

Aerotecnia

Las deformaciones elásticas de los émbolos y su influencia en la resistencia de los mismos

Por ANTONIO GUERENDIAIN

Subdirector de Elizalde, S. A.

EN todo cuanto sigue nos vamos a referir a los émbolos de motores de explosión contruidos en aluminio y sus aleaciones y de un diámetro grande, como el que se emplea corrientemente en los motores de Aviación.

Las durísimas condiciones de trabajo a que está sometido el émbolo en esta clase de motores, hacen de él una pieza delicadísima, tal vez la más delicada de todo el motor.

La disimetría en la repartición de las masas que forman la pieza, y las grandes diferencias de estado térmico en que se encuentran los diferentes puntos de la misma, hacen de ella una pieza muy rebelde a las previsiones del cálculo teórico, que no puede resolver, en la mayoría de los casos, con la garantía y seguridad que serían de desear, el problema de la resistencia del émbolo para aguantar, en buenas condiciones, los esfuerzos a que le somete el funcionamiento en el motor de explosión.

Por esta razón, es práctica obligada, cuando se trata de definir y adoptar un émbolo, proceder con cautela, y realizar, después de contruida la pieza según las indicaciones del cálculo teórico, y de la experiencia pretérita, una serie de ensayos experimentales encaminados a estudiar el comportamiento de la pieza en funcionamiento en el motor, para ir introduciendo en ella las modificaciones que vaya indicando la práctica en este período de experimentación, antes de adoptar el émbolo definitivo, procurando, siempre que esto sea posible, partir de un émbolo semejante o lo más parecido posible a otro que haya dado buen resultado en un motor de condiciones análogas a las del motor al que se destina.

Si siguiendo esta práctica, al hacer las pruebas preliminares para la homologación del motor *Dragón* de la casa Elizalde, se adoptó un émbolo semejante a otro que la misma casa empleaba, y sigue empleando, en otro motor de su fabricación. El émbolo para el motor *Dragón*, de

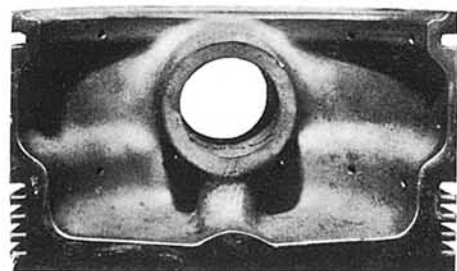


Fig. 1.ª

150 milímetros de diámetro, tenía la disposición que puede verse en la figura 1.ª, que es el corte de una pieza original.

A pesar de haberse hecho minuciosamente los cálculos,

y de que el nuevo émbolo era en todo semejante a otro bien experimentado y sancionado por la práctica, el nuevo émbolo en los ensayos experimentales presentó una serie de averías sistemáticas, caracterizadas por la aparición de una grieta en el borde inferior de uno de los flancos, cuya grieta iba creciendo y extendiéndose paulatinamente hasta producir el arrancamiento de la pared lateral y destrucción del émbolo. La figura 2.ª muestra un émbolo en estas condiciones, en el que puede verse perfectamente la grieta, ya en una fase muy adelantada y a punto de producir la rotura completa de la pared lateral.



Fig. 2.ª

Antes de seguir adelante y convencidos de la necesidad de modificar el émbolo, decidimos comparar el nuestro con los émbolos de otros motores, de condiciones de funcionamiento similares a las del motor *Dragón*, y que por estar sancionados por la práctica merecieran considerarse como correctamente concebidos y satisfactoriamente realizados. Para ello nos procuramos diversos émbolos de diferentes procedencias, correspondientes a motores europeos y americanos de los más utilizados, y de reconocida y bien cimentada fama.

La comparación que nosotros deseábamos realizar se refería más que al detalle de la disposición de los distintos elementos resistentes de la pieza, y de los espesores de material admitidos, a la forma especial de reaccionar de cada uno de los émbolos ensayados, colocado en las condiciones de trabajo y caracterizada por las deformaciones elásticas experimentadas.

No es fácil, y menos con los medios que teníamos a nuestro alcance, reproducir artificialmente y de manera satisfactoria las condiciones de funcionamiento en que se encuentra un émbolo bajo la acción de la presión de los gases de la explosión, y de modo que sea factible el estudio y medida de las deformaciones producidas en él; pero admitimos *a priori*, que colocando todos los émbolos en las mismas condiciones de experimentación, los resultados

serían comparables y podrían servir de orientación en la marcha de la experimentación general emprendida.

