

Aerotecnia

Ensayos vibratorios con materiales y piezas de aviones

Por VICENTE ROA MIRANDA

Comandante de Aviación, Ingeniero Aeronáutico

LOS métodos de cálculo de las estructuras de aviones, se basan actualmente en ciertas hipótesis de cargas estáticas, deducidas de los estudios y de las experiencias realizadas para determinar las aceleraciones y esfuerzos a que se pueden encontrar sometidas dichas estructuras en el curso de las diferentes evoluciones, o bajo la acción de fenómenos aerodinámicos o circunstancias atmosféricas desfavorables.

Estas hipótesis de cargas estáticas se encuentran reglamentadas en la mayoría de los países, y los constructores se atienen obligatoriamente a ellas para la determinación de los esfuerzos que obran sobre los diferentes elementos de las estructuras de aviones y para el cálculo de las dimensiones de los mismos.

Por este procedimiento, interpretando y realizando correctamente las hipótesis y los cálculos, y complementándolos con ensayos estáticos parciales o de conjuntos, se garantiza la construcción a los efectos de las cargas de servicio normales que se pueden presentar durante el vuelo, pero se omiten otros *esfuerzos dinámicos*, que superponiéndose a los primeros, pueden determinar en algunas partes acumulaciones de esfuerzos que originen la rotura. Estos esfuerzos dinámicos son poco conocidos y resulta, por lo tanto, sumamente difícil introducirlos en las hipótesis de cálculo. El reglamento alemán formula algunas prevenciones para aminorar el efecto de las fuerzas dinámicas, pero hasta el presente nada concreto figura en las normas oficiales.

Las fuerzas dinámicas nacen de las vibraciones provocadas por los motores y las hélices o por fenómenos aerodinámicos y alcanzan a casi todas las piezas del avión. También se originan vibraciones durante la rodadura, a causa de la desigualdad del terreno, pero éstas tienen en general muy poca importancia por su corta duración, y solamente después de un tiempo muy largo de servicio, que prácticamente no se alcanza, pueden dar lugar a roturas.

En mayor o menor escala, siempre hay ocasión de apreciar en un avión en vuelo la existencia de vibraciones en los fuselajes, alas, empenajes, montantes, tirantes, etc. En algunos casos, estas vibraciones adquieren una importancia muy marcada por deficiente funcionamiento de los motores, por deformación o desequilibrio de las hélices, por holguras o juegos en articulaciones y herrajes, por fenómenos aerodinámicos o atmosféricos, etc. Vulgarmente se engloban estas vibraciones con el nombre de *trepidación* y es frecuente el comentario entre pilotos de que *el avión trepida*.

Las vibraciones originadas por las causas que se mencionan, se traducen en esfuerzos dinámicos alternativos, y estos esfuerzos determinan una *fatiga* del material, que termina por romper para esfuerzos bastante inferiores a su resistencia estática. La rotura se inicia generalmente en algunas secciones críticas (aligeramientos, cambios de forma, remachaduras, etc.) donde hay acumulación de tensiones.

La *carga de fatiga* o *resistencia permanente* de un material, es el límite de carga dinámica para el cual el material no rompe, sea cual fuere el número de vibraciones a que se le someta. En rigor, los cálculos de resistencia de materiales que han de estar sometidos a vibraciones (como son en general la mayor parte de los materiales que entran en la construcción de aviones) no debieran basarse en la resistencia mecánica estática, sino en la *resistencia dinámica permanente* o *carga de fatiga*, que es bastante inferior.

Esto no quiere decir que, al no tener en cuenta esta observación en los cálculos, se corra un riesgo grande de rotura en vuelo de los aviones; para que esto suceda es necesaria la concurrencia de circunstancias desfavorables, por ejemplo, el que durante el curso de una evolución o por circunstancias atmosféricas que sometieran la estructura o alguna de sus partes a esfuerzos importantes, se solaparan esfuerzos dinámicos. También podría producirse la rotura de una estructura fatigada por el tiempo de servicio en circunstancias de vuelo normal.

Como los factores de carga adoptados en el cálculo de aviones son en general bastante elevados, las estructuras suelen trabajar por debajo de su resistencia permanente y, por ello, no se producen roturas dinámicas.

La carga de fatiga ha sido determinada experimentalmente para algunos materiales utilizados en la construcción de aviones, y también se ha estudiado la influencia de las entalladuras, cambios de sección, taladrado, remachado y soldadura en las probetas; pero resulta muy difícil el conocimiento de la resistencia permanente de piezas o conjuntos de estructuras, por la variedad de concepción y ejecución de las mismas. El Deutsche Versuchsanstalt für Lufthahrt (D. V. L.), que es el Instituto alemán de Investigaciones Aeronáuticas, ha realizado, y continúa realizando, numerosos ensayos dinámicos sobre materiales en estado de probetas y sobre piezas y conjuntos.

En el presente trabajo nos proponemos dar a conocer algunos métodos y resultados de experimentación de dicho Instituto, resultados que aportarán un valioso

concurso al progreso de la técnica constructiva Aero-náutica.

Para mayor claridad dividiremos esta exposición en dos partes:

- A). — Ensayos dinámicos de materiales.
- B). — Ensayos dinámicos de piezas y conjuntos.

A). — Ensayos dinámicos de materiales

Se han efectuado ensayos dinámicos con diferentes materiales (maderas, madera contrapeada, bakelita, aceros, metales ligeros, cobre, latón, etc.). Las probetas afectan formas distintas según se saquen de chapas, barras, tubos o piezas.

El método general para la determinación de la resistencia permanente o resistencia a la fatiga de un material, cuya resistencia estática es conocida, consiste en someter a vibración un cierto número de probetas con cargas dinámicas decrecientes inferiores a aquélla, y medir para cada carga el número de vibraciones necesarias para producir la rotura. Si en un sistema de dos ejes coordenados se toman como ordenadas las cargas y como abscisas el número de vibraciones en escala logarítmica, se obtendrán una serie de puntos que, unidos entre sí, nos darán la línea de resistencia dinámica del material. Esta línea es aproximadamente una línea quebrada compuesta de dos trozos rectos, uno de los cuales es paralelo al eje de las abscisas. La ordenada constante en este último trozo es la *resistencia permanente* del material.

En la figura 1 está representada la línea de resistencia dinámica a la flexión de un acero al carbono de $R=80$ kilogramos por milímetro cuadrado.

Las abscisas están en escala logarítmica.

Este acero, cuya resistencia estática es de 80 kilogramos por milímetro cuadrado, con un esfuerzo dinámico de 68 kilogramos por milímetro cuadrado, rompe a las 10.000 vibraciones (punto A); con 54 kilogramos por milímetro cuadrado, rompe al cabo de 100.000 vibraciones (punto B). Determinando otros puntos, C, D, F, con cargas inferiores, el número de vibraciones necesarias para producir la rotura va en aumento hasta el punto F, que corresponde a 2.000.000 de vibraciones y a una resistencia aproximada de 40 kilogramos por milímetro cuadrado, que es la *resistencia permanente a la flexión*

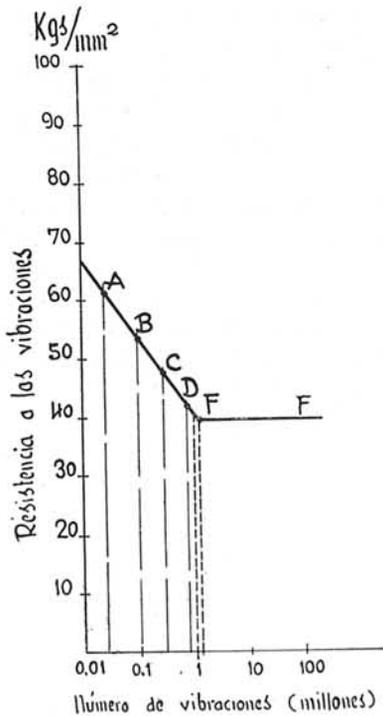


Fig. 1.

de este acero, es decir, que bajo esta carga dinámica o con cargas inferiores el material resistirá indefinidamente cualquiera que sea el número de vibraciones a que se le someta.

