Año XIX Octubre Núm. 10

ANALES

DEL

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Experiencias de Mr. Eiffel sobre la resistencia del aire y teoría del aeroplano

POR

ALBERTO SUÁREZ DÁVILA

(Trabajo leído en el Instituto de Ingenieros el Miércoles 27 de Agosto de 1919)

1.—Historia de la aviación

El Renacimiento nos trae las primeras investigaciones teóricas sobre el problema de la aviación: se las debe al genio universal de Leonardo de Vinci. Este sabio italiano dibujó en los últimos años del siglo XV planos bastante detallados de aparatos de volar, basados en principios hasta entonces desconocidos. Semejantes investigaciones eran, naturalmente, prematuras, pues los medios mecánicos de que disponía el hombre en aquella época no bastaban ni siquiera para permitir una realización parcial.

Además, en la época de Leonardo de Vinci, la mecánica moderna no se había aún constituído, porque las nociones fundamentales de fuerza y de inercia no se explicaron satisfactoriamente sino con los trabajos de Galileo y Newton. Y, aunque no hay que exagerar el papel que pueden jugar en las invenciones mecánicas los desarrollos analíticos complicados, no sucede lo mismo con los principios fundamentales de esta ciencia. Así, es necesario, si se quiere darse cuenta del papel importante que desempeña a menudo, inconscientemente, en una invención mecánica cualquiera, el conocimiento de las leyes sencillas de la composición de fuerzas y la ecuación fundamental de la mecánica: la fuerza es igual al producto de la masa por la aceleración. Sin estos sencillos principios, seguramente no hubiera sido inventado el aeroplano.

Pero, bien entendido, su conocimiento no podía bastar para realizar esta invención, y largo tiempo después de Newton las tentativas aisladas que se produjeron no tuvieron más éxito que las precedentes.

Newton había expresado a priori esta ley de la resistencia del aire, diciendo que todo cuerpo que se mueve en el espacio hace nacer una fuerza, llamada resistencia del aire y que se opone a su movimiento, proporcional a la superficie que se desplaza, al cuadrado de la velocidad y a un coeficiente K que es función de la inclinación del cuerpo y de la densidad del aire. El conocimiento exacto del valor de este coeficiente K ha sido la causa de la demora por mucho tiempo en la construcción del aeroplano y la manera de conocerlo la veremos más adelante Expresando en fórmula el valor de R es

$$R = K\,S\,V^2$$

La existencia de esta fuerza R no es sino la consecuencia lógica del postulado que rige el mundo físico: nada de la energía se crea, nada se pierde. Esta ley de la resistencia ha sido siempre verificada por la experiencia y es la base de la Aerodinámica, ciencia que estudia la acción de las fuerzas en movimiento en el aire. Newton la dedujo fundándose en el siguiente raciocinio, ya que prácticamente no es posible haberla verificado: Un cuerpo que se mueve en el aire a la velocidad 1 rechaza M moléculas del flúido en un segundo, su desplazamiento en el mismo flúido a la velocidad V, hace rechazar MV moléculas en el mismo tiempo. La reacción del flúido sobre el cuerpo es proporcional a Mx1 en el primer caso y a $MV \times V = MV^2$ en el segundo caso, es decir, a la potencia de esa fuerza.

El aeroplano nació del aprovechamiento de esta fuerza R, sirviéndose de ella para sustentarse en el espacio, venciéndo la ley de la gravedad, y poder así trasladarse de un lugar a otro por el aire.

El inglés Cayley en 1809 fué el primero que publicó la idea de la posibilidad de aprovechar la fuerza R en el sentido de la sustentación. Evidentemente, sin ser perfecta la teoría de Cayley en todos sus puntos, ponía de relieve el principio de la sustentación mediante la velocidad. En esta convicción los investigadores procuran de mil e ingeniosos sistemas producir la velocidad necesaria para adquirir la fuerza de sustentación.

Las experiencias más notables han sido, sin duda, las de planeo: consistían éstas en lanzarse desde una altura considerable logrando recorrer distancias apreciables y tomar tierra suavemente. En esta clase de pruebas gozan de merecida fama en los anales de la Aviación el alemán Lilienthal, quien pagó con su vida la audacia de sus tentativas en la 2 000ª prueba y el marino francés Le-Bris.

Sesenta años después de publicada la Memoria de Cayley, fué aplicada en la forma que lo es actualmente por el joven mecánico francés Alfonso Penaud, a quien una muerte prematura impidió dar forma práctica a sus concepciones. Penaud construyó un aeroplano reducido que funcionaba regularmente durante un tiempo apreciable. Era un monoplano con hélice posterior accionada por un resorte de caucho que hacía las veces de motor.

