cargas q_c de rotura, que deberán estar de acuerdo con las hipótesis establecidas en el cálculo de espesores necesarios. Si no ocurre así, se rectifican los espesores de forma conveniente, ya que las características del suelo a tomar como

base de cálculos tienen que ser las correspondientes a los puntos de menor resistencia.

MÉTODOS EMPÍRICOS DE CÁLCULO DE ESPESORES DE FIRMES FLEXIBLES.—Muchos ensayos se han llevado a cabo con objeto de conocer los efectos producidos sobre las pistas por las ruedas del avión, siendo los más interesantes los efectuados por los Ingenieros del Ejército norteamericano sobre los aeropuertos de Stockton, Eghin, Barksdale y Marietta, que constituyen por sí solos un método empírico de cálculo.

En estos ensayos se prodigaron los análisis de terrenos, tanto en laboratorios como en el campo, pudiéndose decir que las medidas que dieron resultados más interesantes, y de las que se sacaron consecuencias concretas, fueron las siguientes:

- 1.º Análisis de contenido de aguas de las muestras.
- 2.º Conocimiento del CBR de los terrenos, cimientos y firmes.
- 3.º Medida de las deformaciones de la base del cimiento.
- 4.º Medida de las compresiones internas del terreno.

Los análisis del contenido de agua y del CBR se hicieron en estos aeropuertos de la manera descrita en los capítulos anteriores.

Las deformaciones, tanto en la base del cimiento como en otros puntos, se midieron con el aparato cuyo esquema se ve en la figura 11,

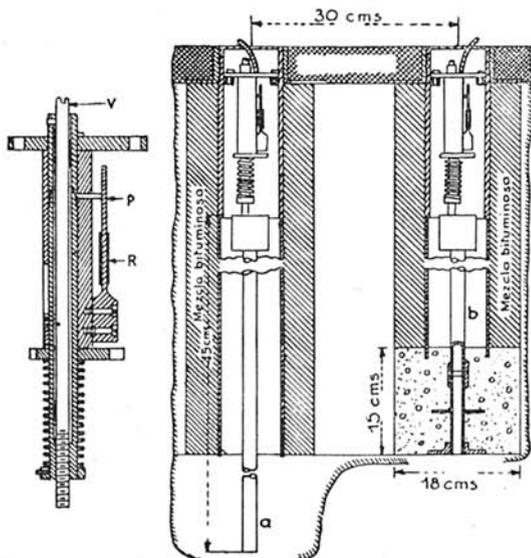


FIG. 11

cuya parte más importante consiste en una vaina *V*, que se desliza hacia arriba y hacia abajo cuando la superficie del pavimento se deforma bajo la acción de las cargas. Los movimientos de descenso se transmiten por medio de una palanca *P* a una resistencia eléctrica *R*, la cual, comunicando con un oscilógrafo graduado, nos da a conocer la deformación. Un vástago *a* se une fijamente al terreno, a una profundidad de 4,5 metros, y otro vástago *b* se fija a un dado de hormigón en contacto con la base del cimiento. La diferencia entre las lecturas de los dos aparatos nos da a conocer la deformación de la base del cimiento.

Para la medición de presiones se usaron células manométricas de 30 cms. de diámetro y 2,5 cms. de espesor, colocadas a diferentes profundidades, las cuales, por medio de una transmisión hidráulica, hacen deformarse a unos diafragmas de acero, los cuales varían una resistencia eléctrica, acusando estas variaciones un oscilógrafo. El oscilógrafo, debidamente tarado, da a conocer los esfuerzos de compresión en la célula manométrica.

Durante los ensayos se utilizaron aviones "B-24", de rueda sencilla, y cargas por rueda de 9.100 kgs., 11.400 kgs. y 13.600 kgs., y aviones "B-29", de rueda doble y cargas por rueda de 18.200 kgs., 22.800 kgs. y 27.200, los cuales se hicieron actuar sobre pavimentos de diferentes espesores y clases, sometiendo éstos tanto a la acción de cargas estáticas producidas por los aviones parados, con motores parados y en marcha, a 1.000, 1.500 y 2.400 r. p. m., con objeto de investigar el efecto de las vibraciones, como a la acción de cargas móviles, producidas por los aviones rodando a diferentes velocidades y girando sobre una rueda.