Empleamos para nuestro objeto una máquina Amsler de ensayo de materiales por tracción y compresión (figura 3.^a), y para colocar los émbolos en las condiciones más

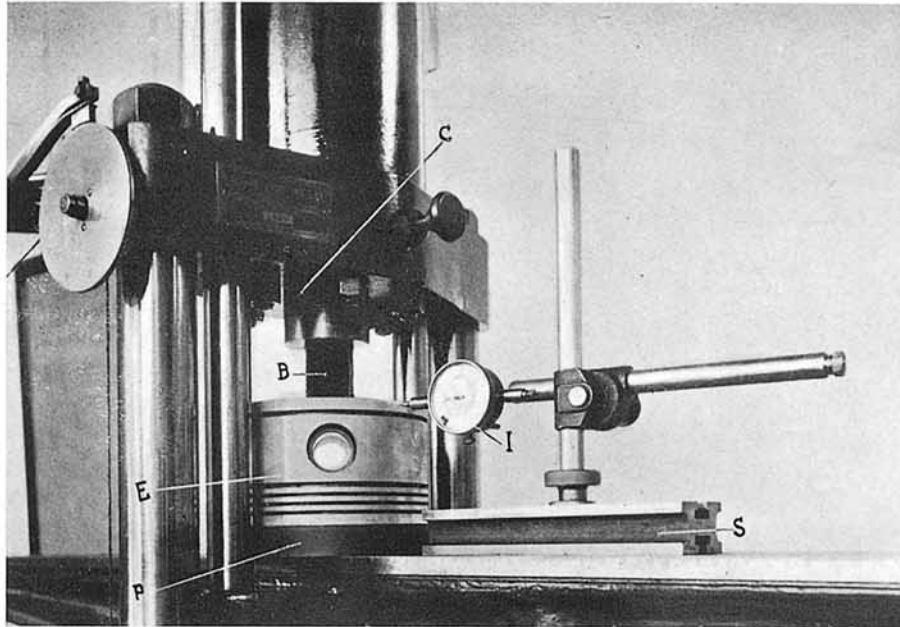


Fig. 3.^a

parecidas a las del funcionamiento real que nos fué posible, dispusimos el émbolo *E* boca arriba apoyado por su fondo mediante una gruesa placa de acero *P*, perfectamente plana sobre la mesa de la máquina. Articulada con su correspondiente eje, dispusimos una biela corriente *B*, cortada a una longitud de unos diez centímetros, según un plano que servía para establecer contacto con la parte superior del cuerpo de la máquina *C*.

Ejerciendo un esfuerzo de compresión por medio de la máquina entre la mesa y la parte superior, el émbolo se encontraba comprimido aproximadamente en las condiciones de trabajo. Las deformaciones de los diferentes puntos de la boca podían leerse mediante un indicador de cuadrante *I*, colocado en su soporte *S* fijo en la mesa de la máquina.

Aumentando gradualmente la carga hasta llegar a la máxima equivalente a la fuerza desarrollada por la explosión, y estudiando sucesivamente las deformaciones de los distintos puntos de

la boca, pudimos determinar la forma que adquiere ésta bajo la carga y durante los períodos de aumento y disminución de la fuerza aplicada.

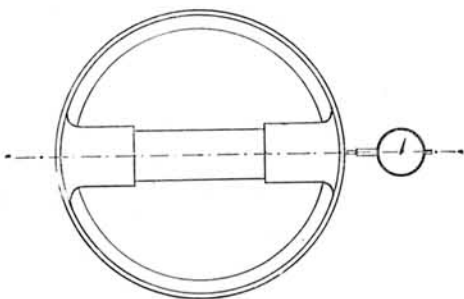


Fig. 4.^a

Comenzó la experimentación por el émbolo de un motor americano de uso muy extendido, haciéndose la observación en el punto de la boca correspondiente a la dirección del eje de biela, tal como indica el croquis de la figura 4.^a La deformación observada en este punto fué una contrac-

ción o reducción del diámetro de la boca, gradualmente creciente durante todo el período de crecimiento de la carga, y que llegó a alcanzar el valor máximo de seis centésimas de milímetro.

