

Estabilidad y asismicidad de las construcciones

POR JULIO IBÁÑEZ V.

GENERALIDADES

El autor ha estado preparando desde hace varios años, las partes de un estudio que permita resolver el problema de la Estabilidad de las Estructuras en forma suficientemente sencilla y objetiva como para que un técnico sin especialización pueda conocer rápidamente y con exactitud las condiciones de esa Estabilidad. Se persigue con esto que el proyectista de una construcción tenga, desde un comienzo, tanta conciencia de su resistencia como acostumbra tenerla del objeto a que está destinada y de las exigencias de higiene y estética. Dispondrá así de elementos completos de juicio, contrariamente a lo que sucede ahora, en que le falta el sentido de la Estabilidad que sólo los calculistas especializados logran adquirir. Los proyectos resultarán, entonces, originalmente bien concebidos lo que, aparte de significar economía de tiempo y dinero, hará posible obtener en definitiva obras de mayor lógica constructiva y más valor estético, facilitando la uniformidad de criterios en lo que a esto se refiere.

Se considera en esta obra, en forma extensa, el efecto de los temblores y se procura en su estudio dar la idea más sencilla y realista del fenómeno, sin exagerar la simplificación hasta caer en los errores del método estático; pero sin llegar al refinamiento de los estudios hechos por la Universidad de Stanford de California, que exceden los requerimientos de seguridad de las construcciones corrientes. El procedimiento aquí indicado ha sido también adoptado en la Ordenanza General de Construcciones y está encaminado a la obtención de estructuras que no se derrumben ni produzcan desgracias personales durante los grandes terremotos, aunque no queden a cubierto de daños menores. La consideración de la acción sísmica está destinada a producir una diferencia entre el aspecto de las estructuras en los países de terremotos con relación al que presenten las de los países de subsuelo estable, diferencia a que se llegará más pronto disponiendo de antecedentes más completos como los suministrados aquí.

Aparte de las ventajas de índole general que reportan los métodos que indicamos existen otras, de valor para los Arquitectos e Ingenieros y que son:

- 1) Rapidez y economía en la confección de los proyectos;
- 2) Precisión en los cálculos y, en consecuencia, economía en la obra.;
- 3) Sencillez en la teoría del método que, como se verá más adelante, exige al proyectista del recargo de conocimientos que hoy día se necesitan para manejar el sinnúmero de fórmulas, principios y leyes empleados en la Resistencia de Materiales.

No debe pensarse, sin embargo, que lo anterior significa la eliminación del estudio de la Resistencia de Materiales de los programas de Ingeniería o Arquitectura.

Lo que se conseguirá es hacer que la parte rutinaria del trabajo en esa materia, que puede ser realizada mecánicamente, no se siga llevando a cabo en la forma penosa, incierta y poco precisa en que se lleva actualmente. El esfuerzo de la técnica se concentraría más bien en el estudio de aquella parte de esta ciencia que se refiere a los fenómenos internos de los materiales, distribuciones de fatigas, etc. Esto tendría más el carácter de investigación científica que de aplicación profesional. Es un amplísimo campo para el cual quedarán en mejores condiciones los técnicos si se les alivia de la tarea de los cálculos rutinarios de los sistemas hiperestáticos.

Cabe hacer notar también, que los procedimientos que aquí se indican, ayudarán en forma efectiva a esta investigación científica, sobre todo en lo que se refiere al comportamiento del hormigón armado en los sistemas hiperestáticos; en efecto, se dispondrá por primera vez, de medios para medir directamente y con la mayor precisión, las sollicitaciones que se producen en las estructuras. La influencia perturbadora de las variaciones del módulo de elasticidad, de la hipótesis de las secciones planas, la influencia de las aproximaciones en la teoría de la Resistencia de Materiales, etc., podrán ser eliminadas o avaluadas con toda precisión, obteniéndose nueva economía de materiales en esta forma.

CONCEPCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS

Es evidente que cuando un Arquitecto o Ingeniero conciben una estructura, la idea matriz que los inspira es la utilización de la obra. Esta utilización fija las dimensiones generales y la ubicación. Sin embargo, no se dispone para ello de entera libertad. Siguiendo un orden jerárquico, nos encontramos con que la primera limitación proviene de la estabilidad: la que controla la elección de los materiales, las dimensiones máximas o mínimas a que se puede llegar y también la disposición misma de la estructura.

Ahora bien, cuando se trata de construcciones destinadas a cobijar personas, guardar alimentos u otras materias relacionadas con la salud, las exigencias de higiene constituyen una nueva limitación que sigue en importancia a la limitación de la estabilidad: la luz, el aire, la humedad, etc., deben ser considerados en la resolución de la disposición definitiva.