Estos resultados son independientes de la frecuencia vibratoria y pueden interrumpirse los ensayos cuantas veces se quiera, es decir, que para un esfuerzo dinámico determinado superior a la resistencia permanente, el material romperá siempre al cabo de un número fijo de vibraciones N , que pueden ser producidos en un solo ensayo o ser la suma $n + n' + n'' + \dots = N$ de las vibraciones producidas en diferentes ensayos.

Resulta, pues, que cuando un material está sometido a un esfuerzo dinámico superior a su resistencia permanente, este material se va *fatigando* y termina fatalmente por romper. De aquí que se llame también *limite de fatiga* o *carga de fatiga* a su resistencia permanente.

La figura 2 presenta una comparación de las líneas de resistencia dinámica de cuatro clases de acero, dos de duraluminio, una de electrón y otra de madera de pino.

Por lo que se refiere a los aceros, se observa que mientras mayor es la resistencia estática, menor es la relación de la resistencia permanente a aquélla, variando este porcentaje del 45 al 60 por 100. De todos los ensayos realizados se ha llegado también a la interesante conclusión de que todo acero que resista sin romper más de 2.000.000 de vibraciones a flexión, no rompe jamás para esfuerzos dinámicos iguales o inferiores a los de ensayo, y esto cualquiera que sea la composición química del mismo.

Para las aleaciones ligeras, como el duraluminio y el electrón (líneas 5, 6 y 7), no se ha llegado todavía a la determinación del límite de fatiga, pues las líneas siguen una marcha descendente aun después de 100.000.000 de vibraciones, cantidad que supone un considerable número de ensayos.

La madera (línea 8) posee una resistencia permanente a la flexión muy marcada y muy elevada, pudiendo decirse que es un material casi indiferente a las vibraciones de flexión.

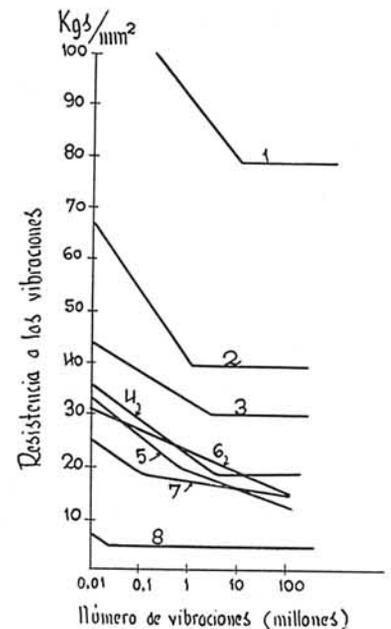


Fig. 2.

- 1) Acero al Cr-Ni-W. $\delta B=160-170$ kgs./mm².
- 2) " carbono. ≈ 80 kgs./mm².
- 3) " " ≈ 60 " "
- 4) " " ≈ 35 " "
- 5) Duraluminio 6St. B.
- 6) " 62I. 2B.
- 7) Electrón A Z M.
- 8) Madera de pino.

Los ensayos dinámicos de materiales se realizan con diferentes tipos de máquinas, y a título de información describimos a continuación la más moderna, ideada por el D. V. L. para los ensayos dinámicos a flexión de chapas delgadas, cuya aplicación está tan generalizada en la construcción de aviones.

El principio de esta máquina es el siguiente:

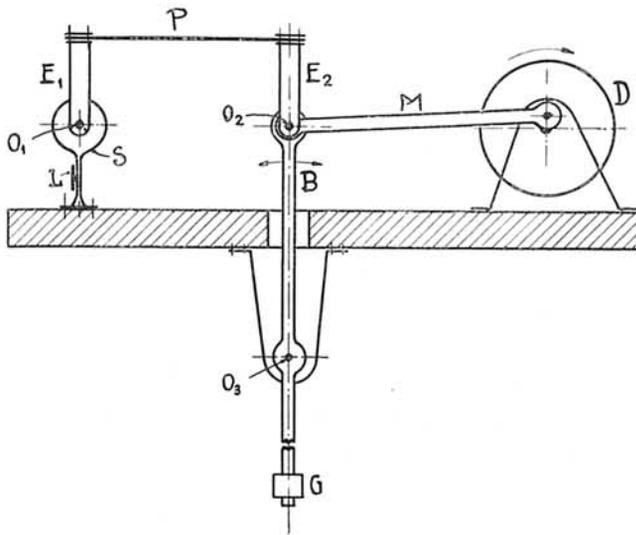


Fig. 3.

La probeta del material P se sujeta por sus extremos en los dos estribos móviles E_1 y E_2 . El estribo E_1 puede girar libremente (por intermedio de un rodamiento de bolas) alrededor del eje O_1 sobre un soporte S , que se puede desplazar sobre la placa de base. El estribo E_2 también puede girar en la misma forma alrededor del eje O_2 en el balancín B , al que una biela M imprime un movimiento alternativo. El balancín B gira alrededor del eje O_3 y en su brazo inferior lleva un contrapeso G para compensar las masas.

La figura 4 es una fotografía de la máquina que permite formar una idea más completa de la misma.

El movimiento de vaivén del balancín B somete la probeta a un plegado alternativo, en el que el momento de flexión es prácticamente igual en todos los puntos de la probeta y el esfuerzo de flexión es también por consiguiente casi constante en toda la longitud prismática de la misma. Esta es la diferencia más esencial de esta nueva máquina con las otras máquinas de ensayo similares, en las que la sujeción de la probeta es tal, que el esfuerzo de flexión máximo se produce en uno de los puntos de fijación.

La variación del esfuerzo de flexión se puede conseguir por desplazamiento del soporte S , o por variación de la excentricidad del mando de la biela M . La determinación de la frecuencia se obtiene por medio de un contador accionado por el eje de la máquina. Al romperse la probeta, el estribo E_1 vuelca y actuando sobre un interruptor eléctrico, desconecta la máquina.

La magnitud del esfuerzo de flexión se deduce de la flecha de la probeta, pero para conseguir una medición exacta, el brazo del soporte S se ha construido de manera

que tenga cierta elasticidad y va dotado de un espejito L . Enviando a este espejito un rayo luminoso y leyendo en un antejo dotado de escala los desplazamientos de dicho rayo, se puede calcular directamente el momento de flexión.

Con esta máquina, que se construye en dos tipos, se pueden ensayar probetas hasta cuatro milímetros de espesor y 30 de anchura.

