Filosofia comparada de las construcciones iso e hiperestaticas

por Pr. A. Pirard

1. Introducción

Los filósofos, sean efectivamente sabios o no lo sean, siempre han sido criticados, entre otros por los mismos filósofos; para ellos además, destruir teorías de otros filósofos constituye a menudo la esencia misma de su profesión.

Frecuentemente se les tacha de verbalismo mientras sus obras estan asemejadas a elucubraciones; no comparto esta opinion en absoluto.

Hay que anotar que esto sucede a menudo cuando son hombres de ciencia exacta los que recogen tales proposiciones.

Al presentar una nota sintética con título: « filosofía comparada de las construcciones estáticas e iperestáticas », se comprende en que medida estoy consciente del riesgo que corro, sin preocuparme por lo tanto, de que se ponga la legitimidad de mis observaciones en tela de juicio.

No puedo decir que descubriré la pólvora pero no puedo dejar de lado elementos esenciales; abriré puertas que tal vez Ustedes quieran cerrar, sea porque se abren sobre el pasado, sea porque presentan un escepticismo acerca de lo que se llama el progreso, sea, en fín, porque descubren aspectos que les parezcan discutibles y demasiado nuevos.

Siendo buén filósofo, me cuidaré de defender ideas simplemente mencionadas frente a una asamblea de especialistas de la construcción, aunque dichas ideas sean el resultado de numerosos cálculos comparativos y la consecuencia de un grán número de experiencias fotoelásticas sobre osaturas.

2. Breve resumen histórico

Es alrededor de 1750 que los progresos en la realización técnica de las construcciones junto a una preocupación natural y necesaria de economía, orientaron los ingenieros hacia la continuidad de las estructuras y, por ende, hacia la iperestaticidad.

Ellos progresaban fundandose en la intuición asi como en su experiencia; los conocimientos científicos de esa época eran efectivamente incapaces de dar la solución a sus problemas.

Por otro lado la estática estaba bien asentada a la época — desde hace muchos siglos — aunque muchos de sus gigantes — tales como Rankine, Maxwell, Culmann y Ritter — son del siglo siguiente.

Es a Navier a quíen se debe, en 1826, un primer análisis de una armadura iperestática, muy modesta por otra parte.

En 1862, Clebsch desarrolló su estudio en la misma linea que Navier, es decir poniendo en el primer plano la noción de equilibrio. St Venant y Flamant tradujeron su obra, el primero observando que este método de análisis estructural figuraba ya en su curso en 1838, lo que no tiene nada de sorprendente puesto que se trataba del desarrollo de las ideas de Navier de quién él habia sido discipulo.

El problema de la asociación equilibrio-deformación que está en relación directa con las estructuras iperestáticas, puede evidentemente analizarse poniendo en el primer plano, sea la noción de equilibrio — como lo hicieron Navier y Clebsch — sea la noción de « compatibilidad de las deformaciones », como lo hizó Jacques Bresse en su curso publicado en 1854 en Paris.

Yo creo que los métodos que ponen de relieve la noción de equilibrio son a la vez más claros, mas directos y mas fructuosos y que la razón reside en el hecho que la noción de equilibrio — categoricamente universal — está mejor comprendida y más concreta que aquella traduciendo la continuidad de las deformaciones expresada por la equación de compatibilidad de ellas.

Sea lo que fuere, a partir de esa época, parecía que nada verdaderamente esencial pudiera ser descubierto en el campo de la indeterminación estática.

Sabemos sin embargo ahora toda la riqueza que debía provenir del principio de reciprocidad de Maxwell, de los trabajos semejantes pero independientes de Mohr, de la introducción de las lineas de influencia, de los modos de aplicación de la ley de la Conservación de la energía, y, sobre todo, de la aplicación del principio de los desplazamientos virtuales que constituye el método más poderoso y más general que haya.

De igual manera Castigliano tuvo grán éxito en 1873, con el principio del trabajo mínimo en el campo de la iperestática. Cuando uno evoca este principio, es necesario mencionar por otra parte los nombres de Menabrea en Italia, y de Cotterill en Inglaterra.

Aunque en nuestra época dónde prevalece una óptica bastante utilitarista, el principio de Castigliano sea considerado como anticuado, a menudo por gente que están lejos de comprender toda su sutilidad; aunque introduzca una cierta mística en la cual la naturaleza escatima espontaneamente todo esfuerzo superfluo, este principio merece evidentemente ser subrayado como un aspecto filosófico interesante de la cuestión. Por otra parte, Engesser lo ha extendido a los diversos casos de elasticidad no linearia.

Al recordar que el concepto del centro elástico se debe a Culmann hay que mencionar la analogía de la columna introducida, a partir de este concepto, por Hardy Cross a quien se debe también el método de distribución de los momentos y procedimientos por iteración retomado por Southwell en su técnica de relajación.

El papel de la plasticidad en la estabilidad, reconocido ya en el siglo pasado y, entre otros, por Cotterill y Ewing, fue explotado en 1936, por Baker en su filosofía de la utilización de la carga de ruina de una estructura como criterio de proyecto. Sin embargo hay que reconocer que esta noción, actualmente bien establecida, no permite dejar de lado el análisis clásico bajo carga normal.

Al final de la segunda guerra mundial, nos enfrentamos a las computadoras. Su introducción mostró que se podría sacar un gran provecho de su utilización en todos los campos. La primera aplicación que saltaba a la vista era aquella del cálculo propiamente dicho.

Ahora bien, los cálculos iperestáticos suelen ser largos, sobre todo cuando son hechos de manera formal; asi se efectuaban en la mayoría de los casos en el continente europeo donde los métodos informales, la iteración por ejemplo, solian ser menos usados que en el mundo británico.

Dicho sea de paso, parece que esto resulta del caracter confuso y de la mala composición literaria del texto, que Cross dió a su excelente idea en la primera publicación en 1924. Esa peculiaridad retrasó bastante la difusión, en Francia por ejemplo.

El uso de las computadoras exige un procedimiento analítico general lo más independiente posible del tipo de estructura. Es curioso comprobar que dicho procedimiento haya sido practicamente descubierto en el método propuesto por Navier en 1826 y continuado por Clebsch; por otra parte, se funda en el modo de pensamiento que pone de relieve la noción de equilibrio.

De esta manera el análisis de las estructuras volvía a su punto de partida.

La tendencia natural a partir de las posibilidades de las computadoras que se evaluan finalmente en segundos, es manifestar un cierto desprecio frente a las teorías formalmente más desarrolladas tales como aquella del principio de los trabajos virtuales o aquella del trabajo mínimo. Se dirá que estos modos de cálculo clásicos ya no presentan interés sino histórico; lo que explica las palabras « desueto o anticuado » previamente mencionadas. Por supuesto, el peligro en este sentido, es evidente.

Parece necesario distinguir entre las ideas y el cálculo. Una cuestión desprovista de la filosofía y de los grandes principios que la rodean, puede llevar rapidamente el cálculo a una clase de utilitarismo sin dirección que ambas la seguridad y la estética pueden sufrir. No voy a examinar la cuestión de saber si tal olvido de las ideas básicas sucedió en Bélgica cuando se realizaron masivamente, en primer lugar los puentes Vierendeel, enseguida los puentes metálicos soldados y finalmente los puentes en hormigon precompiimido.