Finalmente, en toda obra salida de la mano del hombre debe haber una apreciable preocupación respecto de la estética. En efecto, los materiales que se emplean hoy día son capaces de resistir la acción de los agentes atmosféricos, de los temblores, etc., por muy largo tiempo, y en consecuencia no sólo estamos construyendo para nosotros sino que también para las generaciones venideras. Ellas juzgarán de nuestra época por las obras que les dejemos y apreciarán nuestra cultura, en buena parte por la belleza que sepamos imprimir a las construcciones. Hay pues, una grave responsabilidad histórica que nos exige ocuparnos de la estética, aunque para ello debamos aumentar el costo de las obras. Felizmente la belleza no se obtiene, por lo general, abultando los presupuestos sino que más bien concibiendo armoniosamente el conjunto y las partes de la obra y adaptándolas a las características y aspecto del lugar que las rodea. Armonía interna y armonía externa son las fuentes de la belleza que, como dice Platón, es «el esplendor de la verdad».

ELECCIÓN DE LOS MATERIALES

La elección de los materiales está controlada principalmente por factores de resistencia y de estética, aparte, naturalmente del factor económico que se relaciona con la abundancia o escasez de determinados materiales en el lugar de la obra. Existe un principio general según el cual mientras mayores son los esfuerzos a que están sometidos los elementos de una estructura más noble debe ser el material que se emplee, entendiéndose por material más noble aquel que tiene mayor resistencia específica. La siguiente clasificación da una idea aproximada del orden de nobleza de los materiales corrientes de construcción:

- 1) Acero de alta calidad.
- 2) Acero corriente de construcción.
- 3) Hormigón fuertemente armado.
- 4) Hormigón armado.
- 5) Hormigón solo.
- 6) Albañilería de piedra.
- 7) Albañilería de ladrillo.
- 8) Madera.

Puesto que las mayores solicitaciones se producen en las obras de mayores dimensiones o en aquellas sometidas a mayores cargas, es natural que en ellas tenga su mejor aplicación el acero o el hormigón fuertemente armado.

Las razones de estética que intervienen en la elección del material se refieren a la necesidad de procurar, tanto la armonía externa como la interna. En efecto, es sin duda la armonía externa la que se persigue cuando se proyecta en piedra un refugio cordillerano o un pequeño puente en bóveda en un sector rocoso de camino. Así también, es la armonía interna la que se persigue cuando se emplea hormigón armado y no albañilería de ladrillo en la confección de una alta columna de una sala de grandes dimensiones.

CONTINUIDAD Y PROPORCIÓN DE LOS ELEMENTOS RESISTENTES DE UNA ESTRUCTURA

Antes del advenimiento del acero y hormigón armado en las construcciones, los elementos resistentes estaban formados por muros o pilares, para resistir las cargas verticales y vigas o entramados para salvar las luces o vanos. No había ligazón entre estos elementos, de modo que cada uno de ellos tenía solicitaciones simples y bien definidas. El empleo del acero y, sobre todo, del hormigón armado, ha hecho posible ligar los elementos verticales con los horizontales, dando al conjunto de la obra una continuidad perfecta. La ventaja que se obtiene con esto es una mayor rigidez del conjunto y una economía de materiales. En los países de terremotos la rigidez es aun más ventajosa porque mejora las aptitudes de las estructuras para resistir esfuerzos horizontales.

Desgraciadamente, todo aumento de rigidez en la estructura aumenta la dificultad de los cálculos de estabilidad, lo que ha hecho a menudo emplear estructuras menos rígidas que lo que era de desear o simplificar los cálculos con hipótesis que son

aceptables en apariencia, pero no en la realidad o que aun ni en apariencia resultan satisfactorias. La honradez profesional misma se ha solido ver en peligro por esta circunstancia. Los métodos que aquí proponemos están encaminados a resolver este problema en forma completa.

Cuando se estudia una estructura resistente rígida, se encuentra que los momentos de flexión a lo largo de ella resultan bastante variables para los sistemas de carga actuantes que se presentan en la práctica. Es evidente que al dimensionar las partes de la estructura se elegirán secciones de acuerdo con los momentos de flexión solicitantes. Sin embargo, al hacer esto conviene recordar que si se le aumenta la altura a un determinado trozo de la pieza resistente los momentos de flexión que se producen en él van a aumentar en razón de su mayor rigidez relativa, lo que producirá una disminución de los momentos de flexión en los trozos restantes del sistema. Ahora bien, desde el punto de vista de la economía es conveniente hacer que se produzcan los mayores momentos de flexión donde la altura de la pieza es máxima, puesto que ahí la distancia entre el centro de tracción y el de compresión es mayor y más eficaz el esfuerzo del material empleado. Esto conduce a un principio según el cual las partes rígidas de la estructura deben ser lo más rígidas posible y las flexibles lo más flexibles posible.