B). — Ensayos dinámicos de piezas y conjuntos

Vibraciones de torsión en los cigüeñales de los motores de Aviación. — Un caso palpable del efecto perjudicial de las vibraciones, se presentó con motivo del aterrizaje forzoso del *Graff Zeppelin* en el valle del Ródano, por parada sucesiva de los motores, a consecuencia de la rotura de los cigüeñales. Esta avería, que pudo originar una catástrofe, dió lugar a una investigación científica muy concienzuda, en la que el D. V. L. practicó numerosos ensayos en averiguación de la causa que hubiera podido motivarla. El resultado de dichos ensayos fué la conclusión de que la rotura de los cigüeñales era motivada por las vibraciones de torsión que se producen en todos los motores, y con importancia más marcada en los de seis cilindros en línea. Como en los motores de Aviación las piezas trabajan a coeficientes muy elevados con el fin de reducir el peso, la mencionada rotura se produce con frecuencia y para evitarla se precisará reforzar extraordinariamente el cigüeñal, lo que conduciría a pesos inadmisibles en Aviación, o destruir dichas vibraciones, para lo cual se han construido *amortiguadores* de vibraciones torsionales, que se montan en la prolongación del cigüeñal. Esta última solución ha sido adoptada en Ale-

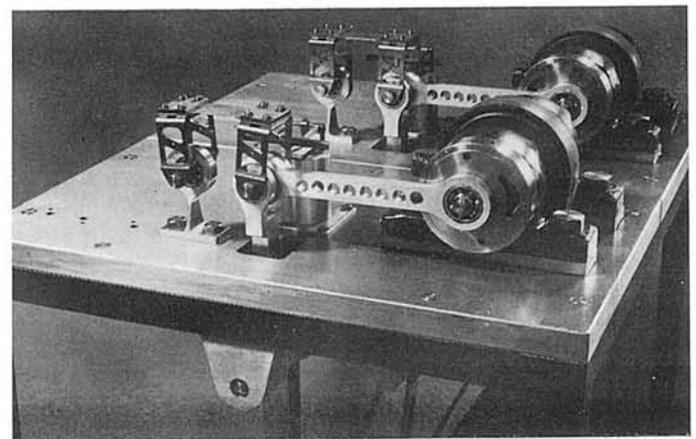


Fig. 4.

mania con gran éxito, pues desde entonces no se ha vuelto a presentar la citada avería.

El aspecto de la rotura de un cigüeñal por vibraciones torsionales es muy típico (fig. 5) y se caracteriza por su forma inclinada, casi a 45 grados, y por la disposición de las sucesivas líneas de fractura en forma de arcos concéntricos. Estas sucesivas líneas de rotura corresponden a las alternativas de marcha y reposo del motor, una vez

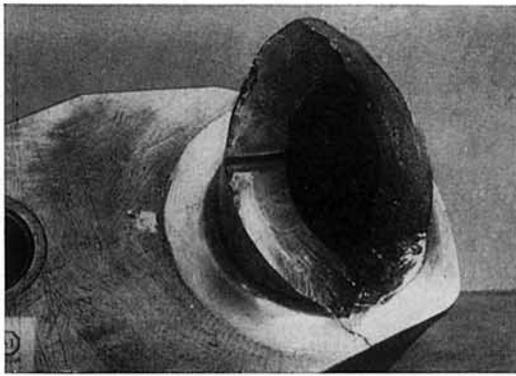


Fig. 5. - Sección de rotura de un cigüeñal.

iniciada la rotura, que suele tener lugar generalmente en los taladros de engrase, en cuyos bordes se produce una acumulación de tensiones.

Los ensayos que realizó el D. V. L. con este objeto, se efectuaron en una máquina tipo M. A. N. (fig. 6), que consiste esencialmente en una magneto *M*, cuyo inducido está animado de un movimiento alternativo de amplitud regable. La barreta o pieza a ensayar (en el caso presente un modelo de cigüeñal en escala 1/10) se fija en el soporte *E* y al inducido de la magneto. Un dispositivo permite contar el número de vibraciones e interrumpir automáticamente el ensayo al producirse la rotura. El brazo *B*, cargado de pesos, que se aprecia en la figura, representa una carga estática de torsión.

Las roturas por vibraciones torsionales de los modelos de cigüeñales ensayados, presentaron exactamente el mismo aspecto que la de los cigüeñales rotos de los motores averiados y esta semejanza permitió identificar la causa de la rotura.

Ensayos dinámicos de largueros de ala

Siendo la construcción más generalizada en alas de aviones, el sistema de largueros y costillas, en el que los largueros se reparten los esfuerzos a que está sometida el ala, resulta del mayor interés conocer el comportamiento de aquéllos ante las fuerzas dinámicas a que dan lugar las vibraciones provocadas por las causas ya mencionadas.

Los largueros son generalmente de madera o metálicos y en este último caso pueden ser de acero, duraluminio o elektrón.

Como ya se ha dicho, los esfuerzos dinámicos producen acumulaciones locales de tensión en determinados puntos (cambios de sección, aligeramientos, taladros de remaches, etc.) en los que por este motivo se inicia la rotura de la pieza. En la construcción de madera se pueden evitar fácilmente dichas acumulaciones de tensión, por la facilidad que dicho material presenta a recibir formas de disminución gradual de sección y con el empleo de suplementos y refuerzos de formas convenientes. Además, como ya se ha expuesto, la madera es un material muy apto para resistir a las vibraciones.

En las construcciones metálicas de aviones resulta difi-

cil evitar las acumulaciones locales de tensión en las piezas, especialmente cuando se utilizan chapas delgadas, unidas por remaches, en los bordes de cuyos agujeros se producen aquellas acumulaciones. En este sentido presenta una cierta ventaja el empleo de la soldadura en las construcciones de acero, ya que evita los orificios.

También resulta conveniente el elektrón por permitir secciones mayores a igualdad de peso y resistencia, y, además, porque se presta fácilmente a la variación gradual de forma.

Lo expuesto no significa que los largueros metálicos construidos hasta hoy no tengan la resistencia dinámica suficiente, pero los ensayos realizados han permitido deducir que dicha resistencia dinámica no está en relación con la estática y que debe tenderse a aumentar aquélla por un perfeccionamiento de los métodos de construcción.

Hipótesis de carga

La realización de un ensayo dinámico se basa en los extremos siguientes:

- 1.º Distribución de las cargas dinámicas.
- 2.º Magnitud de la carga dinámica inicial.
- 3.º Carga inicial estática a que ha de someterse la pieza.
- 4.º Determinación de la resistencia permanente, o sea del coeficiente de carga dinámica con el cual los esfuerzos son tales que la pieza puede resistir un número cualquiera de cargas alternativas.

1.º *Distribución de las cargas dinámicas.* — Los esfuerzos dinámicos debidos a las vibraciones que se originan en vuelo, no son fáciles de reproducir en los ensayos, y por esta causa los realizados por el D. V. L. con largueros, se han efectuado provocando solamente vibraciones propias que pueden variarse fijando al larguero

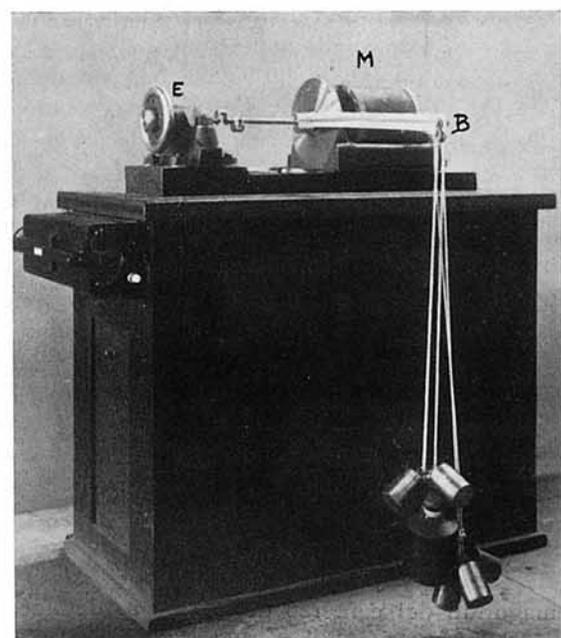


Fig. 6. - Maquetas de cigüeñales en pruebas.

otras masas adicionales. En dichos ensayos no se han empleado masas adicionales, pero sí se han tenido en cuenta las masas correspondientes a las guías paralelas del larguero, cuyo objeto es conseguir que éste no vibre más que en su plano principal; estas masas corresponden aproximadamente a las masas de la construcción interior del ala (montantes interiores, costillas) que están fijas al larguero.