Sin embargo es obvio que los realizadores que utilizan hoy los datos de las computadoras no están siempre en contacto estrecho con la programación y con las ideas que ella debe reflejar. Puede haber ahi un hiatus que puede ser peligroso.

Siendo muy partidario del progreso, soy tambien muy exigente acerca de la significación de la palabra progreso.

De este manera que cuando el progreso técnico no es sino una variante moderna del espíritu de conquista que ha gobernado la historia por mucho tiempo, el bienestar y la justicia ya no son un objetivo sino subproductos fortuitos.

El principio de eficacidad principalmente no es un principio trancendente. Si se rechaza los valores de cultura, ya no tenemos ningun medio de apreciación de lo que hemos de proseguir y solo queda la tendencia de potencia!

Es la inversión de los valores: la potencia no es ya la posibilidad de realizar lo conveniente sino al contrario, lo conveniente queda supeditado por lo que aumenta la potencia.

Lo mismo occurre con el principio de economía que puede a la vez ser vital para el individuo y mortal para la colectividad.

Construir economicamente a menudo significa construir feo y como Shelley ló dijo:
« A thing of Beauty is a joy for ever ».
Esto significa tambien a menudo construir de una manera no favorable a la seguridad y por un corto plazo. Lo que puede ser ventajoso en un mundo de evolución rápida, pero que no es finalmente económico!

3. Naturaleza intrinseca de la iperestaticidad

Como lo indica su nombre, una estructura iperestática o estaticamente indeterminada es tal que solo se puede obtener las solicitaciones de sus organos por los únicos principios de la estática.
— Si el material de la construcción es deformable — lo que es por supuesto lo mas usual — y si lo que se llama los cimuntos son indeformables — lo que no es siempre estrictamente la verdad — se obtiene las condiciones suplementarias que determinarán el problema a partir de las relaciones cargas-deformaciones.

Por otra parte, ellas son siempre en número suficiente para una determinación univoca.

Si el material de construcción estuviera infinitamente rígido, el problema sería realmente indeterminable; así sería también si el coeficiente de elasticidad variara dentro de la materia de una manera mal conocida y en todos los casos en los cuales las relaciones cargas-deformaciones no estuvieran perfectamente previsibles. Esto constituye un primer aspecto de la hiperestática que debe ser subrayado.

— Una segunda característica que distingue la hiperestática de la estática es su aptitud a la autotensión.

La construcción isostática es por esencia libremente dilatable; en la ausencia ideal de solicitaciones externas, se encuentra automáticamente sin tensiones internas.

Una viga cargada y sostenida por dos soportes simples por ejemplo permanece en el mismo estado de solicitación si los dos soportes no se encuentran exactamente al mismo nivel.

La aptitud a la autotensión del dispositivo hiperestático modifica completamente la situación: se puede calcular una viga continua sobre tres soportes simples bajo una carga definida en la hipótesis de una fibra perfectamente rectilinea sin carga y de tres soportes estrictamente de nivel. Es entonces idealmente sin autotensión inicial. Si la realización efectiva no responde a estas dos condiciones pero modificandolas un poco de manera desconocida, hay autotensión y existe por consiguiente tensiones iniciales que el cálculo no toma en cuenta.

Una discordancia de soporte, del orden de 1 % de la luz, puede modificar ya las solicitaciones internas de 60 % respecto al calculo que no la tomaría en cuenta.

Este aspecto bien conocido de la hiperestática muestra que en este campo, se confía a la precisión del realizador la validez de las hipótesis y de los principios mismos que son la base de los cálculos. Lo que no existe de ninguna manera en las construcciones isostáticas. — Para haber comprender una tercera característica distinctiva de las estructuras hiperstáticas, consideremos ahora una corona hexagonal, continua, constituida de vigas idénticas, de secciones rectangulares y rigidamente juntadas.

Se dispone la corona horizontalmente sobre seis columnas que sirven de soportes simples en los vértices del hexagono; la corona está cargade uniformamente de p kilos por metro.

El cálculo hiperestático correcto de dicha corona muestra que se trata simplemente de 6 vigas independientes colocadas sobre soportes de extremidades con momentos de flexión nulos en los soportes y de valor $\frac{p\lambda^2}{8}$ en el medio. Claro que las fibras superiores, estando así comprimidas en todas partes, están acortándose mientras las fibras inferiores están alargándose. Se asegura la continuidad en las confluencias por el hecho que todas las vigas se inclinan ligeramente hacia el centro de la corona de tal manera que el polígono superior es, en carga, un poco más corto que el polígono inferior.

Si ahora sólo consideramos una tercera parte de esta corona hexagonal, formada por dos vigas sucesivas, se trata de una viga continua sobre tres soportes simples pero cuyas dos partes forman un ángulo de 120°. Los soportes pueden encontrarse perfectamente al mismo nivel, es ahora en el plano que la alineación ya no está respectada. El comportamiento de este sistema es todavia él de dos vigas independientes sobre soportes simples de extremidades.

Si se imagina ahora que el ángulo de 120° entre las dos vigas sucesivas se abre progresivamente, siempre se tratará de dos vigas sobre soportes simples excepto para el valor riguroso de 180° para el cual se trata de una viga continua sobre tres soportes de nivel con un momento de flexión sobre el soporte central.

Estas consideraciones muestran que para « captar en este caso la iperestaticidad », hay que ser muy sutil puesto que ella se asemeja a un caso crítico inestable en el cual el menor defecto le quita toda significación. Otra vez se confía a la precisión del realizador toda la validez del comportamiento que se supone.

— Al analizar las características de la hiperestática, no es posible olvidar las más esenciales aun si son evidentes.

En estática, la solución es independiente no solamente de la naturaleza del material usado y por consiguiente de los coeficientes de elasticidad específica de este material, sino también *de una parte de la geometría* de la estructura. Solo depende de la longitud de los elementos y no de la geometría de las secciones transversales. Por supuesto, la palabra « solución » se refiere aquí a la distribución en su conjunto de las solicitaciones, y entonces de los elementos de reducción MNT y no el pasaje simple de aquellos a la tensión interna.

Al contrario, en iperestática la solución depende no solamente de los coeficientes de elasticidad de los diferentes órganos sino tambien *de toda la geometría* de la estructura. La distribución de los elementos de reducción MNT está influenciada por el area y por el momento de inercia de todas las secciones de cada uno de los órganos. Por ejemplo, la addición de un refuerzo a un órgano, que no modifica nada a la solución-ni siquiera a la solución de este órgano -si la estructura es isostática, modifica en hiperestática la solución de todos los organos de la estructura; su influencia es immediatamente generalizada.

De ahí resulta en primer lugar que el cálculo hiperestático es un circulo vicioso y que se asemeja a una solución imaginada a priori y controlada a posteriori. Tal situación solo puede llegar a la perfección mediante un trabajo imenso. Ya se han dado cuenta hasta que punto este circulo era vicioso por el hecho que las modificaciones de perfiles sugeridas por el primer cálculo producen en la solución variaciones muy desconcertantes e imprevisibles.

Resulta en segundo lugar que idealmente, se tienen que tomar en cuenta todas las particularidades y que el desprecio de una de ellas o su estimación errónea modifica de principio toda la solución.