Las medidas de las deformaciones en el cimiento, efectuadas en el aeropuerto de Marietta, dieron a conocer los gráficos indicados en las figuras 12 y 13; la primera para aviones parados, con motores a 1.000 r. p. m.; la segunda para carga móvil, a ocho kilómetros por hora. En ellas se observa que el efecto de la carga estática, con las vibraciones producidas por los motores, es de un 10 por 100 mayor que el de la carga móvil.

Análogos ensayos se efectuaron en los aeropuertos de Barksdale y Stockton, con velocidades 11 kilómetros hora y 16 kilómetros hora, respectivamente, dando por resultado que el efecto de la carga estática con vibraciones era

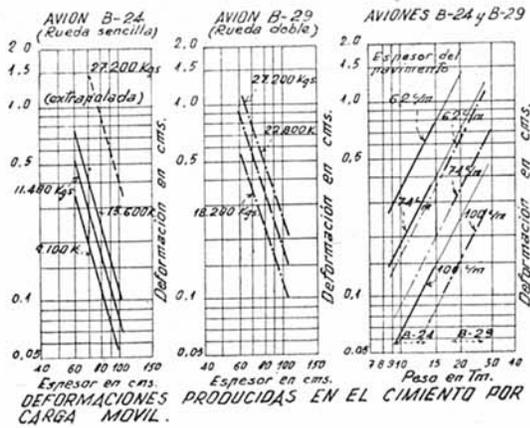


FIG. 12

un 30 por 100 y un 35 por 100 mayor que el de la carga móvil, lo cual demuestra que las deformaciones disminuyen cuando aumenta la velocidad del móvil, produciendo las mayores deformaciones la carga estática del avión parado con motores en marcha. Por esta razón en los proyectos definitivos se dieron a las zonas de estacionamiento, pistas de rodadura y cabezas de pistas espesores un 25 por 100 mayores que en las pistas de despegue (en éstas no se tuvieron en cuenta los efectos de impacto).

De las observaciones también se deduce que los aviones parados, con motor en marcha, producen mayores deformaciones que cuando los motores están en reposo, pero al mismo tiempo se observó que el efecto de los motores con 1,500 y 2,400 r. p. m. no eran mayores que cuando los motores estaban a 1,000 r. p. m.

También se observa en los gráficos que cuando el espesor del pavimento se reduce, aunque