El siglo XIX termina con los ensayos de aeroplanos potentes construidos por Sir Hiram Maxim, el inventor de la conocida ametralladora de su nombre, y por el ingeniero francés Ader. El aeroplano de Maxim era muy grande y llevaba un potente motor a vapor: desgraciadamente, en la prueba se rompió y no pudieron proseguirse los ensayos por razones económicas. El aeroplano de Ader, llamado

Avión, palabra que se ha generalizado para llamar a todo aparato que vuela, era un monoplano provisto de dos hélices a cuatro palas, movidas por un motor a vapor. Igualmente, en la prueba de ensayo se rompió y su inventor no fué ayudado. Ader en dicha prueba logró desprenderse del suelo, salvando así la distancia de 12 metros, pero a tan poca altura, que la comisión de generales encargada por el Ministerio de la Guerra informó desfavorablemente. El aparato fué reparado y se conserva hasta hoy en el Conservatorio de Artes y Oficios de París.

El siglo XX fué decisivo y comienza con los vuelos secretos de los hermanos Wright en Norte América, al mismo tiempo que en Francia el Capitán Ferber, el ingeniero Voisin y Bleriot construían y ensayaban aeroplanos provistos ya del motor a explosión.

El 12 de Febrero de 1906, Francia convoca a un concurso a todos los que se interesan por esta nueva ciencia. Consistía la prueba en efectuar un vuelo de 1 km. Corresponde el triunfo a América: el inmortal Santos Dumond fué el único que logró volar 220 metros.

Desde entonces la aviación entra en el dominio de las cosas prácticas y avanza a pasos de gigante.

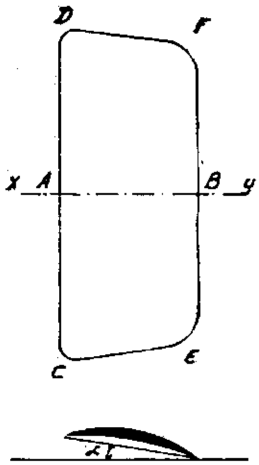
Por este tiempo la construcción de aeroplanos obedecía a reglas más o menos empíricas y deducidas de la práctica y así se determinaban los factores peso, superficie portante, potencia del motor, velocidad, que para su mejor comprensión voy a indicar a grandes rasgos la teoría del aeroplano.

2.—Teoría del aeroplano

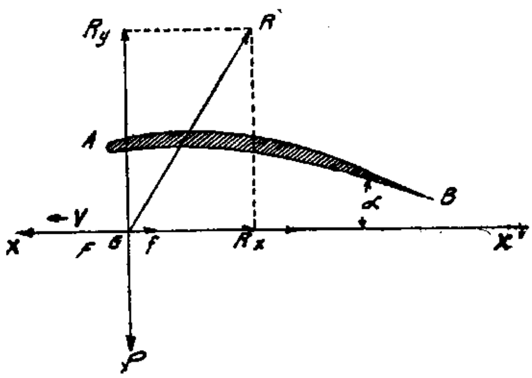
El aeroplano es un aparato, como sabemos, en el cual la sustentación es obtenida por el desplazamiento de una superficie. La sustentación es luego función de una velocidad de traslación. Esa superficie se llama ala y es el órgano esencial; admite un plano de simetría XY y tiene una cierta curva que sirve para aumentar la reacción del aire. La sección del ala por XY es el perfil AB. La longitud máxima CD es la envergadura e igual a 5 ó 6 veces al ancho AB, cantidad que se llama alargamiento. La superficie inferior del ala se llama cara y la superior dorso, siendo la curva de esta última más pronunciada que la de la cara, porque en este caso se obtiene mayor resistencia total. El borde CD se llama de ataque y EF de salida. El ala ataca al aire bajo un ángulo α (alfa) llamado ángulo de inclinación o de ataque, que es formado por la cuerda del ala y la dirección de la velocidad.

Un cuerpo central alargado, llamado fuselage, lleva el sistema moto-propulsor y sus anexos y encierra el lugar del piloto y los de su conducción. Las dos partes del ala separadas por el plano de simetría se encastran de cada lado del fuselage, sostenidas por cables. El aeroplano está provisto además de superficies auxiliares que intervienen en su estabilidad o conducción, pero que no tienen ningún efecto sobre la sustentación.