— Para acabar con las características de la hiperestática, es preciso hacer algunas consideraciones acerca de la economía. Así podremos hacer una comparación más avanzada, enseguida, entre los precios de coste de las realizaciones hiperestáticas y de las realizaciones isostáticas.

Les dije en el breve examen histórico del comienzo, que los ingenieros de 1750 se dirigeron hacia la continuidad de las estructuras y, por consiguiente, la hiperestática por una preocupación económica. Dicha preocupación es evidentemente legítima y fundamental aunque habrá que averiguar si la continuidad es verdaderamente el fin y si se obtiene realmente el objetivo perseguido.

Puesto que ahora sólo conpiezo el problema, me limitaré a un caso de referencia bien determinado, a saber él de una viga horizontal en hormigón de sección rectangular y uniformemente cargada; este caso tiene efectivamente una importancia categórica dada la multiplicidad de su reproducción en cualquier osatura.

De manera general, una viga incluida asi en un conjunto se encuentra en una situación intermediaria entre la viga biempotrada que tiene momentos de extremos $-\frac{P\lambda^2}{12}$ y en el centro $\frac{P\lambda^2}{24}$, y la viga sobre dos apoyos simples que tiene momentos de extremos nulos y momento central $\frac{P\lambda^2}{8}$.

Por otra parte, ellas son siempre en número suficiente para una determinación univoca.

Si el material de construcción estuviera infinitamente rígido, el problema sería realmente indeterminable; así sería también si el coeficiente de elasticidad variara dentro de la materia de una manera mal conocida y en todos los casos en los cuales las relaciones cargas-deformaciones no estuvieran perfectamente previsibles. Esto constituye un primer aspecto de la hiperestática que debe ser subrayado.

— Una segunda característica que distingue la hiperestática de la estática es su aptitud a la autotensión.

La construcción isostática es por esencia libremente dilatable; en la ausencia ideal de solicitaciones externas, se encuentra automáticamente sin tensiones internas.

Una viga cargada y sostenida por dos soportes simples por ejemplo permanece en el mismo estado de solicitación si los dos soportes no se encuentran exactamente al mismo nivel.

La aptitud a la autotensión del dispositivo hiperestático modifica completamente la situación: se puede calcular una viga continua sobre tres soportes simples bajo una carga definida en la hipótesis de una fibra perfectamente rectilinea sin carga y de tres soportes estrictamente de nivel. Es entonces idealmente sin autotensión inicial. Si la realización efectiva no responde a estas dos condiciones pero modificandolas un poco de manera desconocida, hay autotensión y existe por consiguiente tensiones iniciales que el cálculo no toma en cuenta.

Una discordancia de soporte, del orden de 1 % de la luz, puede modificar ya las solicitaciones internas de 60 % respecto al calculo que no la tomaría en cuenta.

Este aspecto bien conocido de la hiperestática muestra que en este campo, se confía a la precisión del realizador la validez de las hipótesis y de los principios mismos que son la base de los cálculos. Lo que no existe de ninguna manera en las construcciones isostáticas. — Para haber comprender una tercera característica distintiva de las estructuras hiperstáticas, consideremos ahora una corona hexagonal, continua, constituida de vigas idénticas, de secciones rectangulares y rigidamente juntadas.

Se dispone la corona horizontalmente sobre seis columnas que sirven de soportes simples en los vértices del hexagono; la corona está cargade uniformamente de p kilos por metro.

El cálculo hiperestático correcto de dicha corona muestra que se trata simplemente de 6 vigas independientes colocadas sobre soportes de extremidades con momentos de flexión nulos en los soportes y de valor $\frac{p\lambda^2}{8}$ en el medio. Claro que las fibras superiores, estando así comprimidas en todas partes, están acortándose mientras las fibras inferiores están alargándose. Se asegura la continuidad en las confluencias por el hecho que todas las vigas se inclinan ligeramente hacia el centro de la corona de tal manera que el polígono superior es, en carga, un poco más corto que el polígono inferior.

Si ahora sólo consideramos una tercera parte de esta corona hexagonal, formada por dos vigas sucesivas, se trata de una viga continua sobre tres soportes simples pero cuyas dos partes forman un ángulo de 120°. Los soportes pueden encontrarse perfectamente al mismo nivel, es ahora en el plano que la alineación ya no está respectada. El comportamiento de este sistema es todavia él de dos vigas independientes sobre soportes simples de extremidades.

Si se imagina ahora que el ángulo de 120° entre las dos vigas sucesivas se abre progresivamente, siempre se tratará de dos vigas sobre soportes simples excepto para el valor riguroso de 180° para el cual se trata de una viga continua sobre tres soportes de nivel con un momento de flexión sobre el soporte central.

Estas consideraciones muestran que para « captar en este caso la iperestaticidad », hay que ser muy sútil puesto que ella se asemeja a un caso crítico inestable en el cual el menor defecto le quita toda significación. Otra vez se confía a la precisión del realizador toda la validez del comportamiento que se supone.

— Al analizar las características de la hiperestática, no es posible olvidar las más esenciales aun si son evidentes.

En estática, la solución es independiente no solamente de la naturaleza del material usado y por consiguiente de los coeficientes de elasticidad específica de este material, sino también *de una parte de la geometría* de la estructura. Solo depende de la longitud de los elementos y no de la geometría de las secciones transversales. Por supuesto, la palabra « solución » se refiere aquí a la distribución en su conjunto de las solicitaciones, y entonces de los elementos de reducción MNT y no el pasaje simple de aquellos a la tensión interna.

Al contrario, en iperestática la solución depende no solamente de los coeficientes de elasticidad de los diferentes órganos sino tambien *de toda la geometría* de la estructura. La distribución de los elementos de reducción MNT está influenciada por el area y por el momento de inercia de todas las secciones de cada uno de los órganos. Por ejemplo, la addición de un refuerzo a un órgano, que no modifica nada a la solución-ni siquiera a la solución de este órgano -si la estructura es isostática, modifica en hiperestática la solución de todos los organos de la estructura; su influencia es immediatamente generalizada.

De ahí resulta en primer lugar que el cálculo hiperestático es un circulo vicioso y que se asemeja a una solución imaginada a priori y controlada a posteriori. Tal situación solo puede llegar a la perfección mediante un trabajo imenso. Ya se han dado cuenta hasta que punto este circulo era vicioso por el hecho que las modificaciones de perfiles sugeridas por el primer cálculo producen en la solución variaciones muy desconcertantes e imprevisibles.

Resulta en segundo lugar que idealmente, se tienen que tomar en cuenta todas las particularidades y que el desprecio de una de ellas o su estimación errónea modifica de principio toda la solución.

— Para acabar con las características de la hiperestática, es preciso hacer algunas consideraciones acerca de la economía. Así podremos hacer una comparación más avanzada, enseguida, entre los precios de coste de las realizaciones hiperestáticas y de las realizaciones isostáticas.

Les dije en el breve examen histórico del comienzo, que los ingenieros de 1750 se dirigeron hacia la continuidad de las estructuras y, por consiguiente, la hiperestática por una preocupación económica. Dicha preocupación es evidentemente legítima y fundamental aunque habrá que averiguar si la continuidad es verdaderamente el fin y si se obtiene realmente el objetivo perseguido.