Queda por considerar la influencia de las masas debidas a la carga inicial estática, pero como se verá más adelante y por la forma de suspensión elástica de la misma, los movimientos de estas masas son tan pequeños que pueden despreciarse, y, por consiguiente, los esfuerzos dinámicos adicionales a que dichas masas pudieran dar lugar.

2.º *Magnitud de los esfuerzos dinámicos.* — La magnitud de los esfuerzos dinámicos del larguero debidos a las vibraciones, se caracteriza por la amplitud de aquéllas en el extremo del mismo. Con objeto de tener alguna orientación sobre la magnitud de carga a aplicar se realizaron con uno de los largueros unos ensayos preliminares, y como resultado de los mismos se decidió adoptar para todos los largueros, como *primera carga dinámica*, la correspondiente a la amplitud $a = 2,5$ centímetros.

Todos los largueros que eran de la misma resistencia estática, resistieron sin romper con la primera carga dinámica, 2.000.000 de vibraciones, pasándose después a las siguientes cargas, aumentando la amplitud vibratoria del extremo.

3.º *Carga inicial estática.* — La carga inicial estática adoptada fué la correspondiente al factor de carga $n = 1,25$, es decir, algo superior a la carga correspondiente al caso de vuelo normal.

4.º *Determinación de la resistencia permanente.* — El procedimiento para determinar la resistencia permanente requiere un crecido número de largueros idénticos de la misma construcción y resistencia estática, circunstancia que es imposible de realizar. Se empezaría por aplicar la *primera carga dinámica* a uno de ellos y se prolongaría el ensayo hasta un número de vibraciones después del cual no pueda esperarse la rotura con esta carga. A continuación deberá ensayarse un segundo larguero bajo la *segunda carga dinámica* (algo mayor que la primera) y en las mismas condiciones, y se continuará con otros largueros y otras tantas cargas crecientes, hasta llegar a la rotura por fatiga. La última carga para la cual el larguero no ha roto es aproximadamente la resistencia permanente, y decimos aproximadamente, porque prácticamente no se podrán realizar dos largueros del mismo tipo que resulten idénticos. Además, aunque esto fuera posible, como los esfuerzos alternativos a que está sometido el larguero del avión en vuelo o rodando son tan irregulares, la resistencia permanente deducida de los ensayos no representa propiamente la de aquél.

Por estas razones, en lugar de utilizar un larguero para cada grado de carga, se empleó un solo larguero y se le fué sometiendo a cargas alternativas crecientes gradualmente hasta llegar a la rotura. La resistencia permanente obtenida de esta forma es algo superior a la debida, porque los aumentos lentos de carga alternativa mejoran el ma-

terial con relación a su resistencia dinámica, pero este procedimiento resulta más económico y rápido y suficientemente aproximado.

Disposición de los ensayos

La disposición del ensayo se puede apreciar en la figura 7. Los largueros que pertenecen al ala superior de un biplano arriostrado, se montan en una disposición que

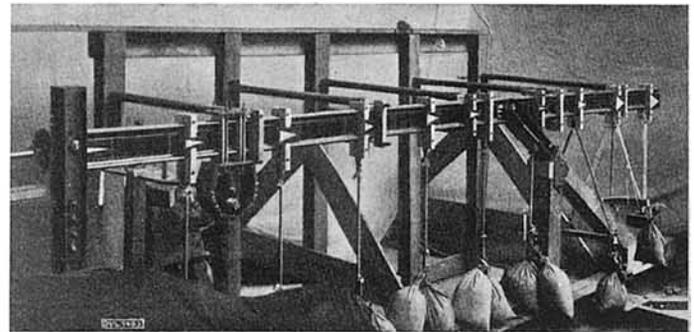


Fig. 7.

corresponde a la del avión invertido. El herraje extremo del larguero se une a una pesada armadura de hierro de 100 toneladas de peso aproximado. El cable principal de arriostramiento, que en la posición invertida del avión va oblicuamente hacia arriba a unirse al fuselaje, ha sido sustituido por un tornapunta dirigido oblicuamente hacia abajo y a la derecha, que se sujeta a un caballete rígido de madera, anclado en la cimentación de la nave. Este apoyo resulta por consiguiente muy duro, pero se ha comprobado que esta dureza permite una mejor realización del ensayo. Las tentativas que se hicieron colocando tacos de goma para que el apoyo fuese más elástico, condujeron a un fracaso. Los ensayos de vibración con montaje elástico, sólo se pueden ejecutar con todo el avión o con piezas simétricas.

Para que el larguero no pueda volcar, vibrar ni romperse lateralmente, se utilizan unas guías paralelas, articuladas a un bastidor vertical y al larguero, formando paralelogramos articulados. Como ya se ha indicado anteriormente, las masas de estas guías corresponden a las masas de la construcción interior del ala fijas al larguero y en este sentido deben ser consideradas, dando más realidad a las condiciones del ensayo.

Vibradores. — Para provocar las vibraciones en los largueros se utiliza un *vibrador* giratorio, que está constituido por una o dos masas giratorias desequilibradas. En los vibradores simples o de una sola masa, ésta puede ser un brazo que gira alrededor de uno de sus extremos o un disco al que se fijan masas excéntricas. El movimiento es producido por un motor eléctrico y transmitido por un eje flexible. El número de vueltas del motor, que es el de vibraciones, se mide por medio de un contador acoplado a aquél. Este vibrador simple excita vibraciones en todas las direcciones de su plano de giro, pero esto no perjudica si se monta próximo al apoyo o soporte extremo.

El vibrador doble (fig. 8), que es más pesado y voluminoso, está formado por dos ruedas dentadas U_1 y U_2 a las que se pueden fijar masas desequilibradoras variables M_1 y M_2 . La rueda de accionamiento Z recibe el movimiento de un motor eléctrico por una transmisión flexible B y engrana constantemente con la rueda U_2 . La rueda U_1 , montada sobre cojinetes regulables L , puede engranar bien con la rueda U_2 , bien con la Z ; en el primer caso las dos ruedas girarán en sentido inverso, y en el segundo lo harán en el mismo sentido. En los ensayos de largueros, la rueda U_1 era accionada por la U_2 y se comprende que si las masas M_1 y M_2 son iguales y están dispuestas simétricamente con relación a la tangente común a las circunferencias

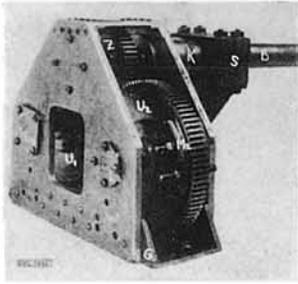


Fig. 8.

de contacto, la rotación inversa de las ruedas sólo determinará fuerzas alternativas de intensidad variable, dirigidas siempre en la dirección de dicha tangente, y, por consiguiente, si el vibrador se fija al larguero de forma que esta línea sea normal al mismo, los esfuerzos alternativos transmitidos al larguero serán sólo perpendiculares a su eje.

En todos los casos resulta conveniente situar el vibrador muy próximo a su apoyo.