Las consideraciones anteriores conducen, como es natural, a piezas de altura y momento de inercia bastante variables. Sin embargo, si se exagera en relación con esto existe el peligro de que un error de construcción, defecto en los materiales, diferencia entre las cargas con que se calculó y las realmente actuantes, etc., puedan alterar la distribución prevista de los momentos de flexión, lo que resultaría especialmente peligroso para las secciones que han sido proyectadas muy débiles. Para prevenir esto se aconseja fijar un límite en la proporción de la resistencia a la flexión que tiene la sección más débil con relación a la de la sección más robusta de la estructura. Este límite puede variar según la naturaleza de la obra; pero estimamos que, en general, la sección más débil no debe tener menos de $\frac{1}{15}$ de la resistencia a la flexión de la sección más fuerte.

Es evidente que la aplicación de los principios enunciados hasta aquí afecta a la estética del conjunto. Debemos dejar a los Arquitectos la tarea de buscar y encontrar, si es posible, la solución que concilie la máxima economía con la máxima belleza. Si es fundada la creencia, muy difundida entre los proyectistas, de que una obra lógicamente calculada en su estabilidad es estéticamente satisfactoria, podríamos adelantar que esta tarea de los Arquitectos no será difícil y encontrará una ayuda en el método expuesto aquí para conocer fácilmente las condiciones óptimas de estabilidad de sus estructuras.

ESTABILIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES SOMETIDAS A CARGAS ESTÁTICAS

La estabilidad de las construcciones se ha estudiado hasta ahora por métodos analíticos. La base de estos métodos es el teorema de Mohor, que relaciona la deformación de un trozo de estructura resistente con las solicitaciones a que está sometido, con el coeficiente de elasticidad del material de que se compone y con las dimensiones de sus secciones transversales. Así, por ejemplo, si se considera una pieza prismática

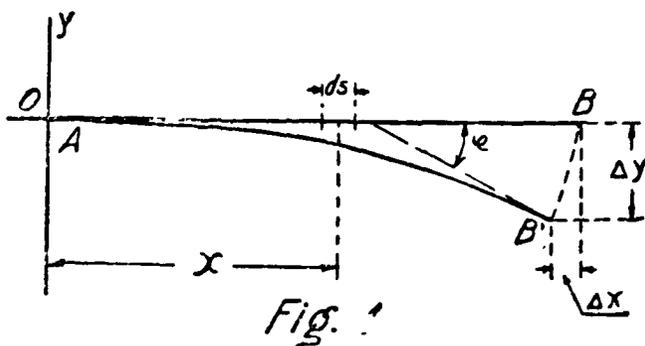
como la de la fig. 1, sometida a flexión simple, el teorema de Mohor toma la forma tan conocida:

$$1) \quad \varphi = \int \frac{m \, ds}{E I}$$

$$2) \quad \Delta x = \int \frac{m \, y \, ds}{E I}$$

$$3) \quad \Delta y = \int \frac{m \, x \, ds}{E I}$$

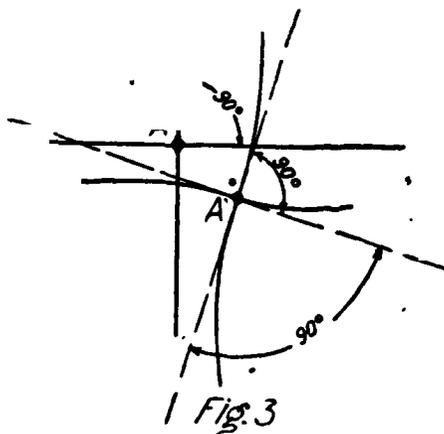
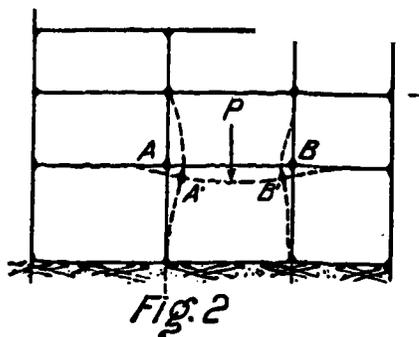
en que φ es el ángulo formado por las tangentes extremas a la elástica en el trozo de elemento resistente, sometido a un momento de flexión m variable a lo largo de dicho trozo; ds es la longitud infinitamente pequeña de cada elemento a lo largo del trozo; E es el coeficiente de elasticidad del material sometido a tracción o compresión (Módulo de Young); I es el momento de inercia de la sección transversal de los diversos elementos del trozo considerado, x e y son las coordenadas del centro de cada uno de estos elementos; Δx es el desplazamiento horizontal de un extremo del trozo con relación al otro extremo; Δy es el mismo desplazamiento, medido en sentido vertical.