Puesto que ahora sólo conpiezo el problema, me limitaré a un caso de referencia bien determinado, a saber él de una viga horizontal en hormigón de sección rectangular y uniformemente cargada; este caso tiene efectivamente una importancia categórica dada la multiplicidad de su reproducción en cualquier osatura.

De manera general, una viga incluida asi en un conjunto se encuentra en una situación intermediaria entre la viga biempotrada que tiene momentos de extremos $-\frac{P\lambda^2}{12}$ y en el centro $\frac{P\lambda^2}{24}$, y la viga sobre dos apoyos simples que tiene momentos de extremos nulos y momento central $\frac{P\lambda^2}{8}$.

El primer caso se realiza bastante bien en la parte inferior de una construcción donde las columnas son gruesas y el empotramiento casi perfecto; en la parte superior, las columnas son más finas y se aproximan del segundo caso, el de los apoyos simples de extremos.

Entre estos dos extremos, existe un nivel donde el empotramiento sera parcial y, más precisamente, tal que las distinctas rigideces proporcionan en la viga hiperestática momentos de empotramiento iguales que valen $-\frac{P\lambda^2}{16}$ mientras en el centro de la viga el momento es $+\frac{P\lambda^2}{16}$.

Hay que darse bien cuenta que este caso, que llamaremos caso ideal hiperestático, es condicionado por exigencias muy particulares, realmente ocasionales, y no generalisables.
Solo excepcionalmente, se podría adaptar la viga hiperestática a un momento $\frac{P\lambda^2}{16}$; lo más frecuentemente el momento criterio sera $\frac{P\lambda^2}{12}$, o más con un maximum $\frac{P\lambda^2}{8}$

Se sabe que, por su lado, la viga isostática presenta, en la mitad, el momento $\frac{P\lambda^2}{8}$ y de ello se podría deducir que la estructura hiperestática será en todo caso más económica. Pero eso no es exacto pues la viga isostática puede, con grande seguridad, defenderse por una disposición a decuada de sus apoyos. Es asi que con voladizos del orden de un quinto de la luz ella podría ser dos veces más económica. Este importante punto de vista merece ser estudiado en detalle; ello sa hará más adelante.

4. Informaciones proporcionadas por medidas sobre modelos en Fotoelasticidad

Despues de este repaso histórico y del análisis de varias características propias a la noción de hiperestaticidad, como por ejemplo: la incidencia de la precisión de las leyes tensión — deformación — la de la autotensión — la tendencia a la situación critica inestable — la influencia de la geometria total de la estructura — el aspecto económico — etc. parece util juzgar y medir el efecto de estas diversas características.

Tenemos primero acordarnos que varios puntos nos obligaron a considerar como importante la precisión de la realisación frente a la validez y a la significación misma de la solución obtenida por el cálculo.

El apuro frecuente de los constructores, los materiales simplificados que utilizan, y los plazos muy restringidos que se los imponen y que desean por otra parte, no son factores favorables a la buena ejecución de la cual se trata.

El hecho que el cálculo hiperestático necesita postular dimensiones — por lo menos relaciones entre los momentos de inercia — antes de ser comenzado, conduce como lo hemos dicho a un circulo vicioso.
Es precisamente el vicio de este circulo que hay que entender por haberlo vivido. Las sucesivas modificaciones a que se ve sometida tal solución, cuando deben adecuarse las secciones a las tensiones previamente obtenidas, son harto desconcertantes.
Las mismas no constituyen una ley simple que autorice una extrapolación segura.

Tal camino obliga a interrumpir la marcha del trabajo y a ensayar un cálculo de control a base de datos estimados, a los cuales la construcción responderá en cierta medida como lo veremos más adelante. Claro está que se llega asi a soluciones, pero ellas están lejos de ser óptimas, no son convenientes económicamente, ni responden a una sana concepción de base.

*
* *

El estudio de las estructuras que podemos hacer por la Fotoelasticidad es particularmente rico en informaciones debido a la visión general que ella proporciona.

Las diferencias entre las condiciones ideales admitidas a base del cálculo y el comportamiento de las estructuras, aun las más pequeñas, son perfectamente visibles mediante la observación fotoelástica.

Las condiciones reales de una estructura cargada, son perfectamente determinables cuando se conoce el poligono de las presiones de dicha estructura. Este poligono está constituido por las lineas de acción de las fuerzas trasmitidas por todos los elementos elongados. Los diagramos de los M, N, T se deducen de aquél sin ninguna ambigüedad posible.

Dicho polígono es cualitativo; su determinación experimental no necesita ninguna calibración del material del modelo.

Sólo los polígonos de fuerzas, que se deducen de él, son cuantitativos y proporcionan la magnitud de las fuerzas cuyas lineas de acción son los lados de aquél. Estos polígonos de fuerzas se gestan a partir de los valores conocidos de las cargas directamente aplicadas.

El poligono de las presiones debe satisfacer imperativos categóricos de la estática. Sus lados deben pasar por las distinctas articulaciones efectivas que comporta el sistema asi como por los puntos de flexión nula que presentan los distinctos elementos elongados; estos últimos puntos se destacan directamente y con grande precisión en fotoelasticidad.

Los lados del polígono de las presiones deben además satisfacer teoremos fundamentales tales como la convergencia de las tres lineas de acción para toda parte de la estructura sometidas soló a tres fuerzas; exigencia de la recta de Culmann cuando se trata de cuatro fuerzas, etc.

Durante un estudio fotoelástico, el polígono de las presiones efectivas puede determinarse directamente con mucha seguridad, sea a partir de las isocromáticas clásicas, sea a partir de las isopacas basados sobre las franjas llamadas « de igual espesor ».

El resultado experimental constituye varios contrales que provienen de lo ante dicho. Se conoce asi la situación estática real en la cual se encuentra el modelo, o, dicho de otra manera, se observa cómo se levantó la indeterminación estática en un modelo dado. El cálculo, por su parte, levanta esta indeterminación a partir de un gran número de factores: empotramientos perfectos, articulaciones ideales, vinculos contínuos, concordancia de los apoyos, relaciones entre los momentos de inercia de las distinctas partes, influencia de las refuerzas, etc. La solución a la cual se llega no será nunca la proporcionada por el modelo ejecutado y menos aún la de la construcción realizada a gran escala.

Ello muestra, hasta cierto punto, la vanidad de los cálculos en los sistemas altamente hiperestáticos. Ellos proporcionan facilmente esfuerzos de tracción en un lugar donde la realidad proporcionará una compresión, flexiones positivas donde serán en realidad negativas y asi sigue.

Claro que las grandes lineas de fuerzas serán globalmente validas y que las diferencias de que se trata intervendrán a menudo en regiones menos solicitadas que seran más influenciadas por la suma de los imponderables señalados.

Asi es que si una fuerza es la suma o la diferencia de dos otras fuerzas importantes cuyas lineas de acción tienen orientaciones vecinas, su linea de acción puede facilmente girar de 90° para modificaciones aún pequeñas en las magnitudes o posiciones de las dos fuerzas importantes.

El análisis photoelástico de modelos hiperestáticos de realización mecanisada y cuidadosa, hecha a partir del polígono de las presiones por ejemplo, es particularmente preciosa bajo este apecto.