Veamos en un esquema las fuerzas que actúan sobre el aeroplano. Sea AB el perfil del ala que se mueve con una velocidad V en una trayectoria rectilínea horizontal XX'. De esta hipótesis resulta que la velocidad considerada del



Corte por A-B



aeroplano es uniforme. En efecto, si todos los factores del aeroplano quedan constantes, salvo la velocidad, el aparato sube o desciende paralelamente a sí mismo, puesto que la reacción del aire es proporcional al cuadrado de la velocidad. Luego, si nosotros suponemos que la trayectoria es horizontal, la velocidad debe ser uniforme. Se podrá, por consiguiente, aplicar al aeroplano en movimiento el teorema de D'Alembert y considerarlo a cada instante como estando en equilibrio bajo la acción de las fuerzas que lo solicitan y de la inercia.

Esas fuerzas son:

1.° La reacción del aire sobre el ala que admite una resultante R situada en el plano de simetría, perpendicular a la cuerda, proporcional a S, a V^2 y a un coeficiente K función de la inclinación alfa y proporcional a la densidad del aire.

$$R = KSV^2$$

Nosotros tomaremos como parámetro que fija la posición del ala, el ángulo alfa. Los ángulos utilizados en aviación no pasan de 15°.

Esta fuerza R se descompone en dos, una en la dirección de la velocidad, Rx, que es una fuerza que se opone a la tracción

$$Rx = Kx\ SV^2$$

y la otra en la prolongación de la vertical P, Ry que es una fuerza de sustentación $Ry = Ky\ SV^2$.

K, Kx, Ky son funciones del ángulo de ataque y ligadas por la relación

$$K^2 = K^2 x + K_y^2$$

R será igual a K, es decir la resistencia unitaria, cuando S sea igual a un metro cuadrado y $V^2 = 1$; que es la resistencia opuesta por un plano delgado de un metro cuadrado de superficie, normal al viento y con la velocidad de un metro por segundo.

M. Eiffel por medio de sus experiencias había logrado conocer el valor de K = 80 gramos, en el año 1907. Estas experiencias consistían en dejar caer cuerpos y superficies desde la Torre Eiffel y por la velocidad de caída obtener K.

Conocido el valor de K para una superficie que ataca normalmente al aire, se trató por medio de fórmulas complicadas obtener su valor a distintos ángulos de ataque y tomando en cuenta la densidad del aire, para su aplicación al aeroplano. Pero tales estudios no han dado el éxito deseado, porque el coeficiente K varía de una manera caprichosa, y entonces concibió M. Eiffel la idea de la determinación del valor de K en distintos casos de formas de superficies e inclinaciones. Su estudio es el comienzo de la moderna era de la aviación y que ha producido tan grandes revelaciones. Comienza en 1910 con la instalación del laboratorio aerodinámico del Campo de Marte y del cual trataremos más adelante.

2.° A las resistencias que el aire opone al avance de las partes diferentes que el ala. Estas resistencias admiten una resultante $f = r\ V^2$.

El valor de esta resistencia perjudicial se avaluaba antes de una manera, más o menos aproximada, equivalente a la resistencia de un metro cuadrado normal a la velocidad. Pero ahora se puede determinar el valor del coeficiente r que es del mismo sentido que K, y que caracteriza la finura de un aeroplano.

3.º A su peso P que es una fuerza vertical.

4.º A la tracción de la hélice, que obra paralelamente a la velocidad en el plano de simetría y que puede ser nula. Entonces la trayectoria es descendente, originada por una componente de P. y que constituye el vuelo planeado.

Antiguamente hacían el cálculo de los factores de un aeroplano de la manera siguiente:

Por ley de sustentación tomaban los primeros constructores

$$P = Ry = Ky\ SV^2$$

y para la tracción

$$F = Rx = Kx\ SV^2 = P\ \frac{Kx}{Ky}$$

La relación $\frac{Kx}{Ky}$ se había establecido de la práctica y deducida de los mejores aeroplanos era 1/10.

Luego $F = P\ \frac{1}{10}$. Es decir, el peso podía ser 10 veces la fuerza de tracción de la hélice. Pero, como hay que vencer también la resistencia perjudicial $f = r\ V^2$, se elevaba al doble la fuerza de tracción, más o menos. Se determinaban así los demás factores V, S, etc., en casos determinados, como, por ejemplo, estableciendo los cálculos para un aeroplano que diera 60 km. a la hora, y deducían así la superficie. También predominaban reglas empíricas respecto a la carga unitaria $\frac{P}{S}$. Esta carga se creía no podía pasar de un límite de 20 kilos por metro cuadrado, cantidad que más tarde fué elevada a 50 kilos.