Las fórmulas 1), 2) y 3) permiten establecer las deflexiones de las barras que unen los nudos de una estructura hiperestática como la de la figura 2. En efecto, si se agregan las condiciones de apoyo del sistema, la condición de constancia del ángulo que forman entre sí los extremos de las barras que concurren a un mismo nudo (Fig. 3); si se agregan ciertas condiciones de simetría, articulaciones, ligazones, etc., se puede llegar siempre a obtener un número de ecuaciones que resuelve el problema de la determinación de los momentos flectores y demás cantidades que intervienen en la estabilidad de los sistemas hiperestáticos; sin embargo, basta considerar la forma en que se ha planteado el problema para comprender que su aplicación es larga y engorrosa. La técnica moderna ha buscado y ha encontrado muchos métodos, casi todos de aproximación sucesiva, que, basados en la teoría que acabamos de enunciar, permiten llegar a resultados con notable precisión; sin embargo, por meritorios que sean

estos métodos, requieren conocimientos avanzados y gran práctica en su manejo. Tampoco tienen la objetividad suficiente para evitar que se cometan errores. Finalmente el esfuerzo mental que debe desarrollarse en su aplicación es suficientemente grande como para impedir que los no especializados se avengan a entrar en este terreno de la determinación de las cantidades hiperestáticas.

Se explica así que los Arquitectos e Ingenieros acudan a especialistas para resolver sus problemas de Estabilidad, aunque esta práctica perjudique, como ya le hemos expresado, a la correcta concepción de la obra.



Para subsanar estos inconvenientes de acuerdo con la tendencia moderna a la mecanización, se ha desarrollado últimamente la Estabilidad Experimental, Ciencia que consiste en la determinación de las solicitaciones y fatigas que se desarrollan en las estructuras resistentes mediante la confección de modelos que las reproducen a escala y que son sometidos a cargas de prueba.

Esta ciencia ha hecho importantes progresos, especialmente en Alemania, Estados Unidos y Francia. En otros países como la República Argentina y Chile también se han hecho trabajos de esta especie.

En Francia.—Los trabajos de Mesnager son los primeros de importancia en la materia y tienen el mérito de permitir un profundo estudio de las tensiones que se desarrollan en las diversas partes de una estructura resistente. El procedimiento de Mesnager se basa en las alteraciones de la refringencia de los cuerpos transparentes por efecto de las presiones a que se hallan sometidos. Se hace pasar rayos de luz polarizada a través de modelos confeccionados con materiales transparentes como el vidrio, etc. Las tensiones desarrolladas en el modelo, por efecto de cargas experimentales a que se les somete, influye en la desviación de la luz que lo atraviesa en grado suficiente como para deducir la magnitud de esas tensiones. Este procedimiento de la Estabilidad Experimental llamado «Fotoelasticimetría» ha sido dado a conocer en todo el mundo en forma amplia y existen laboratorios casi en todos los países de importancia.

Las críticas que ha merecido hasta ahora la Fotoelasticimetría se refieren a la complejidad de su teoría, al alto costo de las instalaciones y modelos y, especialmente,

a los errores que tienen sus indicaciones si no concurren las dos circunstancias de ser perfectamente isótropo el material de la estructura y el del modelo, el primero con relación a las tensiones y deformaciones y el segundo con relación a la propagación de la luz.

Aunque las anteriores objeciones tienen importancia innegable estimamos que la Fotoelasticimetría ha prestado y seguirá prestando una ayuda insustituible a la solución de los problemas de la Estabilidad.

En Estados Unidos.—Las investigaciones del profesor Beggs sobre modelos lo condujeron en 1922 a un método que ha sido posteriormente perfeccionado y que se ha generalizado en todo el Mundo. Este método consiste en la construcción de modelos de materiales bastante elásticos como el celuloide u otro similar, que se someten a solicitaciones de cargas o momentos experimentales. Estas solicitaciones producen una elástica que, de acuerdo con el teorema de Maxwell, es la línea de influencia de esas solicitaciones, para la sección del modelo en que se ejercen. Se miden entonces, en diferentes puntos del modelo, las deformaciones de la elástica producida por las cargas de prueba y se obtiene, a escala, la línea de influencia, en esa sección, de las solicitaciones producidas por cargas actuando en los diversos puntos del modelo, en los cuales se han hecho las medidas de deformación.

En Alemania.—El método americano del Profesor Beggs ha sido muy desarrollado en Alemania, donde se han establecido Laboratorios tan importantes como el de Stuttgart, que es consultado por el Gobierno para los problemas de más difícil solución de la Estabilidad.

La Fotoelasticimetría también ha tenido desarrollo en Alemania, donde se construyen instrumentos de tipo comercial que permiten practicar el método sin entrar en la teoría misma del fenómeno.

Otro procedimiento empleado en Alemania con fines de ayuda a los cálculos corrientes de hormigón armado es el de Christian Rieckhof de Darmstadt (Alemania). Consiste este método en determinar los puntos de inflexión de la elástica de los modelos sometidos a cargas experimentales. La determinación se hace mediante un curvímetro corriente, como los que se usan para medir la curvatura de los lentes. Conocidos los puntos de inflexión de la elástica se sabe que en ellos los momentos de flexión valen cero, lo que permite asimilar entonces el trozo de modelo entre dos puntos de inflexión a un elemento simplemente apoyado o bien, articulado en sus extremos. El sistema queda así transformado en otro de fácil solución por los métodos corrientes de la resistencia de materiales.