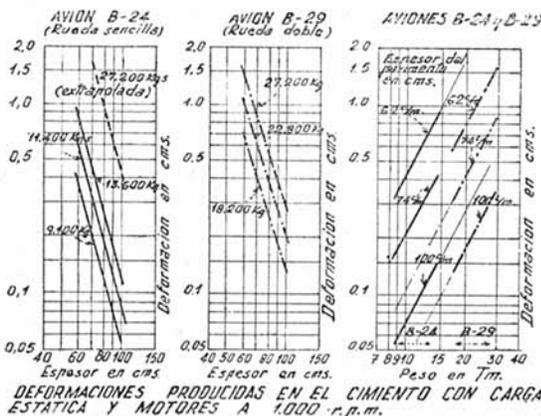


FIG. 13

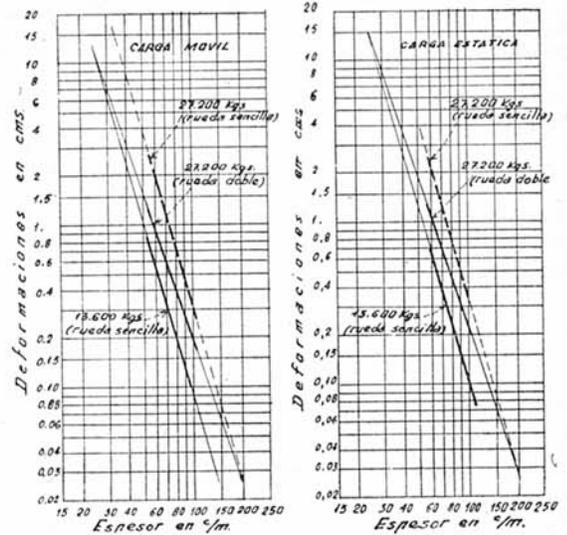
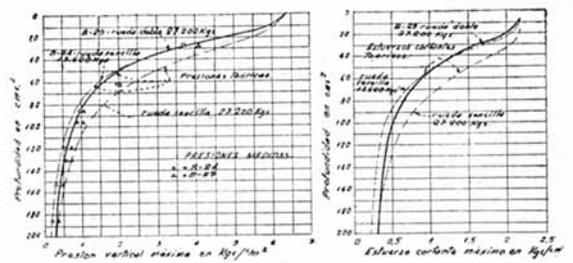


FIG. 14

sea en muy poca cantidad, las deformaciones aumentan enormemente.

Superponiendo en el mismo gráfico (fig. 14) los efectos producidos por ruedas sencillas y dobles, se observa que la deformación producida por la rueda doble, de 27,200 kgs. de carga, es igual a la producida por la rueda sencilla de mitad de carga, a profundidades de 25 centímetros, y que, en cambio, se aproxima a la deformación producida por la rueda sencilla de la misma carga a profundidades de 1,80 metros; es decir, que para espesores menores de 25 cms., el caso más desfavorable es el de rueda sencilla con carga mitad, y para espesores mayores el de rueda doble, estando este caso comprendido entre el de rueda sencilla de mitad de carga y rueda sencilla de la misma carga.

Los valores de las presiones y esfuerzos cortantes obtenidos teóricamente para diferentes profundidades están trazados en las figuras 15 y 16, viéndose también en la primera los resul-



FIGS. 15 y 16

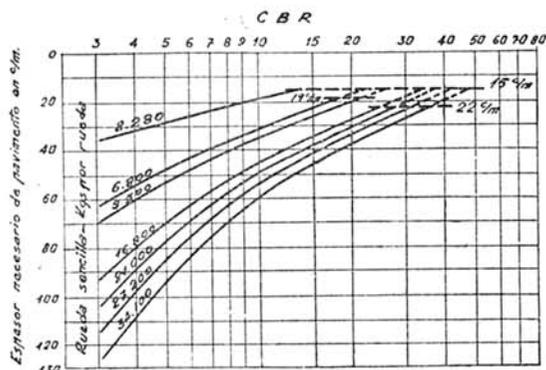


Fig. 17

tados obtenidos de las mediciones directas, los cuales puede decirse que están de acuerdo con los calculados teóricamente. En estas curvas se observa que los esfuerzos producidos por la doble rueda de 27.200 kgs., hasta 40 cms. de profundidad, son prácticamente iguales a los producidos por la rueda sencilla de mitad de carga, y a partir de esta profundidad los esfuerzos de la rueda doble son mayores, lo cual corrobora lo visto en la medición de las deformaciones.

Como resultado de estos ensayos, y teniendo en cuenta las deformaciones admisibles en los pavimentos flexibles y las presiones a que pueden estar sometidos los cimientos, han sido trazadas por los Ingenieros militares de Estados Unidos una serie de curvas (fig. 17) para el caso de pistas de despegue con aviones con rueda sencilla, las cuales dan el espesor necesario del pavimento, en función de la carga por rueda y del número C B R del cemento. Estas curvas están limitadas por espesores de 15, 19 y 22