Oscilómetros o triángulos de medida.—Para medir la amplitud vibratoria en diferentes puntos del larguero, el D. V. L. se vale de unas cartulinas (fig. 9) en las que se hallan representados unos triángulos isósceles. Fijando estas cartulinas u *oscilómetros* en los puntos cuya amplitud vibratoria se desea medir, de manera que la base sea paralela a la dirección de las fuerzas alternativas, los desplazamientos del vértice opuesto a aquélla miden la amplitud.

El principio fundamental de este sistema de medida es el siguiente:

Sea el triángulo ABC (colocado sobre un punto que vibra en el sentido AB) en el que la base AB es igual a la altura HC . Por efecto de la vibración este triángulo se desplazará alternativamente paralelo a AB y si ABC y $A'B'C'$ son las posiciones extremas, es indudable que la amplitud vibratoria será $AA' = BB' = CC'$.

Si la frecuencia no es muy pequeña, el efecto aparente de la vibración será el de verse dos triángulos ABC y $A'B'C'$ que se cortan en un punto O' , pero como $CC' = OO' = hC$, se deduce que si se divide HC en n partes y por cada división se traza una raya paralela a la base AB , cuando los triángulos se corten en un punto O' situado sobre la raya OO' , distante HC/n de C , la amplitud vibratoria será:

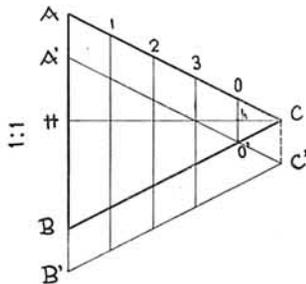


Fig. 9.

$$OO' = hC = \frac{1}{n} HC = \frac{1}{n} AB.$$

En el caso de la figura 9, $AB = 5$ centímetros, luego si dividimos HC en cinco partes, la amplitud será:

$$OO' = \frac{AB}{5} = 1 \text{ cm.}$$

Si además se divide el espacio comprendido entre las rayas $AB - 1 \cdot 1 - 2 \cdot 2$, etc., en cinco o en diez partes y se trazan otras tantas rayas paralelas a AB , cuando el punto de intersección de los triángulos se encuentra sobre una de esas rayas, se podrá conocer la amplitud vibratoria con una aproximación de 2 milímetros o de 1 milímetro, respectivamente.

Para mayor facilidad de lectura los trapecios $AB 11 - 1122$, etc., son coloreados en distintas tonalidades de gris.

Según la amplitud de oscilación probable en el punto donde se va a aplicar el oscilómetro, se utilizan diferentes triángulos en que el alargamiento (relación de altura a base) es mayor cuanto menor sea la amplitud. Estos alargamientos son números enteros para facilitar el dibujo de los triángulos, que debe ser muy exacto.

La figura 10 representa un triángulo de alargamiento

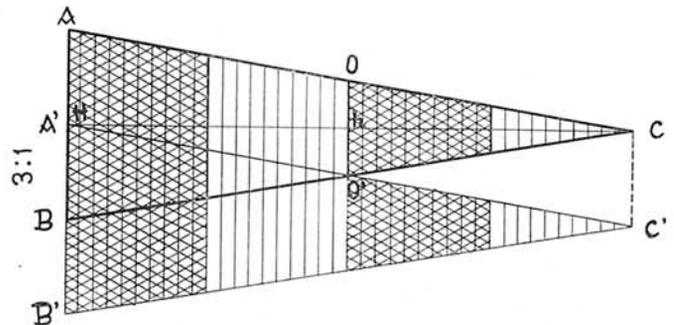


Fig. 10.

to 3 : 1. Siendo $AB = 4$ centímetros, como los triángulos se cortan en O' sobre la segunda raya, la amplitud será:

$$CC' = \frac{hC}{A'C} \times AB = \frac{1}{2} AB = 2 \text{ cms.}$$

Utilizando oscilómetros de gran alargamiento se pueden apreciar amplitudes de 1/10 de milímetro.

Extensómetros registradores.—Para comprobación de las tensiones alternativas calculadas, según los datos de los ensayos, se utilizan en algunos casos *Extensómetros registradores de rayado*, tipo D. V. L.

Como el principio de este instrumento es de gran aplicación en las investigaciones relacionadas con el material aeronáutico, juzgamos de interés su descripción. Responde su concepción a la finalidad de medir las deformaciones en su verdadera magnitud, suprimiendo las transmisiones intermedias que siempre originan errores, y registrando dichas deformaciones por medio del rayado de un diamante sobre una plaquita de vidrio. La lectura

de los diagramas registradores se efectúa valiéndose de un microscopio, al que puede acoplarse una cámara fotográfica para reproducir aquellos diagramas convenientemente ampliados.

En la figura 11 se representa el extensómetro completo, sin motor, montado sobre un trozo de tubo ovalado del que se quieren conocer las deformaciones. Para la fijación del extensómetro se utilizan bridas de forma variable con el objeto a ensayar.

El extensómetro está constituido por tres órganos esenciales, que son:

- Órgano transmisor, *t*.
- Órgano registrador, *r*.
- Órgano motor, *m*.

El órgano transmisor *t* es una vigueta fuerte y ligera, del mismo material, en general, que el del objeto a ensayar para eliminar los efectos de temperatura. Esta vi-

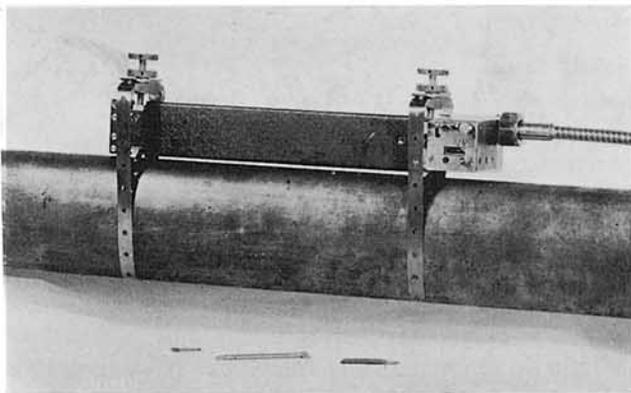
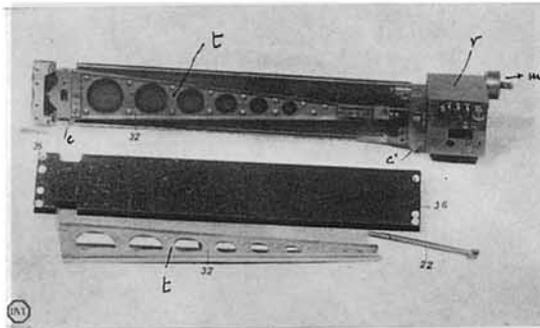


Fig. 11.

gueta lleva en un extremo la cuchilla *c*, que se apoya sobre el objeto y termina por el otro extremo en una punta de diamante. Una segunda cuchilla *c'*, cuya distancia a la cuchilla *c* es de 20 centímetros, se encuentra unida invariablemente al órgano registrador *r*.

El órgano registrador *r* consta de una plaquita de cristal negro que se desplaza normalmente a la dirección de las deformaciones a medir. El movimiento de esta plaquita es obtenido por un motor eléctrico, alimentado por una batería que permite mandar hasta diez extensómetros simultáneamente. La velocidad de desplazamiento de la plaquita se puede regular entre límites muy extensos.

El registrador lleva tres diamantes: uno que marca una

línea recta continua que sirve de eje de referencia, otro segundo diamante, ya mencionado anteriormente, unido al transmisor *t*, que marca las deformaciones y que en su posición inicial debe coincidir con la línea de referencia, y, finalmente, un tercer diamante mandado por un dispositivo magnético, que marca espacios de tiempo periódicos y conocidos.