El método de Rieckhof dió origen a la construcción y venta de un instrumento para ponerlo en práctica. El éxito comercial no fué sin embargo, muy grande especialmente por las dificultades que había en ubicar con precisión los puntos de inflexión, lo que arrojaba a menudo un considerable margen de error en los cálculos. Por otra parte si se exageraban las deformaciones para reducir este error aparecía otro derivado de que las deformaciones dejaban de ser despreciables e intervenían en la distribución de los momentos de flexión, etc.

En Argentina.—Los trabajos del Ingeniero Otto Gottschalk basados también en el método de Beggs, son importantes y bastante conocidos en Chile. Ha construído un instrumento de aplicación práctica muy perfeccionado, llamado Continostat, que puede emplearse en la determinación de momentos de flexión, esfuerzos cortantes y longitudinales, tanto en vigas continuas como de pórticos y representa ya un paso definitivo en la materia.

La Fotoelasticimetría también ha sido desarrollada en el país vecino, que cuenta con un equipo de medidas de tipo moderno.

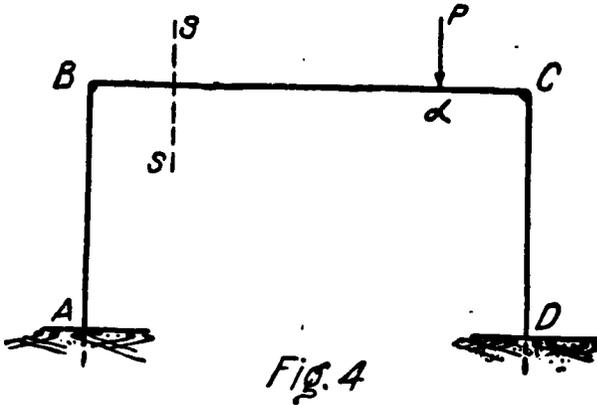
En Chile.—La Universidad Católica en nuestro país ha dedicado atención a la Estabilidad Experimental, a pesar de las dificultades que se le presentan para obtener fondos. El profesor señor Miguel Letelier ha organizado en ese plantel un Laboratorio de Fotoelasticimetría que, aunque no es de aplicación práctica en gran escala, permite difundir entre los alumnos el conocimiento del método.

En la Universidad de Chile se ha creado, por iniciativa del Director del Departamento de Arquitectura de la Dirección General de Obras Públicas señor Hermógenes del Canto y del Decano de la Facultad de Matemáticas señor Gustavo Lira, un Instituto de Estabilidad Experimental, anexo a la Escuela de Arquitectura. El método empleado en este Instituto ha sido ideado por el Autor y ha permitido resolver los problemas de Estabilidad Experimental que se han presentado hasta ahora.

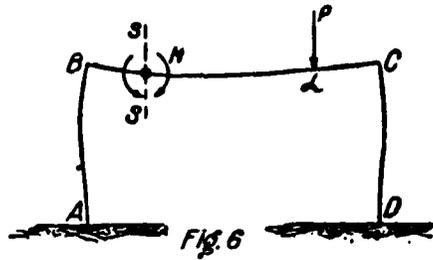
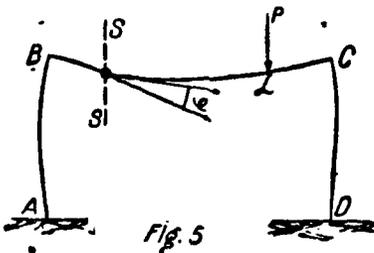
El Elasticímetro.—Contrariamente a los métodos indirectos empleados en los países a que ya nos hemos referido, el Instituto de Estabilidad Experimental nuestro basa sus experiencias principalmente en la medida directa de las sollicitaciones que se producen en los modelos, mediante dinamómetros especiales que llevan el nombre de elasticímetros. Se ha conseguido en esta forma, aparte de la mayor sencillez en los resultados, subsanar los más graves reparos que se hacen a los demás métodos, cuales son los de basarse en ciertas hipótesis de isotropía, homogeneidad, elasticidad perfecta etc., y en las fórmulas de Resistencia de Materiales. El elasticímetro permite pues, determinar las sollicitaciones verdaderas de los modelos y, en consecuencia establecer hasta donde son válidas las fórmulas de la Resistencia. En hormigón armado, en que los valores del módulo de Young varían en forma tan substancial (del Simple al Doble o más) con las tensiones, estas determinaciones están destinadas aun a modificar la concepción de las estructuras.