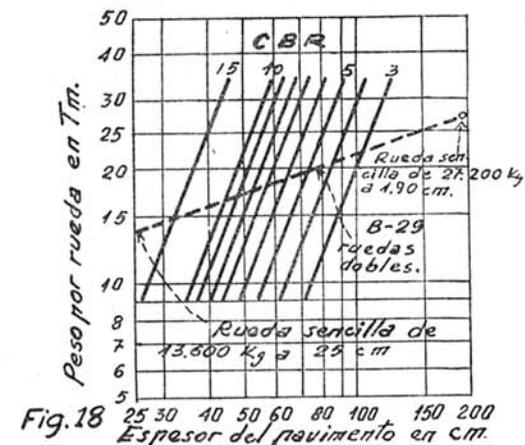


Fig. 18
ESPEJOR NECESARIO PARA EL B-29

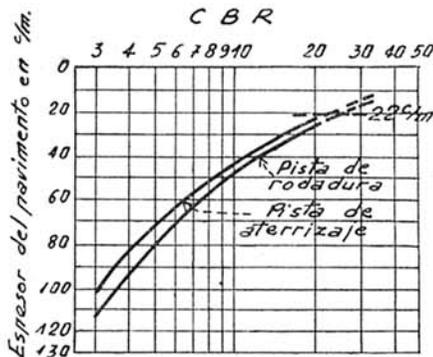


Fig. 19 ESPEJOR NECESARIO PARA 27.200 Kgs. EN RUEDA DOBLE.

centímetros de pavimentos, cifras que se consideran mínimas para mantener una buena superficie de rodaje para grandes aviones, aun en casos de buenos terrenos.

Para el caso de rueda doble, puede aplicarse un procedimiento análogo al empleado en el aeropuerto de Marietta con el avión "B-29". Se llevaron al gráfico (fig. 18) las líneas correspondientes a los diferentes números C B R, en función de las cargas por rueda y de los espesores del pavimento, los cuales se sacaron de la figura 17.

Tomando como base los datos obtenidos en el estudio de las deformaciones, de que a 25 centímetros de profundidad la deformación producida por la rueda doble del "B-29" era igual a la originada por la rueda sencilla de 13.600 kilogramos de carga, y de que a 1.90 metros de profundidad la deformación era igual a la producida por el avión de rueda sencilla de 27.200 kilogramos de carga por rueda, y llevando estos valores al gráfico se unen con una recta, que nos da en los puntos de intersección con las líneas C B R del terreno los espesores necesarios.

La figura 19 indica estos espesores en las pistas de despegue para el avión "B-29", los cuales están sacados de la figura 18, indicándose también los espesores de las pistas de rodadura y estacionamiento, que son, aproximadamente, un 25 por 100 mayores que los de las pistas de despegue.

La Civil Aeronautics Administration ha dado también a conocer, como resultado de sus experiencias, un método empírico de cálculo, de muy fácil aplicación.

En este método se parte de la clasificación de suelos adoptada por la C. A. A., del E-I

al E-10, \odot del número C B R, que depende de la clase de suelos, con lo cual no hace falta conocer ni la cohesión ni el ángulo de rozamiento, calculando el espesor de la superficie de rodadura del firme y del cimiento en función de las características del suelo. Se tiene en cuenta, además del tipo de pavimento (*F*, flexible, y *R*, rígido), la calidad del drenaje establecido en el terreno y la acción de las heladas, ya que un suelo de mala calidad puede ser mucho más estable que otro mejor si sus condiciones no son alteradas. Para ello se introduce una clasificación auxiliar, según se ve en la tabla III.