Parecía natural, a primera vista, que existiendo una contracción en el sentido del eje de biela, existiera una dilatación en el sentido normal, con lo cual la boca del émbolo adoptara la forma que aparece en el croquis de la figura 5.^a Hecha una nueva experimentación midiendo la deformación a 90 grados del punto anteriormente observado, se halló una contracción de 0,04 milímetros en lugar de la dilatación esperada, y completando la observación en diferentes puntos del perímetro convenientemente espaciados, llegamos al conocimiento de que la figura adoptada por la boca del émbolo bajo la carga máxima era la que aparece en la figura 6.^a, habiéndose mantenido siempre en forma análoga

y sin mostrar *en ningún momento ni en ningún punto dilatación o expansión alguna durante todo el período de crecimiento de la carga*. (Las deformaciones se han representado amplificadas 200 veces.)

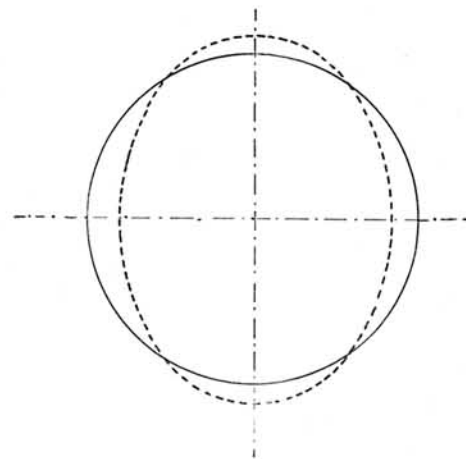


Fig. 5.^a

Repetido el anterior experimento con nuestro émbolo en la misma forma descrita dió, para la carga máxima, la figura de deformación que indica el rayado vertical de la figura 7.^a, pero *durante el período de crecimiento de la carga* se habían presentado en la región del eje de biela dilataciones que habían llegado al máximo indicado por el rayado horizontal.

Al llegar, pues, al máximo de la carga nuestro émbolo,

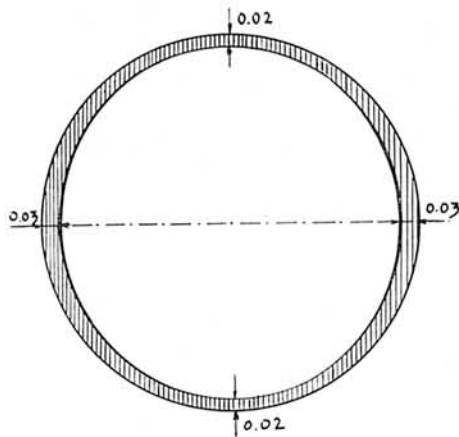


Fig. 6.a

experimentaba una deformación de *contracción* en todos los puntos de la periferia de la boca, siendo ésta *menor en la región del eje de biela, que en la región de las paredes laterales, al contrario de la deformación experimentada por el émbolo anteriormente ensayado*. Además, durante el período de crecimiento de la carga aparecía en nuestro émbolo una dilatación no observada anteriormente en el otro émbolo.

Anotadas estas diferencias y antes de entrar en el examen e interpretación de los resultados, quisimos terminar la experimentación con los seis émbolos que habíamos logrado reunir, y el resultado de ella fué que *todos los émbolos ensayados*, que, como hemos dicho, pertenecían a motores bien experimentados y sancionados por la práctica, dieron, a excepción de uno, curvas análogas a las del émbolo que primeramente habíamos probado, es decir, curvas de deformación regular, de mayor o menor amplitud,