Asi es que la posición de un punto de inflexión puede sufrir un grande desplazamiento cuando una articulación presenta un ligero rozamiento en lugar de ser ideal, cuando un empotramiento supuesto perfecto no lo es, cuando un apoyo simple presenta una componente tangencial de la reacción, cuando un refuerzo es modificado, cuando un momento de inercia es ligeramente distincto de lo previsto, etc. Las varaciones correspondientes del polígono de las presiones son frecuentemente asombrosas.

En ello quizás reside la real filosofía de la construcción hiperestática, en oposición a una situación estática.

Lo antedicho, dista mucho de la concepción de un problema, al que una computadora le daría solución precisa en tiempo que, a condición de cifrarlo independientemente de todo pensamiento, de toda filosofía, de toda consideración estática elaborada, se reduce a algunas segundas.

5. Análisis comparativo, de enfoque económico, entre la estática e hiperestática

Después de todas las previas consideraciones que se ubican más bien, yo creo, en un plano filosófico y científico, quisiera ahora concretizar un poco mis ideas y estudiar más particularmente la parte técnica y económica.

Vuelvo a considerar el caso de una viga de luz L, de sección rectangular, base b y altura h, sometida a una carga uniforme de p kg/m. La tensión unitaria debida al momento flector M vale $\frac{6M}{bh^2}$ y la igualamos a la tensión maxima admisible por el material, sea σ_a.

Podemos asi sacar la altura h de la viga, sea

$$h = \sqrt{\frac{6\,|M|}{b \cdot \sigma_a}}$$

Si, para facilitar, elegimos un ancho b de las vigas siempre igual, las alturas de las secciones serían proporcionales à $\sqrt{|M|}$.
Por supuesto es imposible realizar una viga que cumple con la relación:

$$h \div \sqrt{|M|}$$

Pues, primero un calculo hiperestático basado par ejemplo sobre la hipótesis de un momento de inercia I constante no tiene validez si el momento varia.
Segundo, llegariamos a situaciones validas solo para una carga bien definida y que además serían inestable en este caso.

Es mucho más seguro, más práctico y más simple basar las comparaciones sobre vigas prismáticas de « b » idéntica y de « h » constante.

Por eso tenemos que dimensionar la altura « h » segun el momento maximo y escribir

$$h = \sqrt{\frac{6\,|M_{max}|}{b\sigma_a}}$$

Si ligamos después la economía al volumen de material utilizado, llegamos a las siguientes conclusiones:

El volumen V de la viga vale:

$$V = L.b.h. = L\sqrt{\frac{6b}{\sigma_a}\cdot |M_{max}|}$$

Pero en el caso de una viga uniformemente cargada con $p^{kg}/^{m}$ y de luz L, el $|M_{max}|$ tendrá siempre la forma $K^2\ pL^2$.

y

$$V = \sqrt{\frac{6bp}{\sigma_a}}\cdot L^2 K$$

Es decir V ÷ K para una luz L dada.
K siendo la única variable, el precio lo es proporcional y lo llamamos *coeficiente de economía.* Se calcula por

$$K = \sqrt{\frac{|M_{max}|}{pL^2}}$$

Vamos analizar más detallamente los casos de una viga sobre dos, tres, ... N apoyos.

1. *Viga sobre dos apoyos o columnas*

Basamos nuestra comparación sobre el caso simple de la viga de Luz L construida como de costumbre en portico continuo hiperestático, fig. 1, o construida isostaticamente sobre dos columnas dispuestas de manera económica, fig. 2. Sólo la viga horizontal es cargada con $p\ ^{k}/^{m}$. La altura de las columnas es la misma y como frecuentemente, vale $\frac{4}{5}$ L.

En este trabajo inicial, no nos preocupamos de las consecuencias arquitecturales de las disposiciones de las columnas.

En el caso de la fig. 1, el calculo híperestático muestra que el momento maximum se produce en la mitad de la luz y vale:

$$M_{max} = \frac{pL^2}{10{,}5} = pL^2 \cdot 0{,}095238$$

El coeficiente K vale entonces $\sqrt{0{,}095238}$ o sea K = 0,3086. Un análisis más detallado muestra que este coeficiente no está aumentado cuando se tiene una distribución parcial de la carga *p*.

Por su lado, la columna tendrá que resistir a un esfuerzo normal $\frac{pL}{2}$ y al momento maximum $\frac{pL^2}{33{,}6}$.

En la realización isostática de la fig. 2, los apoyos simples fueron colocados dejando dos voladizos iguales a $\frac{\sqrt{2}-1}{2}$ L = 0,207 L.

En estas condiciones, los momentos sobre los apoyos son negativos e iguales en valor absoluta al momento central positivo. Tenemos

$$M_{max} = pL^2\left(\frac{\sqrt{2}-1}{2}\right)^2\cdot\frac{1}{2} = pL^2 \times 0{,}0214468$$

entonces

$$K = \frac{2-\sqrt{2}}{4} = 0{,}14644661.$$

El volumen V de la viga vale:

$$V = L.b.h. = L\sqrt{\frac{6b}{\sigma_a}\cdot |M_{max}|}$$

Pero en el caso de una viga uniformemente cargada con $p^{kg/m}$ y de luz L, el $|M_{max}|$ tendrá siempre la forma $K^2\,pL^2$.

y
$$V = \sqrt{\frac{6bp}{\sigma_a}}\cdot L^2K$$

Es decir $V \div K$ para una luz L dada.
K siendo la única variable, el precio lo es proporcional y lo llamamos *coeficiente de economía.* Se calcula por

$$K = \sqrt{\frac{|M_{max}|}{pL^2}}$$

Vamos analizar más detallamente los casos de una viga sobre dos, tres, ... N apoyos.

I. *Viga sobre dos apoyos o columnas*

Basamos nuestra comparación sobre el caso simple de la viga de Luz L construida como de costumbre en portico continuo hiperestático, fig. 1, o construida isostaticamente sobre dos columnas dispuestas de manera económica, fig. 2. Sólo la viga horizontal es cargada con p $^{k}/_{m}$. La altura de las columnas es la misma y como frecuentemente, vale $\frac{4}{5}$ L.

En este trabajo inicial, no nos preocupamos de las consecuencias arquitecturales de las disposiciones de las columnas.

En el caso de la fig. 1, el calculo híperestático muestra que el momento maximum se produce en la mitad de la luz y vale:

$$M_{max} = \frac{pL^2}{10,5} = pL^2 \cdot 0,095238$$

El coeficiente K vale entonces $\sqrt{0,095238}$ o sea $K = 0,3086$. Un análisis más detallado muestra que este coeficiente no está aumentado cuando se tiene una distribución parcial de la carga p.

Por su lado, la columna tendrá que resistir a un esfuerzo normal $\frac{pL}{2}$ y al momento maximum $\frac{pL^2}{33,6}$.

En la realización isostática de la fig. 2, los apoyos simples fueron colocados dejando dos voladizos iguales a $\frac{\sqrt{2}-1}{2}$ L = 0,207 L.

