

EL COEFICIENTE DE SEGURIDAD

Por ALFREDO PAEZ BALACA,

Ingeniero de Caminos.

Continúa y concluye el interesante trabajo iniciado en nuestro número anterior, dedicándose la mayor parte del presente artículo a la aplicación práctica de la teoría expuesta para la determinación del coeficiente de seguridad más indicado en cada caso, según la clase de obra y las circunstancias que concurren en su ejecución.

(Conclusión.)

Las leyes de vínculo.

Una vez establecidas las leyes individuales de probabilidad y representadas sus funciones de distribución, se determina, bien por procedimientos analíticos o por cálculos gráficos, la ley global de probabilidad conjunta del producto

$$\gamma = x \cdot y \cdot z \cdot t \cdot u \quad [5]$$

de todos y cada uno de los distintos factores de corrección, factores que, por ser verdaderas variables estocásticas, fluctúan dentro del campo real positivo, con sus peculiares leyes de probabilidad individual.

Dada la forzosa brevedad de este artículo, no se hace posible justificar y detallar las expresiones matemáticas, o los procedimientos gráficos, conducentes a la determinación de tal ley de probabilidad. Basta con decir que los procedimientos gráficos permiten resolver el problema con toda generalidad, mientras que las complicaciones que se derivan de la técnica de la integración suponen un serio obstáculo para el cálculo analítico, cuyo campo de acción se encuentra limitado, por esta causa, a aquellas expresiones que, ligadas unas con otras por unas determinadas condiciones de vínculo, den lugar a unas nuevas funciones que, bien de un modo directo, o bien por sus desarrollos en serie, sean susceptibles de poderse integrar.

Sea como fuere, siempre será posible, para un conjunto de cinco funciones estocásticas, encontrar una nueva función, $\Gamma(\gamma)$, que expresen la probabilidad de que la variable γ alcance un valor superior a uno dado γ_0 . Puesto que la condición de hundimiento está definida por la desigualdad

$$\gamma > C, \quad [6]$$

la probabilidad de que tal suceso ocurra queda automáticamente determinada por la función $\Gamma(\gamma) \gamma = C$.

En virtud de estas transformaciones, queda expresada la probabilidad de hundimiento, en función del coeficiente de seguridad C , previsto en el proyecto.

Ahora bien: este valor T_h de la probabilidad de hundimiento no está lo suficientemente definido para

poderlo considerar como un dato del problema. Al no existir unas normas concretas que fijen su valor para los distintos casos particulares de aplicación, habría que determinarlo a través de unas estadísticas, no siempre apropiadas, ni tampoco de inmediata disponibilidad.

Se hace preciso, por lo tanto, establecer una nueva relación que, al ligar los valores de T_h y C por medio de una cierta ecuación, permita, en colaboración con la anterior, deducir directamente las dos incógnitas consideradas.

Como lógicamente puede suponerse, esta condición adicional hay que deducirla del estudio de la variable que falta por analizar. A tal efecto, conviene recordar que, de todo el conjunto de parámetros que influyen en el coeficiente de seguridad: tipos de sobrecarga, bases teóricas de cálculo, errores numéricos, dispersión de la resistencia propia del material, defectos de ejecución y magnitud de los daños causados, sólo se han hecho intervenir los cinco primeros, sin que hasta el presente se haya hecho mención particular de las proporciones de la catástrofe, a pesar de su notoria importancia.

Falta, por consiguiente, analizar la influencia de la última variable citada, para ligar después este último parámetro con las restantes variables por medio del establecimiento de una ley, más amplia por su contenido que la función anteriormente hallada y destinada a expresar, en una sola condición, la relación que vincula el conjunto total de variables.