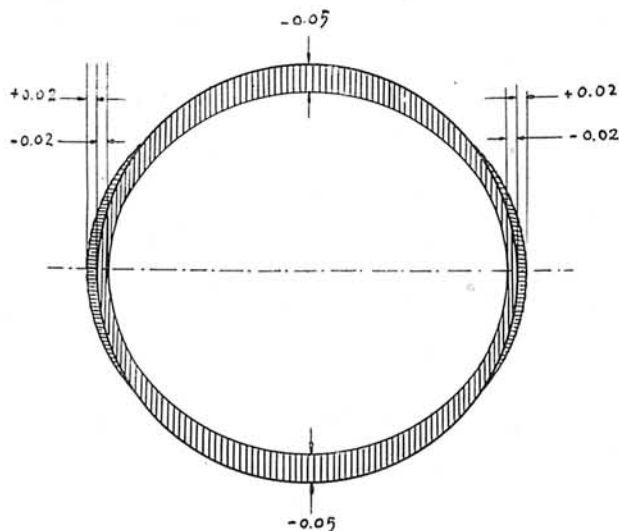


Fig. 7.a

pero de contracción continuamente decreciente desde la región del eje de biela hasta las paredes laterales, adoptando la forma de una O, sin que en ningún momento se presentara dilatación en ningún punto.

La excepción anteriormente indicada correspondía al

émbolo de un motor americano cuya deformación presentamos en la figura 8.^a Como puede verse, la forma final bajo la carga máxima *es también en figura de O* con el máximo de contracción *en el sentido del eje de biela*, pero durante el período de crecimiento de la carga, se han presentado dilataciones en la región colocada a 90 grados del citado eje.

Dejando a un lado esta excepción, admitimos como bueno que la deformación en forma de O es la más adecuada para asegurar una buena resistencia del émbolo para contrarrestar los esfuerzos a que le somete el trabajo en el motor de explosión. Razonando sobre el caso, veremos, efectivamente, que cuando la deformación es de contracción uniforme, el material de las paredes del émbolo resulta únicamente sometido a esfuerzos de compresión, mientras que cuando se presentan alternativas de contrac-

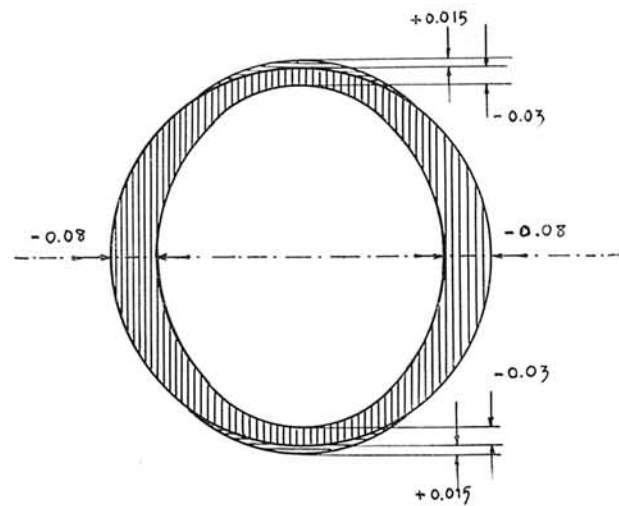


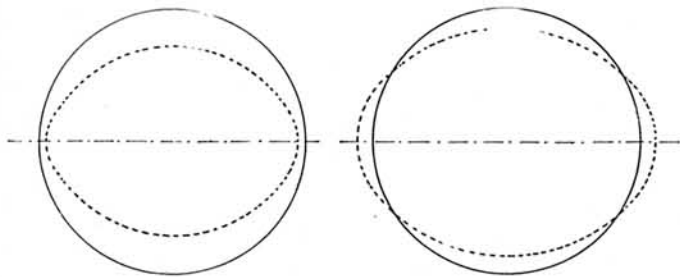
Fig. 8.a

ción y expansión, se desarrollan esfuerzos de flexión en las paredes del émbolo.

El material de estas paredes es, por su naturaleza, mucho más apto para resistir los esfuerzos de compresión que los de flexión, y no cabe duda de que, concentrados estos esfuerzos de flexión en zonas de espesor relativamente reducido, en las regiones que en el movimiento de la deformación vienen a hacer el efecto de *charnelas*, puede producirse fácilmente la rotura, y más si se considera la influencia de la fatiga ocasionada por la repetición del esfuerzo con una frecuencia de varios miles de veces por minuto.

Para lograr una deformación correcta, será preciso que, considerado el conjunto del émbolo con su eje como un cuerpo sometido por una parte a la acción de la presión de los gases de explosión que obran sobre la cabeza del émbolo, y por otra parte a la reacción de la biela, presente la misma rigidez según todos los planos que pasan por el eje de figura del cilindro, o aproximadamente—y teniendo en cuenta la forma generalmente adoptada para el émbolo—, que presente la misma rigidez en el sentido del plano que pasa por el eje de articulación con la biela, y por el eje de figura del cilindro, y en el sentido del plano normal al anterior.