En ella se observa, por ejemplo, que un

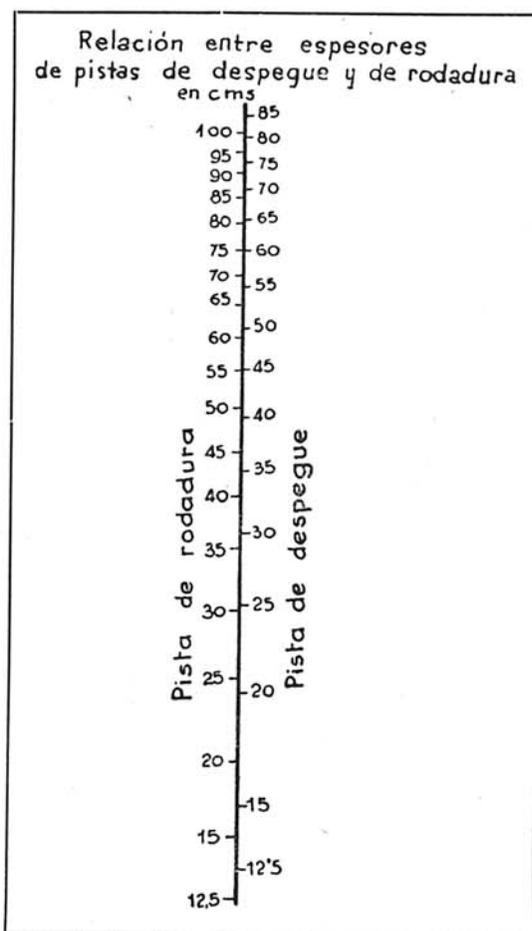


FIG. 23

suelo E-4, con un buen drenaje y no estando sujeto a heladas, se clasifica en F_1 cuando está bajo un firme flexible, y su comportamiento es mejor que un suelo E-2 cuando no tiene drenaje y está sometido a heladas, que se clasifica en F_2 .

Con esta clasificación, por los gráficos de las figuras 20, 21 y 22 se hallan los espesores necesarios de la capa de cimentación, del firme y de la superficie de rodadura para los tipos corrientes de pavimentos flexibles.

También por la C. A. A. ha sido dado el ábaco (figura 23), en el cual se dan los espesores de las pistas de rodadura, conociendo el espesor de las pistas de vuelo.

T A B L A I I I

Comportamiento de suelos según el drenaje.

Clase de suelo Número C B R		No expuesto a heladas		Expuesto a heladas		No expuesto a heladas		Expuesto a heladas	
		Buen drenaje		Buen drenaje		Mal drenaje		Mal drenaje	
E-1	> 20	F_a	R_{1a}	F_a	R_{2a}	F_a	R_{1a}	F_a	R_{2a}
E-2	> 20	F_a	R_{1a}	F_a	R_{2a}	F_1	R_{1a}	F_2	R_{2a}
E-3	> 18	F_a	R_{1a}	F_1	R_{2a}	F_2	R_{2a}	F_3	R
E-4	18 a 40	F_1	R_{1a}	F_2	R_{2b}	F_3	R_{2b}	F_4	R
E-5	9 a 20	F_2	R_{1a}	F_3	R_{2b}	F_4	R_{2b}	F_6	R
E-6	6 a 12	F_3	R_{1b}	F_4	R_{2b}	F_6	R_{2c}	F_7	R
E-7	4 a 8	F_4	R_{1b}	F_6	R_{2b}	F_7	R_{2c}	F_8	R
E-8	3 a 5	F_5	R_{2b}	F_7	R_{2c}	F_8	R_{2d}	F_9	R
E-9	2 a 4	F_6	R_{2b}	F_8	R_{2c}	F_9	R_{2d}	F_{10}	R
E-10	1 a 3	F_8	R_{2c}	F_9	R_{2d}	F_{10}	R_{2d}	F_{10}	R