Para los ensayos de larga duración se ha modificado el aparato registrador, sustituyendo la plaquita de vidrio por un cilindro de cristal animado de un movimiento simultáneo de rotación y traslación paralela a su eje.

Disposición de la carga estática. — Es muy importante la manera de suspender los pesos correspondientes a la carga estática, para conseguir que dichos pesos no produzcan cargas dinámicas adicionales por efecto de la vibración del larguero.

Como consecuencia de los ensayos realizados se ha deducido que la amortiguación es bastante buena utilizando una suspensión de cordón amortiguador adecuada. Para grandes cargas se utiliza el cordón amortiguador de 17 milímetros de diámetro, cargado a razón de 65 kilogramos por cordón. La longitud de éste conviene sea la mayor posible, pero se ha visto que es suficiente una longitud de 60 centímetros en el estado inicial del cordón descargado. Para pequeñas cargas se debe utilizar un cordón de cinco milímetros de diámetro con una carga de cuatro kilos por cordón.

Con una amplitud de vibración de cuatro centímetros el movimiento de la carga estática suspendida del punto que vibra con dicha amplitud no llega a 1/10 de milímetro, así es que prácticamente se pueden despreciar las fuerzas dinámicas adicionales debidas a la carga estática.

Interpretación de los ensayos

Si se considera dividido el larguero en *n* partes, y se supone conocida la masa correspondiente a cada una de estas partes, en las que se puede medir la amplitud vibratoria por medio de los *oscilómetros* o triángulos de medida fijados a ellas, es posible determinar las fuerzas de inercia y deducir de éstas los esfuerzos dinámicos que actúan sobre el larguero.

La fuerza de inercia en un punto vibrante de masa *m* es:

$$F = m \cdot g \cdot \text{Kilos}$$

Siendo *g* la aceleración.

La frecuencia *w* del movimiento vibratorio será:

$$w = \frac{2\pi n}{60},$$

en la que *n* es el número de vibraciones por minuto, medidas en el contador del vibrador.

Si *a* es la amplitud máxima medida en el punto de masa *m* por medio del oscilómetro, la ecuación de recorrido y tiempo será:

$$e = \frac{a}{2} \text{ sen } wt.$$

La velocidad:

$$v = \frac{de}{dt} = \frac{a}{2} w \cos wt.$$

Y la aceleración:

$$g = \frac{d^2e}{dt^2} = -w^2 \frac{a}{2} \sin wt.$$

El valor máximo de la aceleración, y por consiguiente de la fuerza de inercia F , se produce en el punto de inversión del movimiento en que la velocidad

$$v = \frac{a}{2} w \cos wt = 0,$$

lo que tiene lugar para $\cos wt = 0$ y $\sin wt = 1$.

La aceleración máxima será:

$$g_{max} = -w^2 \frac{a}{2}$$

y la fuerza de inercia máxima,

$$F_{max} = -m w^2 \frac{a}{2} = -m \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 \frac{a}{2} = -0,00548 a, m, n^2 [1]$$

En los ensayos de vibración de largueros efectuados por el D. V. L., se determinaron la distribución de las masas (incluyendo las del vibrador y guías paralelas) cuyas fuerzas correspondientes se hallan representadas en (a) figura 12, las líneas de amplitud vibratoria (esquema b) y la frecuencia, con cuyos datos se pueden calcular por la fórmula [1] las fuerzas dinámicas (esquema c), y, por consiguiente, los momentos de flexión, reacciones de apoyo, tensiones en los cordones y esfuerzos en las barras debidos a dichos esfuerzos (esquema d).

Es conveniente la comprobación de los resultados anteriores y para ello se pueden medir las tensiones en algunos puntos, colocando extensómetros registradores por rayado. La comparación de las tensiones registradas y calculadas ha sido muy satisfactoria, pues la diferencia no llega al 5 por 100 que se puede atribuir a las perturbaciones del aparato registrador por las malas condiciones de sujeción debidas a las grandes aceleraciones que tiene que sufrir. Por esta consideración no se pueden situar los extensómetros más que en sitios próximos a los soportes, pues la aceleración en el extremo del larguero llega a ser 23 veces la aceleración de la gravedad y proporcional a la amplitud en toda la longitud de aquél.

También puede comprobarse por el cálculo la línea de amplitud vibratoria medida. Esta curva puede calcularse conociendo las fuerzas de inercia y la curva de resistencias a la flexión deducidas de un ensayo estático, o bien conociendo las fuerzas de inercia y los números de influencia obtenidos, midiendo las flechas del larguero bajo una carga estática aislada móvil. Las comparaciones efectuadas de esta manera han demostrado una concordancia muy satisfactoria.

Resultados de los ensayos dinámicos con un larguero

de acero. — La disposición del ensayo se encuentra representada en la figura 7, en la que se ve el larguero articulado a la izquierda sobre la armadura de hierro y sujeto en el lugar del tirante por un tornapunta de péndulo (dirigido hacia el suelo de izquierda a derecha). Próximo al extremo articulado se ve montado el vibrador doble. También se distinguen las cinco guías paralelas para que la vibración sólo tenga lugar en el plano del lar-

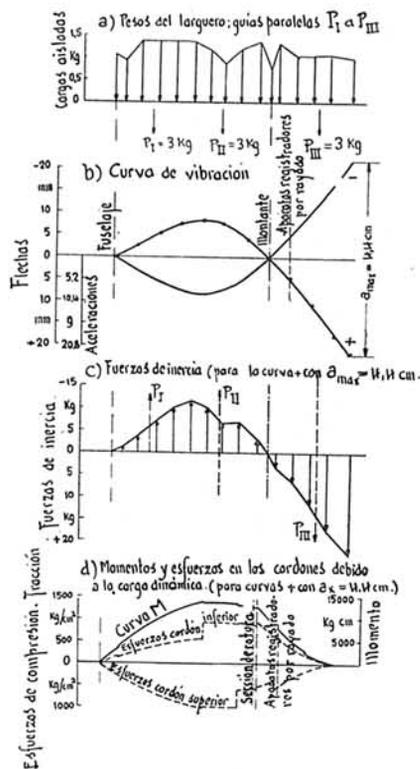


Fig. 12. — Larguero de acero. Resultado de las mediciones. Determinación de las aceleraciones y esfuerzos dinámicos. $W = 980$ mínimo -1 y $a = 4,4$ centímetros máximo.

guero, y finalmente se aprecian las cargas estáticas suspendidas por cordón amortiguador y los oscilómetros o triángulos de medida en diferentes puntos.

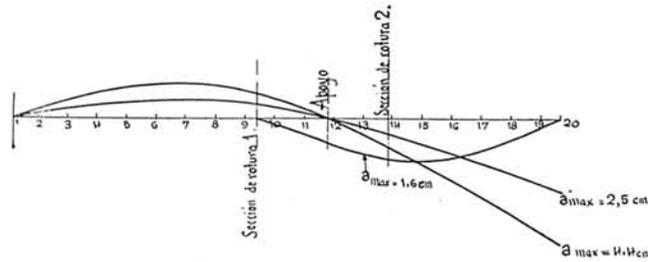
El larguero es en I y está construido con chapa de acero cromo-níquel delgada, de 125 kilogramos por milímetro cuadrado de resistencia a la tracción. Las uniones están hechas por remachado.