Si el émbolo fuera mucho más rígido en el sentido del eje de biela que en el sentido normal a este eje, tendería a presentar una curva de deformación tal como las que aparecen en la figura 9.^a Por el contrario, si fuera menos

Fig. 9.^a

rígido en el sentido del eje de biela, las figuras aparecerían con la tendencia que marca la figura 10. En ambas figuras la línea de trazo y punto horizontal representa el eje de biela.

Sentados los anteriores principios y a la vista de las cur-

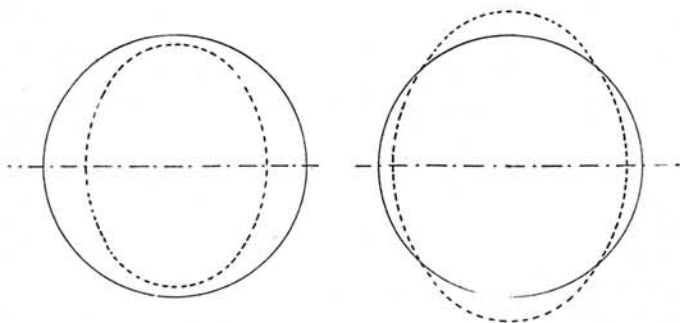


Fig. 10.

vas de deformación obtenidas, será conveniente modificar la forma y la disposición de los elementos resistentes de la pieza hasta lograr el efecto deseado.

Es necesario hacer notar, que por la forma en que se han llevado a cabo los ensayos de experimentación, se ha prescindido de la oblicuidad de la biela, y por consiguiente de la reacción lateral que sobre la pared del émbolo ejerce el cilindro a consecuencia de esa oblicuidad.

Es evidente que sería mejor haber podido tener en cuenta esta oblicuidad, y experimentar en condiciones que permitieran estudiar el efecto del empuje lateral, pero no lo hemos considerado factible con los medios de que disponíamos. Sin embargo, razonando sobre esta cuestión podremos admitir que el efecto de esta fuerza lateral sobre el émbolo se ha de traducir en una tendencia más o menos marcada, a achatar la forma de la curva de deformación en la región situada a 90 grados del eje de biela. Por lo tanto, si hemos obtenido en el ensayo anterior una curva como la de la figura 6.^a, el efecto de la presión lateral tenderá a redondear más el óvalo acercándolo a la forma circular, que sería la más correcta, según se desprende de los razonamientos que anteriormente hemos hecho.

Contando, pues, con la reacción lateral, parece deducirse que la rigidez del émbolo debe estar de tal manera distribuida, que en el ensayo de deformación, tal como ante-

riormente se ha descrito, obtengamos una curva de deformación del tipo de la figura 6.^a Es de hacer notar que todos los émbolos por nosotros ensayados y reconocidos como correctos

presentaron, como ya hemos indicado anteriormente, y con una sola excepción, curvas de deformación del citado tipo (1).

De acuerdo con las conclusiones deducidas de las experiencias realizadas, se modificaron las condiciones de resistencia del émbolo de nues-

tro motor, aumentando progresivamente el grueso de las paredes laterales en la región de su unión con los apoyos del eje de biela, tal como indica la figura 11. Se aumentó también algo el espesor de material en la parte del radio de acuerdo entre las paredes y el fondo, y se modificó, aumentándolo, el espesor del nervio que servía de unión entre el fondo y los apoyos del eje de biela, que en lugar de tener el espesor que aparece de puntos en la figura 12, pasó a adquirir el grueso indicado de trazo continuo.

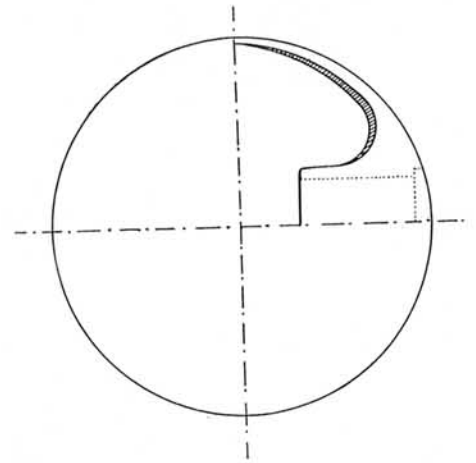


Fig. 11.