Peso total del avión en toneladas

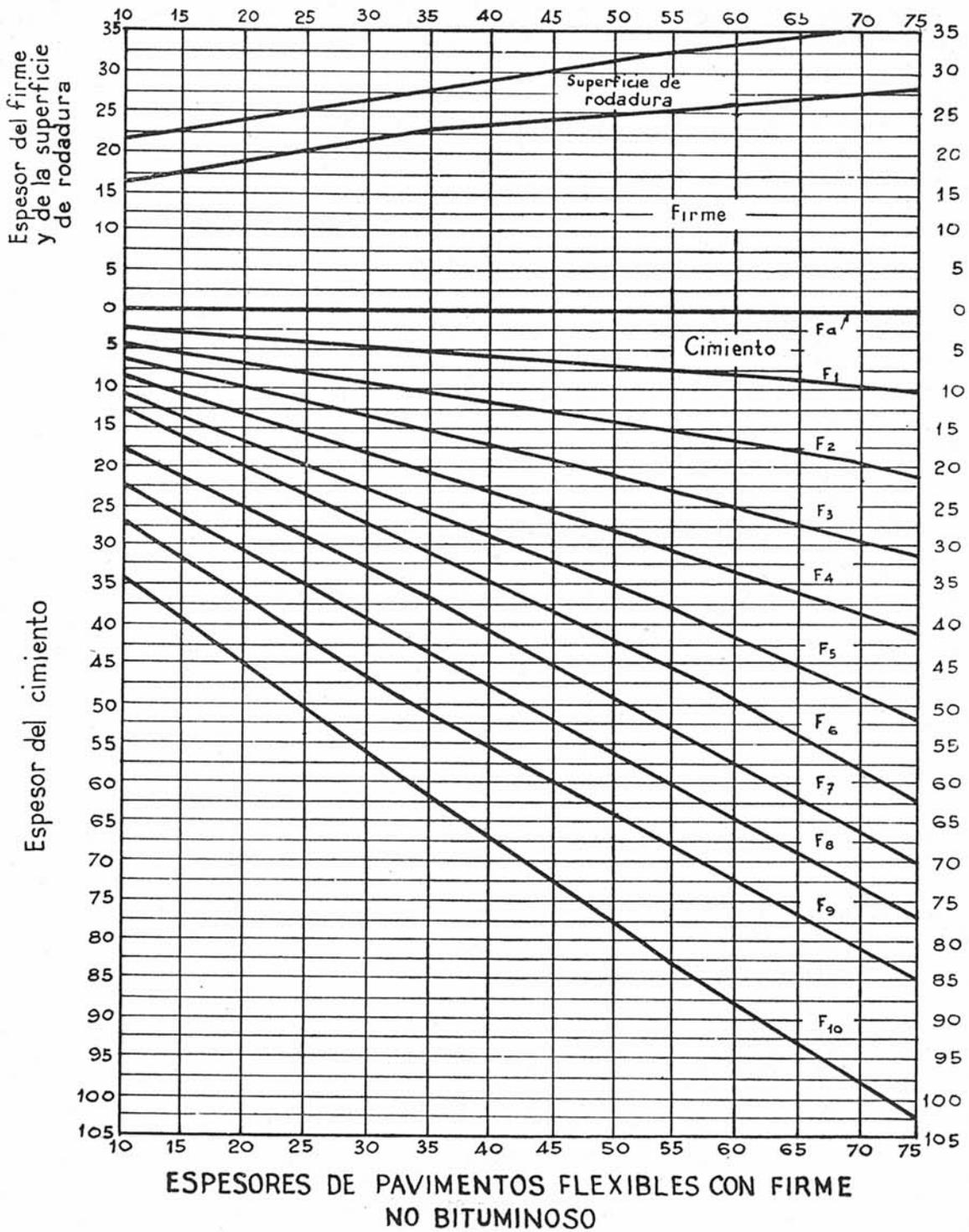