La potencia del motor se obtenía así:

La resistencia $R = K\ SV^2$ será en kilográmetros segundo $K\ SV^3$ y en caballos ordinarios

$$T = \frac{K\ SV^3}{75}\ HP.$$

Los factores del aeroplano no eran así los verdaderamente exactos, y había que modificarlos, hasta que las experiencias de M. Eiffel vienen a poner término a tan anormal situación.

3.—Experiencias de M. Eiffel sobre la resistencia del aire

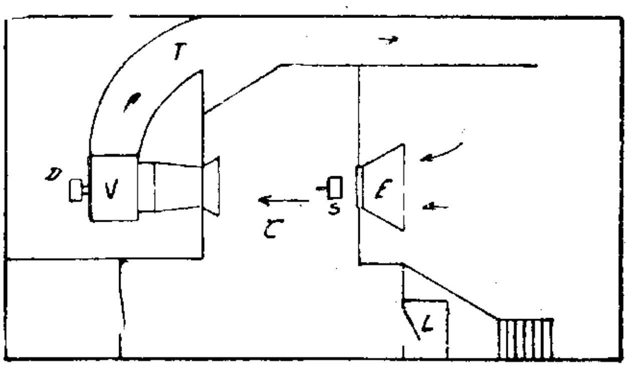
Como decía anteriormente, estas experiencias consisten en determinar con exactitud los valores de Kx y Ky, y, por consiguiente, de K en distintos cuerpos y superficies y a distintas inclinaciones.

Estas experiencias han demostrado que la ley general de la resistencia R igual K SV^2, que hasta entonces se había considerado como exacta, al menos para velocidades comprendidas entre 0 y 40 ó 50 m/s, no es exactamente aplicable para ciertas curvas de alas en S.

En efecto para estas alas el coeficiente K no es constante y disminuye con la velocidad.

Por otra parte, la relación de las componentes vertical y horizontal de la presión total no es tampoco constante, como se había admitido anteriormente, sino que se mejora esa relación a medida que la velocidad aumenta; aunque también en este caso, el frotamiento de las moléculas de aire no es despreciable, y hay que tomarla en cuenta tratándose especialmente de los aeróstatos. Además, el desplazamiento de una superficie produce una fuerza de presión en la cara inferior y otra de depresión en la cara superior. Si la velocidad aumenta, esta depresión aumenta también hasta llegar al vacío absoluto para una velocidad que se puede calcular. Se ha encontrado así V = 300 m/s.

Esta velocidad ha sido sobrepasada por los proyectiles y se puede decir, bien que esto no ha sido verificado experimentalmente, que la resistencia del aire sobre los proyectiles no es proporcional al cuadrado de la velocidad.



Voy a indicar el laboratorio aerodinámico de M. Eiffel, en un ligero esquema:

C cámara de experiencias, herméticamente cerrada para impedir la influencia del viento exterior;

M balanza aerodinámica;

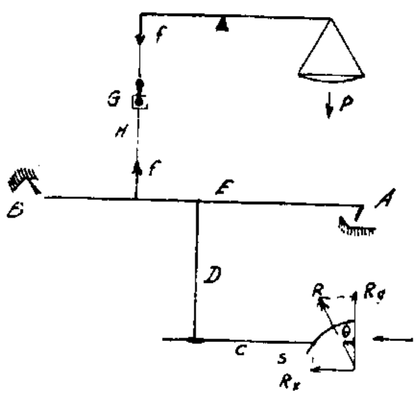
V ventilador centrífugo «Sirocco»;

D dinamo de 50 kw.;

T salida del aire;
L esclusa; y
E llegada del aire.

El método adoptado por M. Eiffel consiste en dejar fija la superficie de ensayo, sometida a la corriente de aire producida por un ventilador de succión, el más grande de los modelos «Sirocco». El diámetro de la corona móvil es de 1.75 m. y la altura del aparato es de 3.36 m. y comprendiendo la base de cemento es de 5.50 m. sobre el suelo. Está accionado por un dinamo de 50 kw. o 70 HP, cuya corriente es dispensada por las máquinas de la torre Eiffel. El número de revoluciones se puede hacer variar por medio de un reóstato de 40 a 200 vueltas por minuto. La velocidad de la corriente puede pasar de 5 a 20 m/s. Este ventilador produce en la cámara de experiencias una depresión que llega hasta 20 mm. Es necesario primero penetrar a una esclusa L.

La velocidad de la experiencia se obtiene directamente por anemómetros o



también por medio de manómetros de agua considerando el desnivel H producido por la diferencia de presión.

Las medidas de las presiones sobre las placas en experiencias se obtienen por medio de una balanza aerodinámica especial, imaginada por M. Eiffel.