La figura 13 representa diferentes circunstancias y resultados del ensayo. En (a) se ve la distribución de cargas estáticas y en (b) las de las tensiones estáticas de los cordones. En el esquema (c) se representa la repartición de pesos correspondientes a las masas del larguero, del vibrador y de las guías paralelas. Las curvas de amplitud vibratoria, medida por los oscilómetros y las fuerzas de inercia deducidas de la fórmula [1], están trazadas en el esquema (d). Finalmente, en el esquema (e) están dibujadas las líneas correspondientes a las tensiones dinámicas de los cordones para una amplitud vibratoria máxima en el extremo del larguero de 4,4 centímetros y una frecuencia de 940 vibraciones por minuto.

Los resultados principales del ensayo se encuentran recopilados en el cuadro siguiente:

CUADRO NÚMERO 1

LARGUERO DE ACERO. LARGUERO ENTERO Y VOLADIZO. VIBRACIONES Y ESFUERZOS EN LA SECCIÓN DE ROTURA.



ENSAYO	Frecuencia 1/ min.	Número de vibraciones n 10^5	Amplitud máxima a cm.	CORDONES	SECCIÓN DE ROTURA 1				SECCIÓN DE ROTURA 2			
					Estático Kg. por mm ²	Dinámico Kg. por mm ²	Superpuesto Kgs. por mm ²		Estático Kg. por mm ²	Dinámico Kg. por mm ²	Superpuesto Kgs. por mm ²	
Larguero entero	940	2,15	2,5	Cordón sup.....	- 8,6	\mp 9,0	- 17,6	+ 0,4	- 11,4	\mp 5,2	- 16,6	- 0,2
				» inf.....	+ 1,6	\pm 8,1	+ 9,6	- 0,5	+ 11,4	\pm 5,2	- 16,6	+ 0,2
Trozo de larguero	1.600	0,058	1,6	Cordón sup.....	- 8,6	\mp 15,4	- 24,0	+ 6,8	- 11,4	\mp 8,9	- 20,3	- 2,5
				» inf.....	+ 1,6	\pm 13,9	+ 15,5	- 12,3	+ 11,4	\pm 8,9	+ 20,3	+ 2,5

Las secciones de rotura se encuentran en el punto de cambio máximo de los esfuerzos de tensión y compresión de los cordones. Como puede observarse en el cuadro, la rotura se produjo después de 700.000 vibraciones, con una amplitud máxima de 4,4 centímetros bajo un esfuerzo dinámico de:

$$\pm 15,4 \text{ kgs. por mm}^2.$$

La superposición de esfuerzos estáticos y dinámicos llega a un esfuerzo total máximo de:

$$- 24,0 \text{ kgs. por mm}^2.$$

Cifra que resulta muy baja con relación a la de 125 kilogramos por milímetro cuadrado que representa la resistencia del material.

La resistencia permanente a la vibración representa un porcentaje de:

$$\frac{15,4}{125} = 0,125,$$

es decir, sólo el 12,5 por 100 de la resistencia primitiva del material.

La rotura se produjo en la sección 1 y como quedó entero todo el voladizo se realizó un segundo ensayo con él, como viga apoyada en dos puntos. La rotura de este ensayo se produjo en la sección 2, solamente después de 58.000 vibraciones, bajo un esfuerzo dinámico de:

$$\pm 16 \text{ kgs. por mm}^2.$$

El aspecto de la rotura es el mismo en las secciones 1 y 2

(fig. 14), y esto es lógico, puesto que ambas son análogas en su constitución, remachado, etc. En estas secciones, debajo del cordón existe una cubrejunta de refuerzo, que empieza inmediatamente a la izquierda de la línea de los tres remaches y se extiende hacia la derecha cogida por remaches al tresbolillo. En esta parte el cordón se encuentra descargado por el esfuerzo, pero en cambio hacia la izquierda se producen acumulaciones de tensión en los

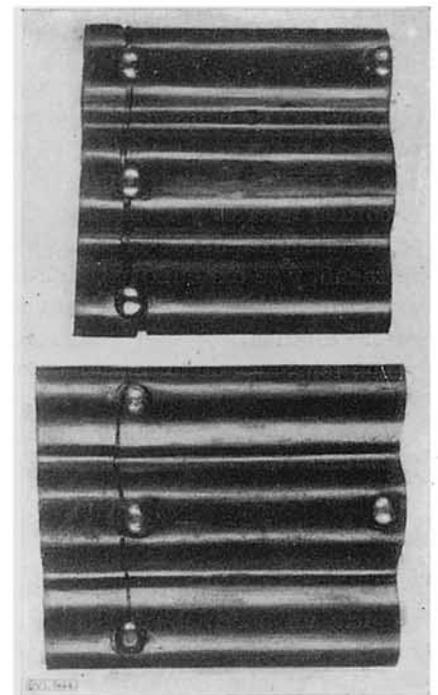


Fig. 14.

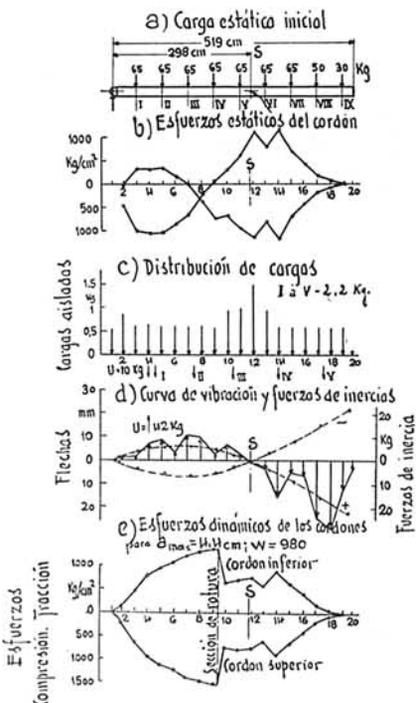


Fig. 13. - Larguero de acero. Cargas estática y dinámica. Determinación de la resistencia a la flexión y de los esfuerzos.

orificios de los remaches por los que se transmiten los esfuerzos del cordón al refuerzo; este último se termina en corte recto, perpendicularmente a las ondulaciones de la chapa del cordón y, por ello, es esta primera fila de remaches la que resulta sometida a esfuerzos excesivos en los bordes de sus orificios, lo que determina la rotura. Por otra parte, la ondulación de las chapas da lugar a un remachado defectuoso, con apriete deficiente, ocurriendo además en las partes cóncavas de la ondulación, que los

bordes cortantes de las cabezas de los remaches se incrustan en la chapa, produciendo una entalladura perjudicial a la resistencia.

Resultado de los ensayos dinámicos con un larguero de madera. — El ensayo se realizó con un larguero de construcción normal, en cajón. Los cordones eran de pino spruce y los costados de chapa contrapeada de abedul, con la fibra en dirección diagonal.

El cuadro siguiente recopila los resultados del ensayo:

CUADRO NÚMERO 2

LARGUERO DE MADERA (SPRUCE). VIBRACIONES Y ESFUERZOS EN LA SECCIÓN DE ROTURA.

Tiempo T min.	Frecuencia I/ min.	Número de vibraciones n	Amplitud máxima a cm.	CORDONES	ESFUERZOS DE LOS CORDONES EN LA SECCIÓN DE ROTURA				TEMPERATURA	Humedad relativa del aire en %
					Estático Kg. por cm ²	Dinámico Kg. por cm ²	Superpuesto Kgs. por cm ²			
Ensayo preliminar 96	1020-1130	rd. 1,03 por 10 ⁵	1,85	Cordón sup. > inf.	— —	— —	— —	— —	—	—
1005	1120	11,25 por 10 ⁵	3,85	Cordón sup. > inf.	- 15 + 15	± 75 ± 75	- 90 + 90	+ 60 - 60	4 ÷ 9,4	62 ÷ 76
565	1060	6,00 por 10 ⁵	6,40	Cordón sup. > inf.	- 15 + 15	± 125 ± 125	- 140 + 140	+ 110 - 110	7 ÷ 12,8	62
130	1035	1,35 por 10 ⁵	11,40	Cordón sup. > inf.	- 15 + 15	± 225 ± 225	- 240 + 240	+ 210 - 210	11	63

Número total de vibraciones: 1,963 × 10⁶.