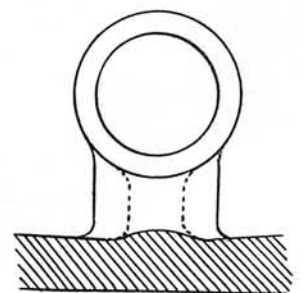


Fig. 12.

Una vez fundidos los émbolos con estas modificaciones, volvieron a repetirse los ensayos de flexión en la máquina Amsler, dando como resultado la curva de deformación que aparece en la figura 13.

Esta curva, mejor que la obtenida antes de la modificación, presenta una contracción bastante fuerte en la región del eje de biela, y una contracción muy pequeña con ligera tendencia a producir dilata-

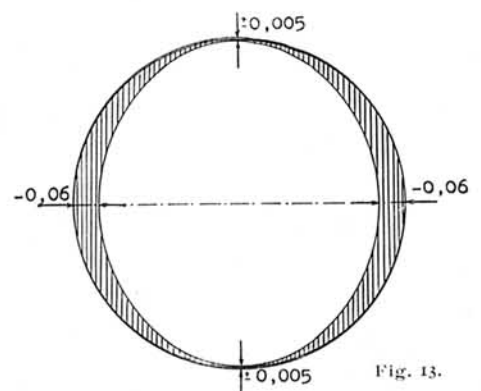


Fig. 13.

(1) Unos meses después de estos ensayos, llegó a nosotros el rumor de que en un motor de aquellos a los que pertenecía el émbolo de la excepción, se habían producido roturas de émbolo en forma parecida a la sufrida por nuestro émbolo.

No pudimos confirmar este rumor ni pretendemos asegurar que la rotura, caso de existir, fuera debida al defecto indicado, pero lo dejamos anotado por lo que pudiera tener de confirmación de nuestras conclusiones.

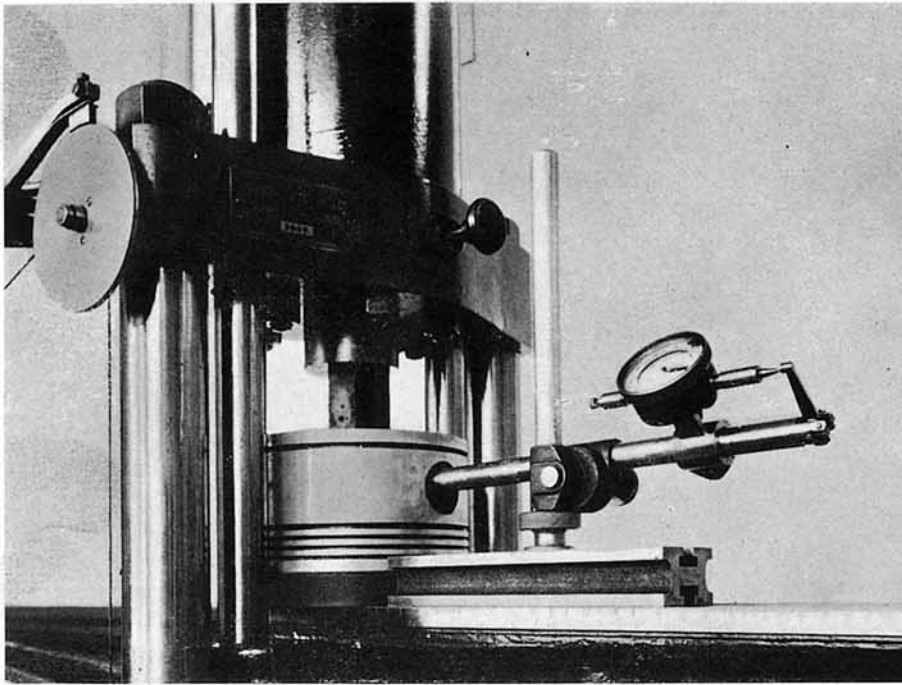


Fig. 14.

ción en la región de la pared lateral a 90 grados del eje.

Según se deduce de los razonamientos hechos anteriormente, la curva acusa que el conjunto del émbolo y su eje tienen menor rigidez en el sentido del eje que en el sentido normal al mismo.