Nos referiremos primero a la medida de momentos de flexión. Sea A. B. C. D. (Fig. 4) un modelo a escala, de una estructura resistente. Sea P una carga que actúa en el punto α del modelo. Sea $s-s$ una sección transversal del dintel BC donde quiere medirse el momento de flexión producido por la carga P en α . De acuerdo con el procedimiento se dispone una articulación en $s-s$. La carga P hace rotar esta articulación de un ángulo φ . (Fig. 5). Si se ejerce un momento de rotación en torno de la articulación, en sentido contrario a su jiro, puede encontrarse un valor de este momento que destruya enteramente esa rotación. Es evidente que este momento es igual al momento de flexión que la carga P habría producido en $s-s$ si no hubiera habido articulación (Fig. 6).

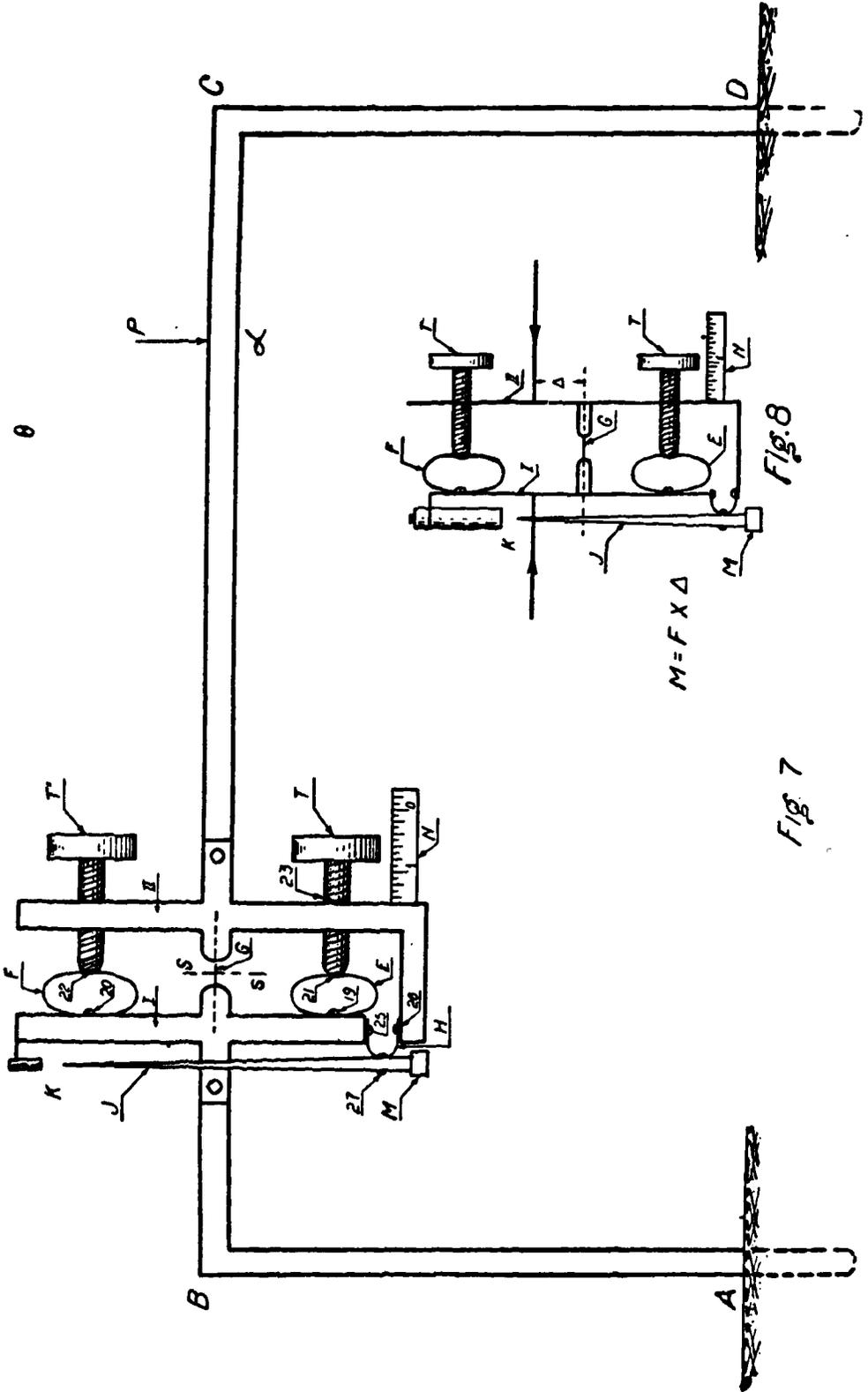
El instrumento para realizar este procedimiento aparece en la Fig. 7.