La amplitud máxima vibratoria se fué aumentando hasta el valor de 11,4 centímetros para el que se produjo la rotura con 135.000 vibraciones, siendo el total de vibraciones soportadas de 1.963.000. Dicha rotura tuvo lugar en el cordón inferior y su aspecto se aprecia en la figura 15; se inicia a la izquierda en forma lisa, como recortada con serrucho, y se extiende hacia el otro lado del cordón con aspecto astillado, cada vez más basto, similar al de una rotura estática.

Las tensiones de los cordones antes de la rotura eran:

Cordón superior — 240 kilogramos por cm² (sin rotura).
 > > + 210 > > >
 > inferior + 240 > > (rotura).
 > > — 210 > > >

Ya se ha indicado que el número de vibraciones que soporta un material sin romper, depende de la magnitud del esfuerzo alternativo; al disminuir este esfuerzo aumenta el número de vibraciones que resiste dicho material. Cuando dicho esfuerzo es inferior a la *resistencia permanente*, el material no rompe por muy grande que sea el número de vibraciones a que se le someta. Por lo que se refiere al spruce, los ensayos del D. L. V. han demostrado que el número crítico de vibraciones es de 2.000.000.

En el ensayo del larguero, con una carga dinámica de ± 230 kilogramos por centímetro cuadrado, se produjo la rotura con 135.000 vibraciones. Dicha carga es superior a la resistencia permanente del spruce, que según otros ensayos de la Sección de Materiales del D. V. L. es

de ± 190 kilogramos por centímetro cuadrado, es decir, un 20 por 100 inferior.

Siendo la resistencia del spruce a la compresión de 420 kilogramos por centímetro cuadrado, la relación de la

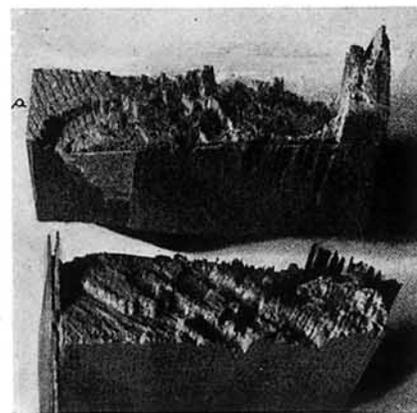


Fig. 15.

resistencia permanente del larguero a la resistencia estática del material de sus cordones será:

$$\frac{190}{420} = 0,452.$$

Este valor concuerda con los determinados por Angström y Kraemer en los ensayos de flexión alternativa del spruce y demuestra que la resistencia permanente del lar-

guero es la misma que la del material de sus cordones y que, por consiguiente, la construcción del larguero es adecuada.

Conclusiones

1.^a La madera se comporta bien desde el punto de vista dinámico y los largueros construídos con este material, con variaciones de sección bien estudiadas y con encoladuras bien ejecutadas, poseen una resistencia permanente aproximada del 45 por 100 de la resistencia a la compresión de la madera.

2.^a La resistencia permanente de los largueros metálicos ensayados es muy baja con relación a la resistencia

primitiva del material de que estaban construídos (12,5 por 100 para un larguero en cajón de chapa ondulada de 125 kilogramos por milímetro cuadrado, remachada), y esto debido a las acumulaciones de tensión producidas por los cambios bruscos de sección, disposición de los cubrejuntas y herrajes, a la situación de los remaches y al proceso de ejecución del larguero. Deben, pues, perfeccionarse las formas y procedimientos constructivos de estas estructuras para elevar la resistencia permanente, pues de nada sirve mejorar las características de los materiales aislados si en el estado de utilización en piezas complejas y conjuntos, éstos rompen con cargas dinámicas muy bajas.

Los nuevos records establecidos por la F. A. I.

ENTRE los acuerdos tomados en la reciente reunión de París figura la restricción del número de records oficiales, cuya multiplicidad se juzgaba ya inconveniente. He aquí los records que subsisten:

AEROPLANOS LIGEROS

1.^a categoría. — Multiplazas de peso inferior a 560 kilogramos.

Distancia en línea recta sin escalas.

Altura.

Velocidad sobre 100 kilómetros. — Idem sobre 1.000. — Idem sobre 2.000.

2.^a categoría. — Monoplazas de peso inferior a 450 kilogramos.

Los mismos de la categoría anterior.

3.^a categoría. — Multiplazas de peso inferior a 280 kilogramos.

Distancia en línea recta sin escalas.

Altura.

Velocidad sobre 100 kilómetros. — Idem sobre 500. — Idem sobre 1.000.

4.^a categoría. — Monoplazas de peso inferior a 200 kilogramos.

Los mismos de la categoría anterior.

HIDROAVIONES LIGEROS

1.^a categoría. — Multiplazas de peso inferior a 680 kilogramos.

2.^a categoría. — Monoplazas de peso inferior a 570 kilogramos.

3.^a categoría. — Multiplazas de peso inferior a 350 kilogramos.

4.^a categoría. — Monoplazas de peso inferior a 250 kilogramos.

Los records reservados a estas cuatro categorías se corresponden, respectivamente, con los de las cuatro categorías de aviones arriba citadas, sin otra diferencia que la que se advertirá entre los pesos límites señalados para unos y otros.

ANFIBIOS LIGEROS

Categoría única. — Multiplazas de peso inferior a 750 kilogramos.

Los mismos records reservados a los aviones ligeros de 1.^a categoría.

AEROPLANOS

Hasta la homologación de records nuevos ajustados a las precedentes normas, se computarán como de las categorías actuales los obtenidos por aeronaves de las categorías correspondientes a la clasificación que desaparece, en la forma siguiente:

AEROPLANOS LIGEROS

1.^a categoría. — Biplazas hasta 400 kilogramos.

2.^a categoría. — Biplazas hasta 280 kilogramos.

3.^a categoría. — Monoplazas de 200 a 350 kilogramos.

4.^a categoría. — Monoplazas de menos de 200 kilogramos.

Se conservan provisionalmente los actuales records correspondientes a estas cuatro categorías, incluyendo los de duración en circuito cerrado y distancia en circuito cerrado.

Como se advertirá, se elevan los límites de peso en la 1.^a categoría de aviones, desde 400 a 560 kilogramos; la 2.^a categoría pasa a ser 3.^a, sin variación de peso-límite; la 3.^a pasa a ser 2.^a, con 100 kilogramos más de peso, y la 4.^a no sufre alteración alguna.

En cuanto a los hidros, se eleva el peso de la 1.^a categoría desde 500 a 680 kilogramos; la 2.^a pasa a ser 3.^a, conservando el peso; la 3.^a pasa a ser 2.^a, elevando el peso de 437,50 a 450 kilogramos, y la 4.^a no sufre alteración.

Para lo sucesivo desaparecen, para los aviones e hidros ligeros, los records de duración y distancia en circuito cerrado, creándose, en cambio, los de velocidad sobre 1.000 y 2.000 kilómetros, o sobre 500 y 1.000, según las categorías.