La varilla C que soporta la superficie está fija a un soporte D en forma de T, que es móvil al rededor de una cuchilla A y sufre el esfuerzo vertical f de un peso p dado por la balanza, que cuando queda estable da a conocer el momento con relación al apoyo A de las fuerzas que obran sobre S. Por medio de la varilla H acortada por un excéntrico se obtiene el apoyo en B y, por consiguiente, el momento del esfuerzo del aire con relación a B.

Por medio de estas operaciones M. Eiffel obtiene el valor de las componentes Rx, Ry, y, por consiguiente, R en magnitud y dirección, como también el ángulo teta que hacen la presión total y la componente vertical, y que antes se había considerado igual a alfa.

En una experiencia efectuada por M. Eiffel con una placa rectangular de 90 cm. x 15, de flecha 1.09 cm. es decir, 1/13.5 de la cuerda colocada con un ángulo de ataque de 15°, ha obtenido los siguientes resultados:

$$Rx = 226.5 \text{ gr.} \qquad Ry = 1.037 \text{ gr.} \qquad R = 1063 \text{ gr.}$$

$$\operatorname{tg} \theta = 0.218 \qquad \theta = 12°3$$

de donde

$$K = \frac{R}{SV^2} = 0.0785$$

$$Kx = 0.017 \qquad Ky = 0.077$$

Finalmente, se determina el centro de presión en un dibujo de la superficie en su posición en la experiencia. Este centro de presión es de gran importancia para la construcción de un aeroplano y la relación que deben guardar entre este punto, el centro de gravedad y el punto de aplicación de la fuerza de tracción del motor y que tanto papel juegan en la estabilidad de los aeroplanos.

A este respecto sólo diré que el centro de presión de una superficie normal a su dirección se halla en el centro geométrico de la figura, y que se acerca hacia el borde de ataque a medida que la superficie se inclina.

En líneas generales voy a narrar los resultados obtenidos por M. Eiffel acerca de K.

Lo primero que salta a la vista es que K no es constante al pasar de una superficie a otra de área múltiple: aumenta con S. Para una placa cuadrada de 10 cm. de M. Eiffel ha encontrado para K el valor 0.065 y para una de un metro de lado K = 0.0789, es decir, un aumento de 15% para pasar de una superficie a otra cien veces mayor.

Colocando la placa a 90° y disminuyendo la incidencia, se decía antes que la resistencia total disminuía. Las experiencias de Eiffel a este respecto dicen lo contrario: de 90° a 45° aumenta poco a poco de 8% más o menos. A partir de aquí la resistencia hace un salto brusco hasta 37° en donde alcanza un máximo inesperado y de 45% superior a la resistencia a 90°. A partir de 37° R decrece casi regularmente hasta 0°. La explicación que da M. Eiffel es la siguiente: La resistencia total de la placa, como decía anteriormente, es la suma de la presión a la cara inferior de la placa y de la depresión que se produce arriba. Esta depresión no es despreciable y alcanza hasta los 3/4 y aún los 4/5 de la resistencia total. Para el caso de una placa cuadrada, mientras la presión inferior decrece regularmente de 90° a 0°, la depresión crece para alcanzar un máximo a 37°, lo que explica el resultado obtenido.

Si se pasa del cuadrado a un rectángulo, R varía con el alargamiento de éste. Disminuye si el menor lado es borde de ataque y aumenta cuando el lado mayor ataca el aire, lo que justifica las alas de los aeroplanos y aún las alas de las aves. El aumento que sufre K es notable para un alargamiento 50.

Así la cifra obtenida por M. Eiffel para un cuadrado de 15 cm. de lado es K = 0.066 y para un rectángulo equivalente de alargamiento 6, K = 0.0725, de alargamiento 50, K = 0.097. Relacionando a la unidad, el coeficiente del cuadrado para el coeficiente del rectángulo de alargamiento 6: es 1.10; de alargamiento 50: 1.45, según el aumento que experimenta al pasar a una superficie mayor.

Inclinando estos rectángulos al viento, ha encontrado el mismo fenómeno observado en el cuadrado, pero mucho más atenuado. El máximo de R corresponde a un ángulo que va disminuyendo rápidamente por poco que el alargamiento aumente; para un alargamiento 1.5 el máximum está a 26°; al alargamiento 2 el máximo esta a 20°.

De la misma manera se determina el valor del coeficiente r de la resistencia perjudicial $f = r V^2$, sometiendo a la corriente de aire del ventilador al aeroplano sin alas.

Hasta aquí cada constructor ha tenido su ala especial y cada cual procura encontrar la de mejor rendimiento, a tal inclinación, con tal superficie, es decir procurando obtener la menor relación de $\frac{Kx}{Ky}$, que se obtiene cuando Kx, la resistencia que se opone al avance, sea mínima, y que Ky, la de sustentación, sea máxima.