Prescindiendo, por el momento, del aspecto cuantitativo que más adelante se desarrolla, resulta curioso observar la discrepancia de opiniones existentes respecto a la influencia que, sobre el coeficiente de seguridad, ejerce la magnitud de los daños causados por el posible hundimiento. Mientras que los proyectistas, en especial cuando se trata de grandes presas, fuerzan tal vez excesivamente el margen de seguridad para cubrir el riesgo de un suceso catastrófico, los investigadores apenas conceden belligerancia a esta variable, bien por plantear el problema desde el punto de vista del coeficiente de seguridad real, que posee una estructura ya construida, o bien, como postula W. Wierzmicki, por mantener el criterio de fijar el coeficiente de seguridad con arreglo a una cierta probabilidad de hundimiento, establecida *a priori*, y basa-

da, a su vez, en los datos estadísticos de otras catástrofes propias de la utilización o explotación de la estructura, como incendios, choques, descarrilamientos, etcétera.

Toda construcción lleva aparejado el riesgo de su hundimiento, origen de unos daños determinados. Si se consideran n obras idénticas, con una probabilidad $1/n$ de hundimiento y cuyos daños fuesen en todas ellas iguales a D , cabe esperar que, en un plazo de tiempo equivalente a la vida de servicio de sus estructuras, se hundirá una de ellas, dando lugar a unas pérdidas materiales y humanas equivalentes a D . Si P es el coste de primer establecimiento de cada una de las obras, en el conjunto de las n construcciones realizadas, la pérdida total ha sido $D + P$. Puesto que se ignora *a priori* cuál va a ser la desafortunada estructura que se va a hundir, por tener todas ellas la misma probabilidad, se deduce que, a cada obra, corresponden unos daños virtuales iguales a $1/n(D + P)$, es decir, equivalentes al producto de la probabilidad de hundimiento, por los daños causados, incluyendo en los mismos el coste de la propia estructura destruida.

En un criterio de amplia economía nacional, el quebranto económico que virtualmente supone una obra, viene representado, según el anterior razonamiento, por la esperanza matemática del hundimiento, es decir, por la cantidad:

$$1/n(D + P); \quad [7]$$

en donde $1/n$ representa la probabilidad del hundimiento, probabilidad que anteriormente se ha designado por Γ_h .

Sumando a esta partida el coste P de primer establecimiento, se deduce que, en un sentido económico general, el desembolso total realizado por el propietario y los damnificados, es decir, el coste total que para la colectividad supone la construcción de la citada obra, es:

$$P + \Gamma_h(D + P) = R; \quad [8]$$

en donde el segundo término del primer miembro, es decir, la cantidad $\Gamma_h(D + P)$ tiene el mismo significado conceptual y cuantitativo que una prima aseguradora de la construcción para cubrir los riesgos y pérdidas de su improbable hundimiento.

La solución más económica corresponde, por consiguiente, a aquella en la cual la expresión [8] sea mínima. De un modo más preciso, el anterior principio puede enunciarse diciendo qué, en el campo de las infinitas soluciones que pueden imaginarse con sólo variar el coeficiente de seguridad de una misma estructura, en proyecto, la solución lógica, por más económica, corresponde a aquella cuyo coste conjunto de la obra en sí y de la prima aseguradora de los posibles daños que se pueden causar con su hundimien-

to, incluyendo en ellos la reconstrucción de la obra, alcance un valor mínimo (*).

Una vez establecido el principio económico, el proceso operatorio a seguir para la determinación del coeficiente de seguridad se desprende, inmediatamente, como lógica consecuencia, de la condición de mínimo impuesta. A tal efecto, se tantearán varios coeficientes arbitrarios que, introducidos en la función de probabilidad Γ , primero, y en la [8], después, conducirán a una serie de resultados numéricos, representativos de costes totales de obra asegurada, cuyo valor mínimo definirá la solución más económica. El coeficiente de seguridad C que corresponda a esta solución de valor mínimo, será el coeficiente que debe adoptarse en la mencionada obra, apareciendo la probabilidad de hundimiento como una función dependiente de C .

Valores numéricos.

Una vez establecido el proceso teórico, se hace necesario determinar las leyes estadísticas que definen cada una de las distintas distribuciones individuales, en los diversos casos particulares que se pueden considerar.