En este caso las piezas I y II son dos elementos rígidos ligados entre sí por un resorte laminado *G*, que actúa como una rótula. *E* y *F* son dos resortes laminados unidos rígidamente a *I* en 19 y 20, presionados en 21 y 22 por el extremo de los tornillos *T* y *T'*. *H* es otro resorte laminado, rígidamente ligado a *I* en 25 y a *II* en 26. *J* es un índice solidamente ligado a *H* en 27.



Suponiendo que el momento de flexión producido en *s-s* por la carga *P* sea negativo (Fig. 6), los elementos *I* y *II* rotarán alrededor de *G* en forma que el resorte *E* resulte comprimido y el *F* dilatado. El resorte *H* se deformará y el extremo *k* del índice *J* se moverá hacia la derecha. Haciendo rotar el tornillo *T* en forma que avance hacia la izquierda el resorte *E* se comprimirá nuevamente y su fuerza expansiva aumentará, creando un momento de rotación en torno de *G* en sentido opuesto al momento de flexión en torno de *s-s* debido a *P*. Cuando *k* haya recuperado la posición que tenía antes de la acción de *P*, *I* y *II* habrán recuperado también su posición primitiva y el camino que haya sido necesario hacer andar a *T* para conseguir este objeto dará la medida del momento de flexión buscado. El resorte *F* y el tornillo *T'* tienen por objeto anular los momentos de flexión en *s-s* debidos al peso del instrumento de medida y del modelo, a la acción de la temperatura y a las tensiones de montaje.



Las fuerzas longitudinales pueden medirse intercalando el instrumento en el modelo en forma que la articulación G no quede en el eje de la pieza BC , sino que excéntrica (Fig. 8). En este caso la fuerza longitudinal no es absorbida por la articulación sino que produce un momento de rotación alrededor de ella, que es igual a esta fuerza multiplicada por la excentricidad, lo que permite su determinación.

Errores.—Los errores que pueden cometerse en la medida son:

1.º El modelo no reproduce exactamente la estructura.

2.º Las indicaciones del Instrumento mismo, desconectado del modelo, no son exactas.

3.º El método de medida no es preciso.

Los errores indicados en los números 1.º y 2.º son los inherentes a toda medida con instrumentos, y pueden en consecuencia, reducirse todo lo que se quiera mejorando la construcción del modelo y dinamómetro.

Los errores indicados en el número 3.º son:

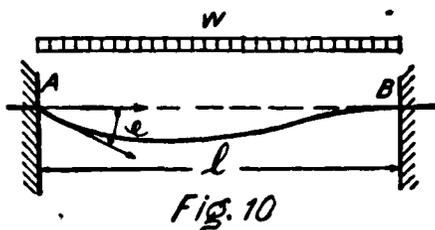
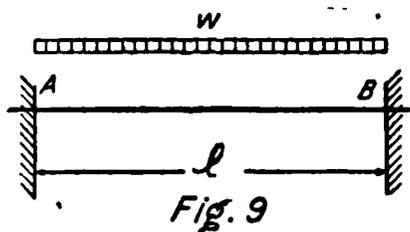
a) El instrumento de medida intercalado en el modelo, altera su rigidez.

b) Al anular el ángulo φ producido por la carga P en $s-s$ queda un ángulo $\Delta \varphi$ de error, debido a la imperfección del sistema indicador formado por el resorte H , y el índice J . Este ángulo produce un error.

$$e = \frac{\Delta \varphi}{\varphi}$$

El error indicado en la letra a) puede ser reducido cuanto se quiera dándole a la unión de los elementos I y II una forma conveniente.