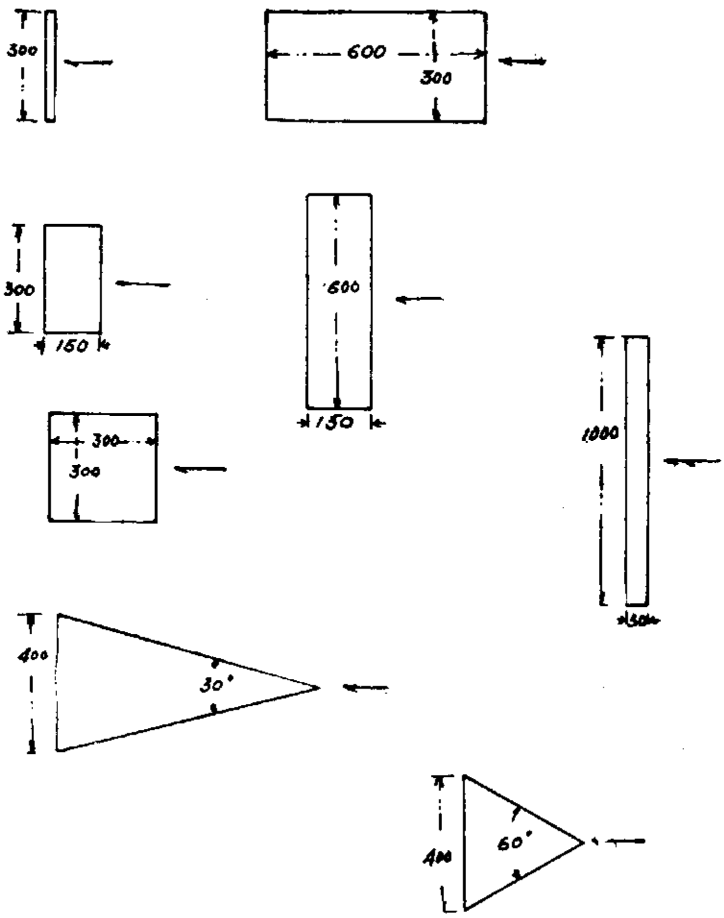
Como estudio complementario, voy a indicar algunos valores de K en ciertas formas de cuerpos que pueden ser de aplicación, como esferas, cilindros, conos obtenidos por M. Eiffel en su gabinete de experiencias.

I. Cilindros con las bases normales al viento.

K	K
0.0675	0.055
0.068	0.050

II. Cilindros de bases paralelas al viento.

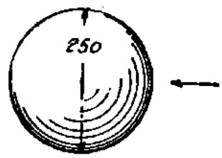
K	K
0.040	0.060
placa	placa
0.072	0.093

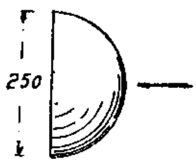


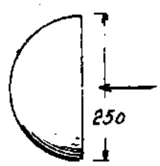
M. Eiffel ha construído un rectángulo hueco cruzado por 22 kilos de acero de 2mm.75 de diámetro y separados de 18 mm. y ha encontrado para este rectán gulo un coeficiente K = 0.063, es decir, sensiblemente el coeficiente de las pequeñas superficies cuadradas.

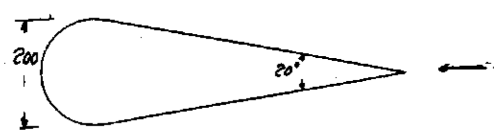
III. Conos.

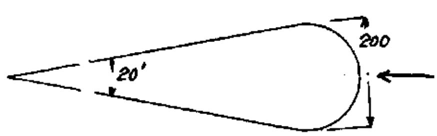
K	Placa
0.032	0. 71
0.021	

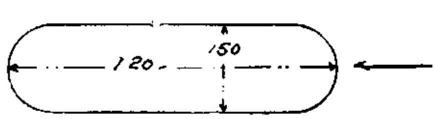

250


250


250


200
20°


200
20'


150
120

IV. Cuerpos esféricos.

K	Placa
0.011	0.066
0.021	
0.083	

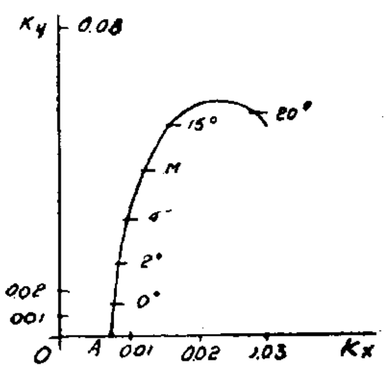
V. Cuerpo esfero-cónico.