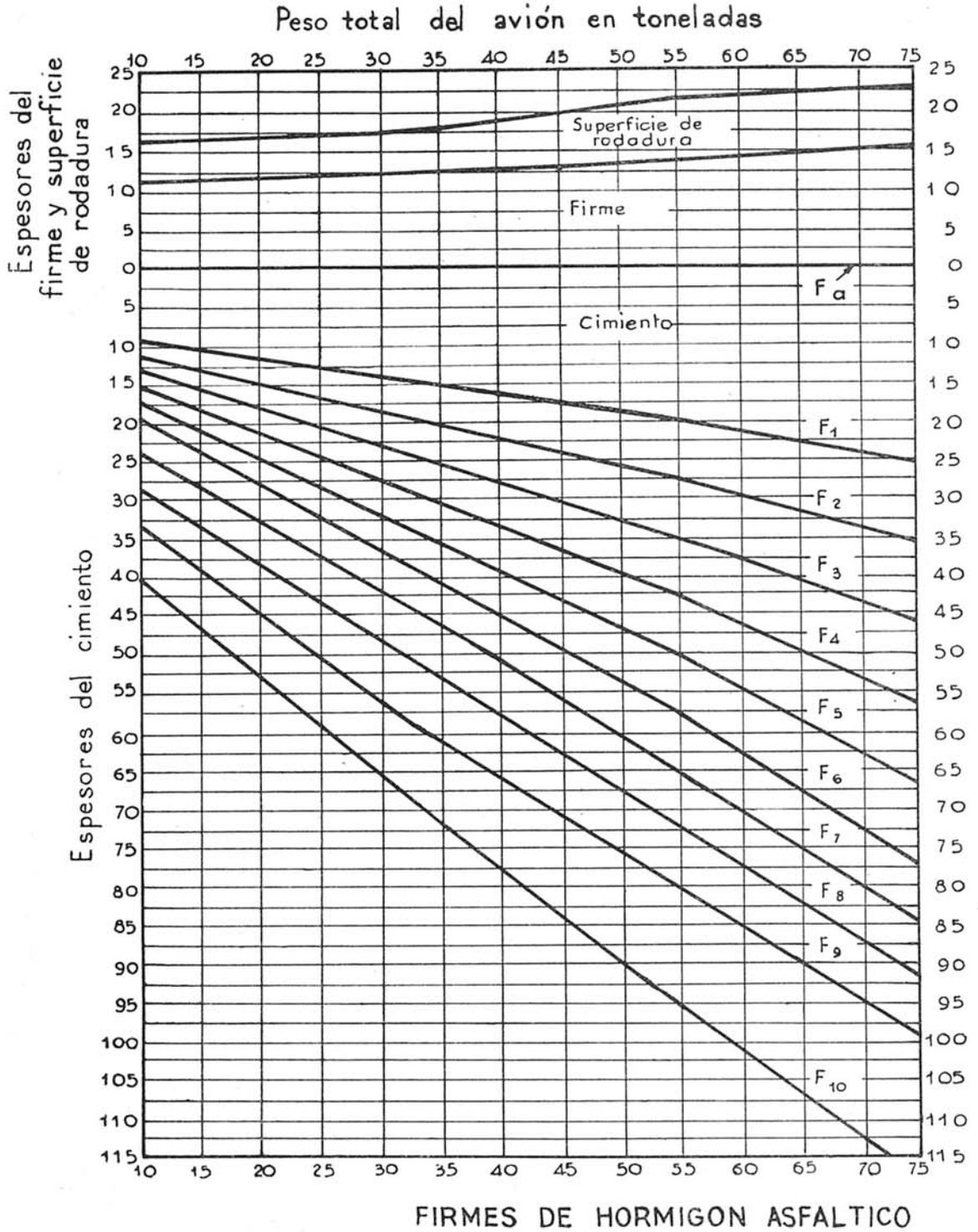