En este punto de nuestras experiencias se nos ocurrió estudiar por el mismo procedimiento la deformación sufrida por el eje de articulación con la biela, que era de acero con un diámetro exterior de 34 milímetros e interior de 22 milímetros en la parte central, aumentando hacia los bordes de forma que resultara un cuerpo cilíndrico hueco, de *igual resistencia aproximadamente*.

La disposición adoptada fué la que aparece en la figu-

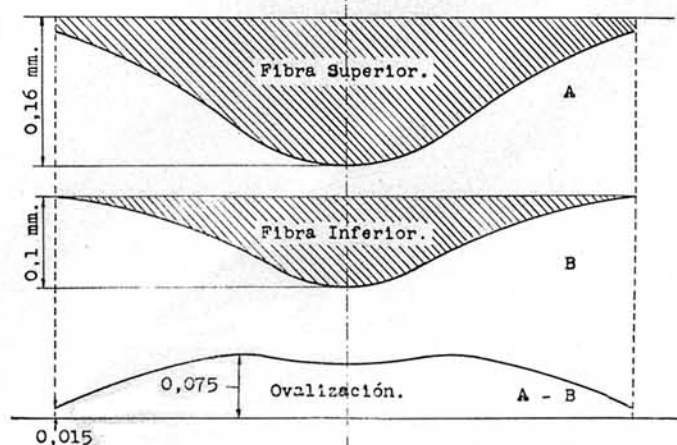


Fig. 15.

ra 14 montando el indicador en su soporte, accionado por un aparatito especial que construimos con este objeto.

De esta manera pudimos obtener las curvas de deformación o *elásticas* correspondientes a la generatriz supe-

rior y a la inferior del eje, que resultaron ser las que aparecen en la figura 15, y como consecuencia de ellas determinamos la ovalización o reducción de diámetro experimentada por el eje en las diferentes secciones, que partiendo del valor de 0,017 milímetros en el extremo del eje, llegó a alcanzar el valor de 0,075 milímetros en la región de transición entre el apoyo del émbolo y la biela.

Considerando un poco excesiva esta deformación, decidimos aumentar la rigidez del eje de émbolo, pasando a ser su diámetro interior 18 milímetros.

Con este nuevo refuerzo la ovalización máxima del eje se redujo a 0,02 milímetros, y considerándola aceptable, repetimos el ensayo de flexión del émbolo, que esta vez dió como resultado la curva que aparece en la figura 16, que puede considerarse como correcta.

Ensayado nuevamente este émbolo en el motor con el eje reforzado en la forma descrita, *no volvieron a producirse averías*, lo que confirma la exactitud de nuestras previsiones.

No pretendemos con lo anterior poder asegurar que todo émbolo que presente una curva de deformación con puntos de inflexión haya de dar forzosamente mal resultado.

Es posible que en determinadas condiciones, y aun con un material de características de resistencia muy elevadas, pueda un émbolo soportar los esfuerzos de flexión de las paredes sin que se produzcan roturas por fatiga; pero es evidente que el mismo material empleado en un émbolo concebido y realizado de manera que se eviten las deformaciones de flexión en las paredes, dará un resultado mucho mejor, y a igualdad de condiciones de resistencia podrá ser más ligero, cualidad muy digna de tenerse en cuenta.

Por todo ello creemos muy interesante que antes de poner en prueba en un motor un nuevo émbolo, debe someterse a un ensayo de flexión tal como hemos indicado, y no debe probarse en el motor hasta que haya dado una curva de deformación suficientemente satisfactoria. De esta manera se evitarán, en lo posible, muchos tropiezos y averías que pudieran ser de carácter grave.

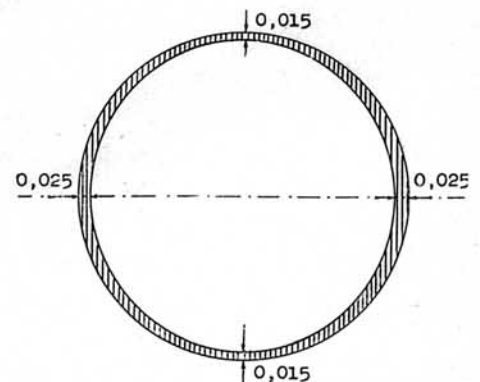


Fig. 16.