K
0.0101
0.0055
0.012

Este último, si fuera sólo cilindro, tendría para K un valor 0.059. Este cuerpo tiene la forma de los dirigibles Zeppelin.

4.—Estudio del estado actual del cálculo de un aeroplano

Pudiéndose ahora conocer con exactitud el valor total de la resistencia del aire sobre las superficies, y, por consiguiente, los valores de K, y así Ky Kx, se puede fácilmente determinar los valores de V, P, y potencia del motor.



Si sobre dos ejes de coordenadas rectangulares colocamos Kx en abscisas y Ky en ordenadas, se obtiene una curva de forma parabólica, que deberá ser determinada experimentalmente para cada ala. Esta curva se llama la *polar del ala;*

ella es característica y sirve de estudio de un aeroplano. A cada ángulo de ataque corresponde un punto M de la polar.

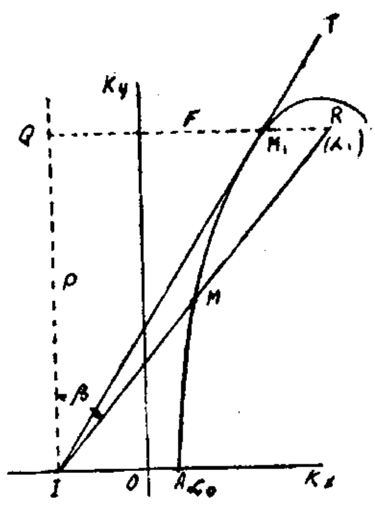
Kx es una función constantemente creciente con el ángulo de ataque, Ky es una función al principio creciente y después decreciente, habiendo pasado por un máximo.

Para los ángulos utilizados en aviación no superiores a 15°, Ky es constantemente creciente.

Las ecuaciones de las cuales obtendremos los valores esenciales de un aero plano son dos: la ecuación de sustentación y la de tracción; $P = Ky\ SV^2$ (1) y $F = Kx\ SV^2 + rV^2$ (2).

La velocidad sacada de (1) será V igual $\sqrt{\dfrac{P}{Ky\ S}}$

en la que P y S son constantes y Ky crece con el ángulo de ataque, luego disminuye V cuando aumenta el ángulo alfa α.



El valor de F será $$\frac{F}{P} = \frac{Kx + \dfrac{r}{S}}{Ky}$$

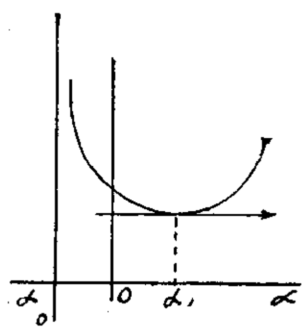
y veamos en la polar el estudio de F correspondiente al punto M de la curva.

$$O\,I = \frac{r}{S}$$

Juntando I con M, I M es $\dfrac{Kx + \dfrac{r}{s}}{Ky}$, la tg. de B. β es el ángulo que hace I M con O Ky, luego $F = P \, t_g \; \beta$.

Las variaciones de tg. β permiten seguir las variaciones de F.

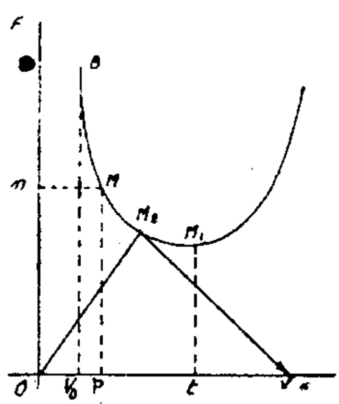
La fuerza de tracción es infinita para el ángulo α_0 (negativo), correspondiente al punto A de la polar, o Ky igual a cero (sustentación nula). Ella decrece en seguida, pasa por un mínimo cuando I M viene a ser tangente a la polar, después crece. La curva de las variaciones de F es de la forma siguiente:



En la figura anterior I Q representa el peso P del aeroplano y Q R la fuerza de tracción correspondiente.

La potencia necesaria para el vuelo es T igual F V

$$\text{es decir } T = Kx \, SV^3 + rV^3$$



Se puede determinar la mínima potencia con que se puede volar en un aeroplano.