En estas condiciones, los momentos sobre los apoyos son negativos e iguales en valor absoluta al momento central positivo. Tenemos

$$M_{max} = pL^2\left(\frac{\sqrt{2}-1}{2}\right)^2\cdot\frac{1}{2} = pL^2 \times 0,0214468$$

entonces

$$K = \frac{2-\sqrt{2}}{4} = 0,14644661.$$

Pero un análisis más detallado muestra que si la carga p mobile esta colocada unicamente entre los apoyos, el momento será más grande y vale

$$M_{max\text{-}max} = pL^2\left(\frac{\sqrt{2}-1}{2}\right)^2 = pL^2 \cdot 0{,}04289322$$

y entonces

$$K' = \frac{\sqrt{2}-1}{2} = 0{,}20710678.$$

Tenemos entonces que hacer una diferencia en la definición de los coeficientes de economia:

Para las cargas imobiles que actuan sobre todo lo largo L, el coeficiente se llamará K y será calculado teniendo en cuenta el momento maximo cuando todo esta cargado.

Para las cargas mobiles, se puede obtener un momento más grande para una disposición parcial y defavorable de las cargas. Las partes que hay que cargar se conocen directamente utilizando las lineas de influencia.

Es con este momento más grande, provocado por una disposición adecuada de las cargas, que calcularemos el coeficiente de economia para las cargas mobiles. Este coeficiente para cargas mobiles será notado K'.

Para la viga de la figura 2, tendremos entonces

$$K = \frac{2-\sqrt{2}}{4} = 0{,}1464 \quad et \quad K' = \frac{\sqrt{2-1}}{2} = 0{,}2071.$$

La conclusión es que, para las vigas horizontales sobre dos apoyos, la disposición isostática economisa, para las cargas imobiles, más de la mitad del volumen, y para las cargas mobiles, el tercio del volumen, respecto a la construcción hiperestática clásica.

Para las columnas, la compresión es la misma: $\frac{pL}{2}$ pero la construcción hiperestática debe tener en cuenta un momento adicional y que no existe en la realización isostática. Las columnas hiperestáticas serán entonces más caras. Puesto que esta observación es general, no nos preocuparemos más de las columnas.

II. *Viga sobre tres apoyos o columnas*

En el caso de la viga sobre tres apoyos, comparamos la realización clasicá hiperestática de la figura 3 con la realización isostática de la figura 4 en la cual las longitudes de los distintos elementos *a, b, ... f,* serán determinados por la economia. La luz total vale L y la carga uniforme p.

El cálculo hiperestático se hace con un I constante y una altura de las columnas igual a $\frac{2L}{5}$. Llegamos asi a que los momentos en la viga horizontal valen $-\frac{pL^2}{86{,}4}$ en los extremos y $-\frac{pL^2}{39{,}2727} = pL^2.0{,}02546296$ cerca de la columna central.

El $|M_{max}|$ vale entonces $p.L^2.0{,}02546296$ y el coeficiente $K = 0{,}15957117$.

Otra vez, en este caso hiperestático con tres apoyos, este coeficiente podría aumentarse para una distribución parcial de las cargas pero el $K' = K$.

La columna central es solamente comprimida con $\frac{5}{9}p.L$ y las extremas comprimidas con $\frac{2}{9}pL$ y flexionadas con $\frac{pL^2}{86.4}$.

Encontrar la viga isostática favorable es bastante interesante. Podemos imaginar primero que uniformamos los momentos sobre los apoyos $M_1 = M_2 = M_3$ que serán negativos, y que nos areglamos para que en las partes b y d, tengamos momentos positivos engos maximos se localizarán en M_4 y M_5. Imponemos entonces que los cinco momentos sean iguales en valor absoluta lo que con $a + b + c \ldots + f = L$ proporciona cinco ecuaciones. La ventaja de ese procedimiento es que está sencillo y que se trabaja con una misma altura en toda la viga.

$$M_1 = M_3 \text{ impone } a = f$$
$$M_1 = M_2 \quad \text{»} \quad a^2 = bc$$
$$-M_1 = M_4 \quad \text{»} \quad b = a(1 + \sqrt{2})$$
$$-M_1 = M_5 \quad \text{»} \quad d = 2a\sqrt{2}$$

en fin $a + b + c + d + f = L$

y asi sacamos

$$a = \frac{2\sqrt{2} - 1}{14} L = 0{,}13060 \ L \simeq 0{,}13\,L$$

$$b = \frac{3 + \sqrt{2}}{14} L = 0{,}31530 \ L \simeq 0{,}31\,L$$

$$c = \frac{5 - 3\sqrt{2}}{14} L = 0{,}054097\,L \simeq 0{,}06\,L$$

$$d = \frac{8 - 2\sqrt{2}}{14} L = 0{,}369398\,L \simeq 0{,}37\,L$$

$$f = \frac{2\sqrt{2} - 1}{14} L = 0{,}13060 \ L \simeq 0{,}13\,L$$

La diferencia entre las columnas es entonces la misma: 0,37L y los voladizos extremos también: 0,13 L.

En este caso asi realizado, el momento max. tiene el valor comun

$$|M_{max}| = pL^2 \cdot \frac{9 - 4\sqrt{2}}{392} = pL^2 \cdot 0{,}00852843$$

$$\therefore K = 0{,}09234949$$

Esta disposición es seguramente lógica y económica sin ser por lo tanto la más económica. Lo vamos a justificar.

Supongamos que se acepte alturas diferentes para las dos vigas articuladas entre si. En la parte izquierda, esta altura será proporcional a $\sqrt{|M_1|}$ pero con la condición $M_1 = -M_4$. En la parte derecha haremos $M_2 = M_3 = -M_5$ y determinaremos la altura a partir de este valor comun de los momentos.

Tendremos sucesivamente:

$$b = a(1 + \sqrt{2}); \qquad f^2 = 2ac + c^2; \qquad d^2 = 8(2ac + c^2).$$

Como la suma tiene que dar L sacamos facilmente $c = f(a)$
El volumen de las dos vigas será entonces

$$V \div (a + b)\sqrt{|M_1|} + (c + d + f)\sqrt{|M_3|}$$

Tenemos una función cuyo minimo respeto a « a » proporciona:

$$a = 0{,}12450 \text{ L}$$
$$b = 0{,}30057 \text{ L}$$
$$c = 0{,}05897 \text{ L}$$
$$d = 0{,}38118 \text{ L}$$
$$f = 0{,}13477 \text{ L}$$

con un coeficiente K = 0,09220973

pero el inconveniente de tener dos alturas distintas.

Diremos aqui una conclusión general: la diferencia entre los K no justifica tal cálculo. El minimo es muy extendido y los valores relativos de las longitudes tienen una cierta libertad. Adoptaremos entonces siempre el cálculo económico de la viga isostática basandonos sobre la igualdad de los valores absolutos de los momentos.

La viga sobre tres apoyos de la figura 4 tiene entonces un coeficiente

$$K = 0{,}0923$$

pero une disposición ademada de las cargas sobre esta viga puede producir un momento más grande produciendo un

$$K' = 0{,}1334.$$

El tratamiento isostático de la viga sobre tres apoyos realiza entonces una economia más con relación a la realización hiperestática.

III. *Generalización*

Debemos abordar el caso de un número N de apoyos en una longitud que siempre llamamos L. Cuando L es conocida, N se deduce fácilmente por conveniencia. Para N apoyos la realización hiperestática requiere N − 1 pórticos pegados, de longitud $\frac{L}{N-1}$ y de altura $\frac{4}{3}\frac{L}{N-1}$.