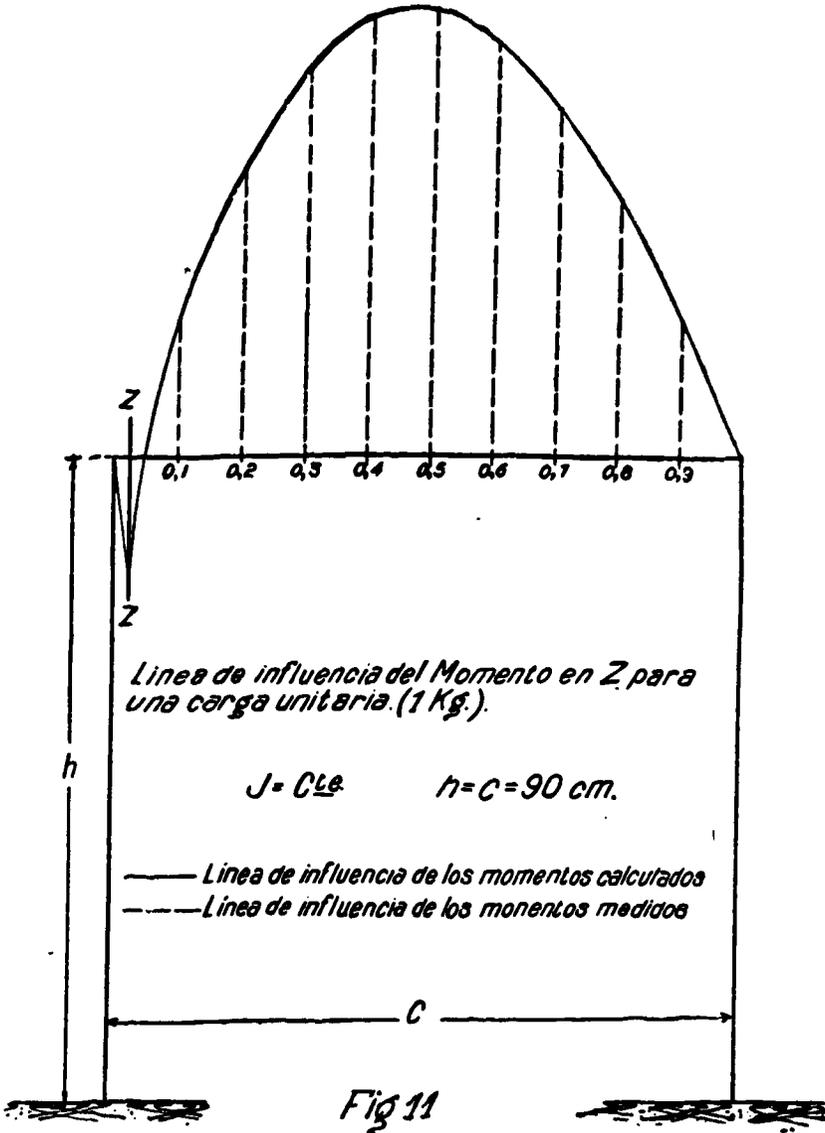
El error indicado en la letra b) es también muy pequeño, como veremos a continuación. En efecto, supongamos una viga encastrada en ambos extremos, como la indicada en la Fig. 9, cargada con una carga uniformemente distribuída W .



Si se intercala una articulación en A , la elástica tomará la forma que se indica en la Fig. 10 y el ángulo en esa articulación valdrá:

$$\varphi = \frac{Wl^3}{48 EI}$$

E es el módulo de elasticidad del material, I es el momento de inercia de la sección transversal de la viga y l la luz.



SECCION	MOMENTO MEDIDO	MOMENTO QUE ELABO	DIFERENCIA
0,1	2,09	2,14	0,72 %
0,2	4,45	4,50	0,72 %
0,3	5,98	6,04	0,885 %
0,4	6,82	6,88	0,144 %
0,5	6,93	6,94	0,144 %
0,6	6,48	6,45	0,144 %
0,7	5,45	5,44	0,144 %
0,8	3,99	3,98	0,144 %
0,9	2,14	2,14	0,000 %

Suponiendo un modelo de acero constituido por dos barras redondas de 7 mms. de diámetro y 800 mms. de luz y una carga de 20 grs. por cm. lineal de viga, el valor del ángulo será:

$$\varphi = 0,00425$$

La acción del tornillo T está destinada a anular este ángulo φ . Debido a la imprecisión del sistema indicador puede quedar, sin embargo, un ángulo $\Delta \varphi$ de error. Este ángulo debe ser tan pequeño que el desplazamiento del extremo k del índice J no sea perceptible. Como se trata de apreciar la coincidencia de dos líneas, a simple vista puede apreciarse un error de $1/8$ de mm., aún por personas de vista poco habituada a observaciones instrumentales. El sistema amplificador formado por el resorte H y el índice J hace que los desplazamientos de k sean 35 veces mayores que los desplazamientos relativos entre los puntos 25 y 26 de I y II en un instrumento de construcción corriente. Los movimientos relativos inapreciables de 25 y 26 deben ser entonces menores que

$$\frac{1}{8} \times \frac{1}{35} = \frac{1}{280} \text{ mms.}$$

Como la distancia media entre 25 y 26 y la rótula G es, en instrumentos de tamaño corriente, de 150 mms., el ángulo de error resultante será:

$$\Delta \varphi = \frac{1}{280 \times 150} = \frac{1}{42000}$$

El error de la medida será entonces:

$$\epsilon = \frac{\Delta \varphi}{\varphi} = \frac{1}{42.000 \times 0,00425} = 0,56 \%$$

Este error inferior al 1% se ha producido en condiciones bastante desfavorables. Se tenía, en efecto, una viga doblemente encastrada (rigidez máxima), carga uniformemente repartida y sección considerada situada en el extremo. En condiciones normales el error resultante es menor. En el gráfico que se agrega a continuación puede verse comprobado este resultado por la experiencia. En efecto en el marco rígido de la Fig. 11 se ha hecho la línea de influencia de los momentos de flexión para la sección z mediante el cálculo y mediante la medida elasticimétrica, resultando una coincidencia casi perfecta entre ambas líneas de influencia, y bastante concordante con el resultado a que se ha llegado aquí con nuestro cálculo de error máximo.

(Continuará).