FIG. 20



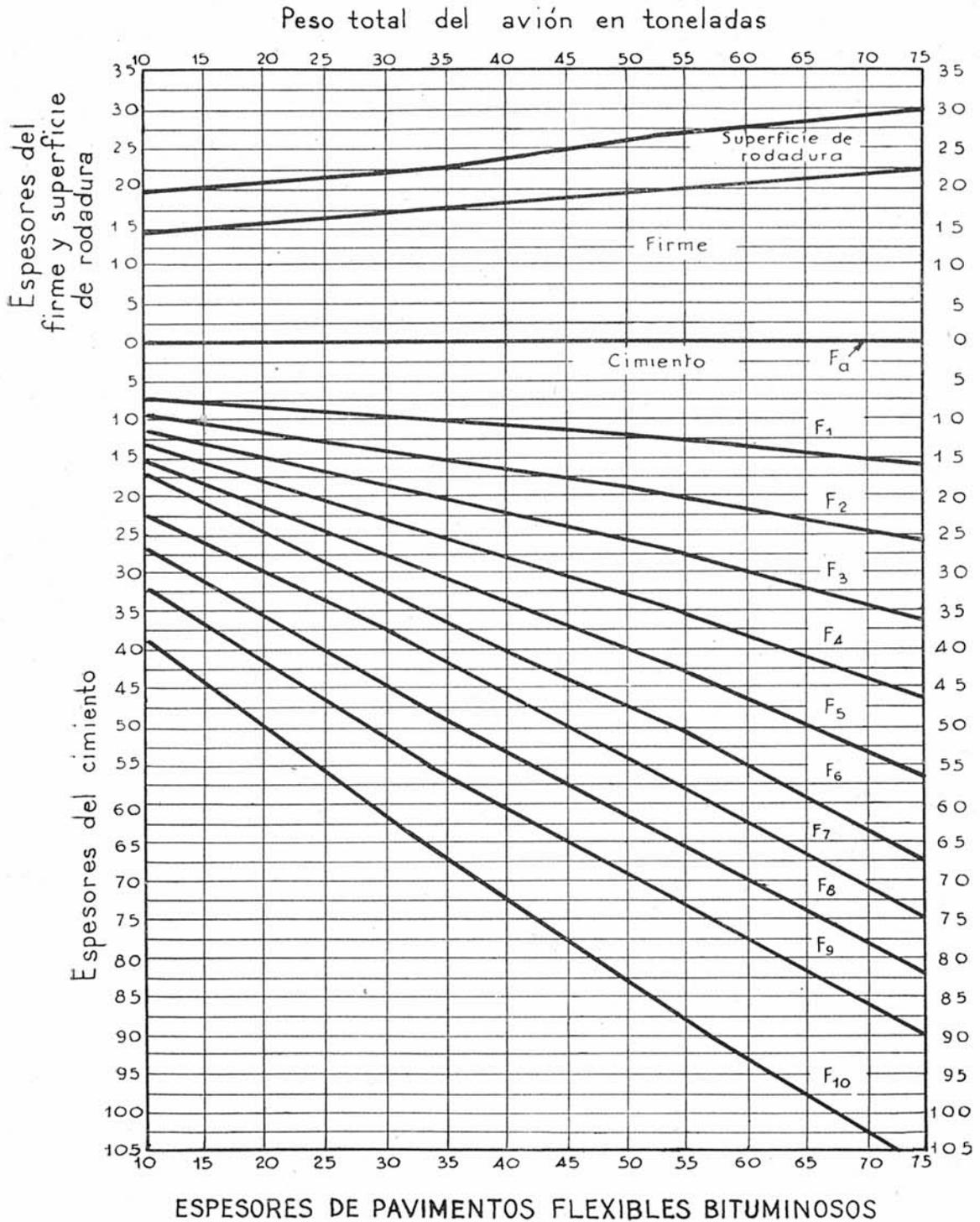


FIG. 22



SEÑALES PARA EL RODAJE DE AVIONES

Publicamos una serie de señales para ayudar a los aviones que ruedan sobre la pista y que se emplean ya normalmente en algunos aeropuertos norteamericanos y por las Fuerzas aéreas de Estados Unidos, Gran Bretaña y Canadá.

1. Disponiéndose a guiar.—2. Hacia adelante.—3. Viraje a la derecha.—4. Viraje a la izquierda.—5. Parada.—6. Parada rápida.—7. Parar motores.—8. Poner los calzos.—9. Sacar los calzos.—10. Disminuir velocidad.—11. Libre de obstáculos.—12. Aceleración del motor.—13. Instrucciones mezcla combustible.—14. Poner motores en marcha.—15. Maniobra de "flaps".—16. Rueda de cola invertida.—17. Cortar gases.—18. Meter gases.—19. Atención.—20. Llamar a la torre de mando.