Le puede deducir el coeficiente K*h* en función de N; es incluso posible establecer la expresión analítica de K*h* en $f(N)$ lo que da la curba superior de la figura 5.

La comparación de estos coeficientes *entre ellos* para los N diferentes, no es significativa desde el punto de vista económico.

Se les debe comparar solamente a los coeficientes de economía K*i* de la realización isostática de mismo N que vamos a establecer. Estos coeficientes K*h* suponen evidentemente que toda la longitud L sea congada. Convienen entonces para el peso muerto.

Está claro que una carga distribuida de una manera conveniente y defavorable da $K'h \geqslant Kh$ pero el estudio indica que el aumento es mínimo.

La curba de los K'*h* en función de N está dada fig. 6.

Es muy parecida a la de Kh de la figura 5 e intervienen para las cargas mobiles. Hay que indicar que en la práctica basta con aumentar de 20 % el momento máximo obtenido en la carga total para evitar el trazado de las lineas de influencia que es muy pesado en hiperestática. Esto equivale a aumentar de 20 % el Kh para obtenir el K'h.

El estudio que acabamos de hacer indica que este aumento es aqui demasiado importante.

* * *

La generalización de la concepción isostática puede hacerse de dos maneras, lo que nos impone de definirlas y de compararlas.

La figura 7 indica a la izquierda el procedimiento que llamaremos de pendulos para los casos de 4, 5 y 6 apoyos; y a la derecha el procedimiento con puentes para los mismos casos.

La disposición económica en cada caso está fundada en la igualdad de los $|M|$.

Llamamos péndulos el trozo de viga que se apoya en un solo punto y que se articula a otra viga.

Llamamos puente el trozo de viga que no tiene apoyo pero está articulado a dos otras vigas.

Para terminar hay trozos que reposan en dos apoyos.

Se ve que con el procedimiento de péndulo no existe cada vez que un trozo sobre 2 apoyos y que cada vez que se le añade un apoyo se añade un péndulo, a la izquierda una vez y a la derecha la otra.

En el procedimiento de puentes existen siempre vigas con 2 apoyos unidos con puentes y no hay un péndulo a una extremidad que en el caso de N impar.

La disposición de todos estos casos es muy simple: cuando se conoce L y que se ha escogido el número de apoyos N consecuente, se calcula la longitud a por

$$a = \frac{L}{2(1 + (N - 1)\sqrt{2})}$$

El voladizo de las extremidades de todos los casos es siempre a y las columnas son siempre equidistantes de $2a\sqrt{2}$. En el caso del procedimiento con puentes todos los puentes tienen la longitud $2a$.

La porción de cualquier péndulo comprendida entre su apoyo y la articulación hacia la viga con dos apoyos vale siempre $a(\sqrt{2} + 1)$; los valadizos de todas las vigas con dos apoyos valen $a(\sqrt{2} - 1)$ salvo los de las extremidades que valen a.

En todas las vigas el momento uniformizado vale $\left|\frac{Pa^2}{2}\right|$ y es sobre él que esta basado el K. En un caso como el otro no se trata de la disposición correspondiente al mínimo analitíco así como lo hemos indicado precedentemente sino de una disposición simple que está próxima de 1 ó 2 diez milésimas y que tiene la gran ventaja de imponer a todas las vigas la misma altura y a todos los intervalos el mismo valor.

El coeficiente K es el mismo y se calcula sin dificultad en función de N tanto en el sistema con péndulos como en el de los puentes

$$K = \frac{1}{2\sqrt{2}(1 + (N - 1)\sqrt{2})}$$

Una repartición discreta de la carga produce en uno o en otro caso momentos mas grandes que conducen a K' cuya expresión general es diferente según que N es par O impar.

pendulos

N par $$K'_b = K\sqrt{1 + \frac{1}{2}(\sqrt{2} + 1)(1 - (\sqrt{2} - 1)^N)}$$

N impar

$$K'_b = K\sqrt{\frac{(\sqrt{2} - 1)}{2}(1 - (\sqrt{2} - 1)^{N-1}) - \frac{(\sqrt{2} - 1)^{\frac{N+3}{2}}}{2} + \frac{(\sqrt{2} - 1)^{N+3}}{32} + 2}$$

Puentes

N par $$K'_p = K\sqrt{2} = 1{,}4142\,K$$

N impar $$K'_p = K\frac{11 - 2\sqrt{2}}{4\sqrt{2}} = 1.4445\,K$$

Se constata que para todo N se tiene $K'_p \leqslant K'_b$.

El sistema con puentes es pues el más económico y además mas racional porque compuesto de una mayoría de elementos presentan una estabilidad propia e independiente. Es pues este sistema el que se debe preconisar y comparar con el caso hiperestático del mismo N.

En esta comparación que indican los diagramas de las figuras 5 y 6. Se indica que desde el punto de vista del peso muerto la concepción isostática por puentes es *siempre* más económica que la realización hiperestática. Para $N \leqslant 5$ se economisa casi 50 % ; para $N \leqslant 6$ se economisa en término medio 25 %.

Desde el punto de vista de las cargas móbiles o si se quiere de la sobrecarga, la concepción es mas económica para $N \leqslant 7$. Mas adelante las dos curbas estan invertidas pero muy vecinas.

Estamos forzados de reconocer que no es verdad que la continuidad hiperestática sea por derecho, más económica que la concepción sana isostática.

Esta consideración debe unirse a las incertitudes que son inevitables a los cálculos y a las realizaciones hiperestáticas.

Para terminar este párrafo, queremos todavía oponernos a la objección que trata del voladizo « a » que sale del conjunto de los intervalos iguales a $2a\sqrt{2}$.

Las fantasías aıquitecturales son frecuentemente muy curiosas e imponen compromisos y adaptaciones que son frecuentemente sacrificios molestos y costosos.

Hay evidentemente medio de sacar partido artístico de la disposición aquí propuesta que tiene por lo menos el mérito de ser sana y económica.

6. Conclusiones

De todas las soluciones estáticas posibles de un sistema estáticamente indeterminado, el cálculo proporciona una, basada en leyes y condiciones ideales de realización; debe destacarse, que esta solución — aún en el caso de comportar errores de cálculo — permanecerá hasta cierto punto dentro de los límites aceptados por la construcción. Si se estima erroneamente que el momento flector es nulo en determinada sección, y que, por lo tanto, dicha sección se construye de tal manera que resulte inepta para trasmitir un momento, podremos tener la seguridad que en definitiva el momento no existe.

Imaginemos, por ejemplo, que para cargas bien determinadas colocadas sobre una construcción n veces hiperestática, el cálculo proporciona en la misma $n + 1$ puntos aislados, en los cuales el momento flector es nulo; y supongamos que se efectúa la construcción de modo estrictamente riguroso con el cálculo, es decir, colocando articulaciones efectivas en estos $n + 1$ puntos. Tendríamos así un mecanismo cinemáticamente desplazable, en equilibrio inestable, bajo efectos de estas cargas y la construcción se desplomaría, a causa de una pequeña variación de las mismas. Igualmente ocurriría sin estas modificaciones porque:

1) el equilibrio es inestable;
2) el cálculo en sí mismo es falso, porque no permite preveer un momento de inercia nulo en estos puntos.