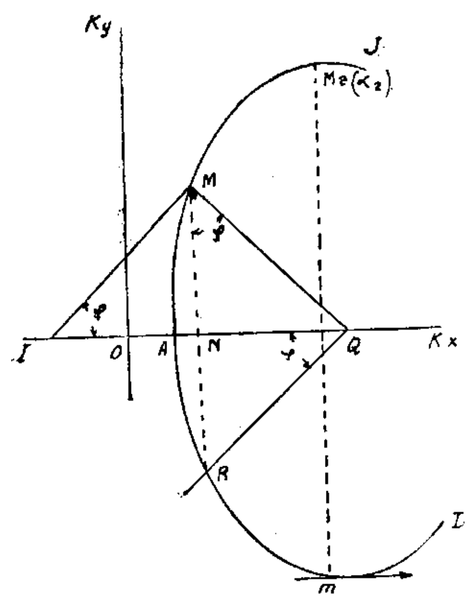
Representando la curva de F en función de V. El valor mínimo de V será V_0 correspondiente al máximo de Ky. La curva parte del punto B, decrece, pasa por un mínimo, después erece. La potencia dispensada T igual F V a un régimen correspondiente al punto M de la curva está representada por el área del rectán gulo OmMp. T será mínima cuando su diferencial sea nula σ

$$F\,dV + V\,dF = 0, \text{ de donde } \frac{d\,F}{d\,V} = -\frac{F}{V}$$

El coeficiente angular de la tangente $\frac{d\,F}{d\,V}$ siendo negativo el punto correspondiente M2 está sobre el brazo de la curva descendente y $\frac{F}{V}$ siendo el coeficiente angular de la recta OM2 el triángulo OM2t es isósceles.

Se puede determinar el ángulo que corresponde al mínimo de potencia.

$$\text{La potencia es } T = \frac{p^{3/2}}{S^{1/2}} \qquad \frac{Kx + \frac{r}{S}}{Ky^{3/2}}$$



Tomemos la polar J del ala

Tenemos $\operatorname{tg} \phi = \dfrac{Ky}{Kx + \dfrac{r}{S}}$ luego T puede escribirse

$$T = \frac{P^{3/2}}{S^{1/2}} \cdot \frac{1}{tj\ \phi \times Ky^{1/2}}$$

$\dfrac{P^{3/2}}{S^{1/2}}$ es constante, luego T varia proporcionalmente a $\dfrac{I}{\operatorname{tg} \phi \times Ky^{1/2}}$, es decir, la potencia es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad del aire.

Elevemos al cuadrado este factor, y estudiemos la variación del cuadrado $\dfrac{1}{\operatorname{tg}^2 \phi \times Ky}$. Trazando MQ $\perp$ a IM, ella encuentra en Q el eje OK_x. De O se traza una paralela QR a MI, que corta la ordenada de M en R.

N R representa $\operatorname{tg}^2 \phi \times Ky$.

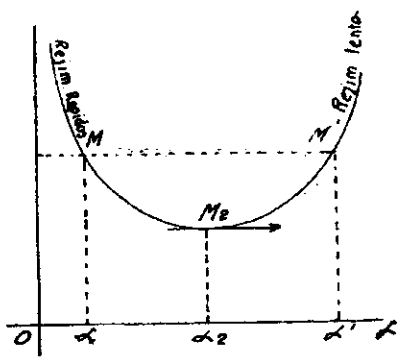
El lugar del punto R es una curva D que permite seguir las variaciones de T. La polar J y la curva D tienen el mismo origen A sobre OKx. D parte de A, crece, pasa por un mínimo y decrece. El ángulo α_2 corresponde a su máximo, es el ángulo del mínimo de la potencia.

Observemos que $T = \dfrac{P^{3/2}}{S^{1/2}} \quad \dfrac{I}{\sqrt{N R}}$

Esta fórmula permite calcular la potencia midiendo N R para un régimen cualquiera.

La curva de las potencias pasa por un mínimo y vemos que es posible volar bajo dos ángulos de ataque distintos α y α' separados por el ángulo α_2 del mínimo de potencia necesaria. El primer ángulo que corresponde a una gran velocidad, es un régimen rápido, el segundo a una pequeña velocidad es un régimen lento. Luego en vuelo por aumento conveniente de $\alpha' - \alpha$ del ángulo de ataque se puede pasar del régimen rápido al lento e inversamente. El aeroplano actual tiene así dos *velocidades diferentes compatibles con una potencia dada.*

De esta manera se hace el estudio de las características de un aeroplano y se obtiene también la velocidad de descenso y la de ascensión, debiendo ser la pri-
ible para que el aeroplano, una vez parado el motor, planee la



mayor distancia posible; y la segunda la velocidad de ascensión, debiendo ser considerable para tomar la mayor altura en el menor tiempo, factor sobre todo de mucha importancia en la aviación militar.