Agregando más consideraciones a las formuladas, podemos expresar: que si bien la construcción hiperestática, obedece en cierta medida a un cálculo — sea exacto o falso — basado en varias hipótesis ideales — que serán o no respetadas —; aquella en definitiva no difiere mayormente de la construcción isostática, la que en todo caso ofrece hipótesis de base mucho menos numerosas y vulnerables, a la vez que una realización mucho más segura y sistemática.

Pero trabajando de esta manera, es decir eligiendo cuidadosamente las secciones de acuerdo al resultado de un cálculo hiperestático o adecuándolas de modo muy grosero, lo que debe reconocerse, es la manera más usual de trabajar, se construye, en definitiva, isostáticamente, pero de modo deficiente.

Se libra al azar de un cálculo exacto o falso, y de una realización que tiene poco en cuenta este cálculo, toda la concepción estática de la obra. Una idea estática clara, puesta de manifiesto al iniciarse la concepción, llevará a un cálculo mucho más seguro y mucho más facil, y por otra parte, a controles directos y a una realización incapaz de modificar esta concepción. Ello además, con mayor economía y seguridad. En efecto, después de un cálculo isostático es posible introducir modificaciones en la altura h de alguna vigas, con refuerzos, por ejemplo, sin que el cálculo pierda de su exactitud. Existe aquí una posibilidad de economía suplementaria muy factible, que no tiene su equivalente en hiperestática.

La conclusión de este trabajo no implica la necesidad absoluta de construir isostáticamente; ya que ciertas consideraciones sobre la rigidez y otros factores, pueden justificar la hiperestaticidad o por lo menos aparentar hacerlo.

Hemos querido llamar la atención sobre la delicadeza del problema; sobre la vanidad que pretende una solución, en el caso de un alto grado de hiperestaticidad; y sobre el peligro que representaría el uso exclusivo y la confianza ciega en la computadora sin que una concepción firme y un juicio claro asuman la interpretación de sus resultados.

Diremos, al terminar, que sin duda alguna, la hiperestática constituye un excellente medio para formarse en la estática en sí, y que esta última debe intervenir como punto de referencia para todas las soluciones hiperestáticas.

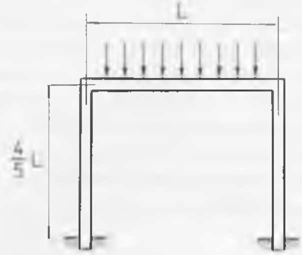

FIG. 1.

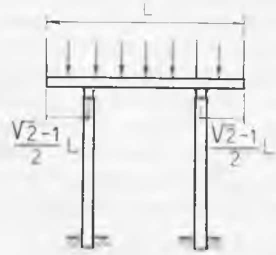

FIG. 2.

FIG. 3.

FIG. 4.

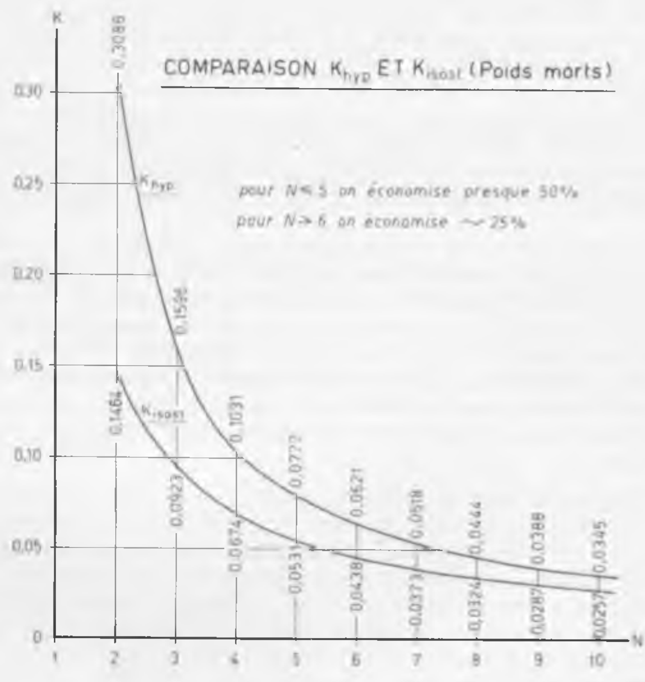

FIG. 5.

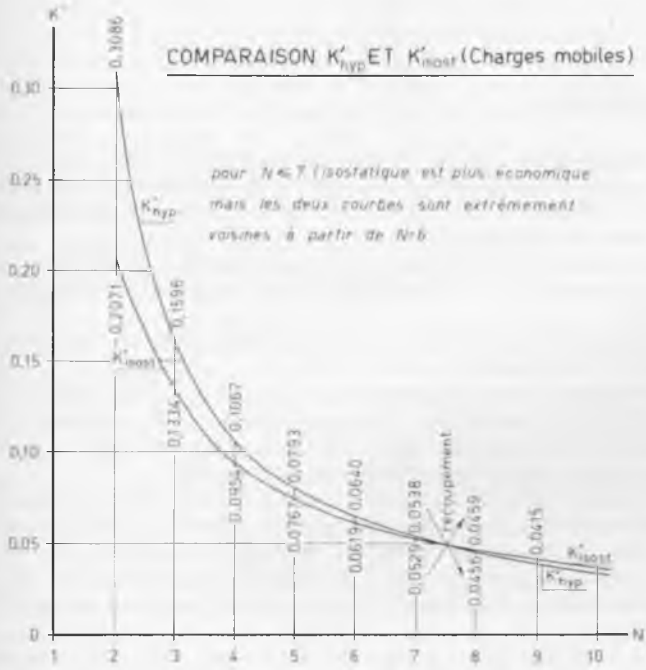
COMPARAISON K'hyp ET K'isost (Charges mobiles)
pour N ≤ 7 l'isostatique est plus économique
mais les deux courbes sont extrêmement
voisines à partir de N=6
K'hyp
K'isost
0,3086
0,2071
0,1596
0,1334
0,1067
0,0954
0,0793
0,0767
0,0640
0,0619
0,0538
0,0529
0,0459
0,0456
0,0415
recoupement
K'
N
0,30
0,25
0,20
0,15
0,10
0,05
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

Fig. 6.

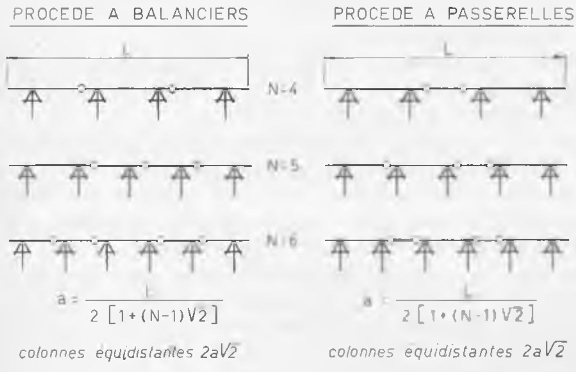
PROCEDE A BALANCIERS
PROCEDE A PASSERELLES
L
N=4
N=5
N=6
a = L / 2 [1 + (N-1) V2]
colonnes equidistantes 2aV2

Fig. 7.