Mediante la adecuada recopilación de datos y ensayos efectuados en los Centros Experimentales o de Investigación, tanto nacionales como extranjeros, se han podido reconstruir las leyes de probabilidad, referentes al primero y cuarto apartados, en sus modalidades de sobrecargas en puentes, locales públicos y edificios para viviendas, así como las cargas de rotura en probetas de hormigón y de acero.

De un modo análogo, y después de revisar diversos proyectos, se ha podido establecer la ley de probabilidad de los errores numéricos.

Los dos grupos restantes requirieron un estudio especial. La extensa serie de datos recogidos no fueron suficientes para poder determinar, de un modo directo, las dos leyes de probabilidad que faltaban por establecer, como lógica consecuencia de la ineludible interferencia de unas causas sobre otras. Cada ensayo registrado estaba influenciado por una serie de fenómenos perturbadores, unas veces fácilmente separables, pero de difícil eliminación en otras circunstancias.

No es posible obtener una consecuencia inmediata de la confrontación entre las deformaciones observadas en una estructura y las obtenidas en el cálculo, por causa de la multitud de fenómenos que intervienen en la existencia de tales divergencias. El módulo de elasticidad real no coincide con el supuesto en el cálculo, que, por otra parte, lleva implícito un error inevitable en el establecimiento de sus hipótesis fundamentales. Las dimensiones de los distintos elementos tampoco

(*) Este principio fué formulado por E. Torroja en el II Congreso Internacional de Ponts et Charpentes, celebrado en Lieja el año 1948.

será un reflejo exacto de las prescritas en el proyecto, y cualquier defecto en el replanteo de una directriz puede ser origen de una acusada alteración del estado de tensión real sobre el previsto.

Se hace preciso operar por medio de sucesivas eliminaciones de fenómenos extraños y superposiciones de fenómenos propios, dando lugar a una serie de cálculos, gráficos o analíticos, análogos o inversos a los utilizados para la determinación de la ley de distribución del producto $y = x^i \cdot y^j \cdot z^k \cdot t^l \cdot u$, y que, no obstante su sencilla apariencia, son harto laboriosos, toda vez que las distintas causas perturbadoras vienen representadas por otras tantas leyes de probabilidad, cada una de las cuales es preciso determinar previamente, unas veces por experimentación directa y otras por medio de nuevos ciclos de sucesivas operaciones.

Una vez reconstruidas las diversas distribuciones individuales, con sus distintas variantes (cálculo riguroso, cálculo aproximado, obras muy vigiladas, normales y poco controladas), pueden trazarse las funciones de probabilidad del producto y de las cinco leyes individuales, en todas las combinaciones posibles a que sus distintas variantes dan lugar.

En virtud de los razonamientos expuestos en el apartado anterior, puede deducirse, de esta variable estocástica, la ley de probabilidad de hundimiento, en función del coeficiente de seguridad C .

Aplicación práctica.

Puede decirse que, como norma casi general, las características resistentes de los materiales que se emplean en la construcción, están previamente fijadas y son difícilmente alterables. Si se trata del hierro o del acero, sus propiedades mecánicas están determinadas por las disponibilidades del mercado; pero tampoco cuando se construye con hormigón se puede elegir libremente su carga de rotura, sino que es necesario prefijarla de acuerdo con un conjunto de circunstancias económicas, locales o de producción y puesta en obra, que limitan la calidad del mismo o, al menos, hacen poco recomendable su modificación.

En consecuencia, se hace preciso dimensionar la estructura de tal modo que, con un cierto margen, queden satisfechas las condiciones límites impuestas por los materiales encargados de realizar la obra, lo cual implica la necesidad de conocer el valor del coeficiente de seguridad con anterioridad al propio desarrollo de los cálculos justificativos del proyecto.

Por otra parte, si se desechan las fórmulas empíricas por su falta de rigor y adaptación al caso particular que se considera, es también evidente que no es posible la determinación lógica y racional de este factor, mientras la propia obra no esté lo suficientemente definida para poder constituir un problema concreto, razón por la cual es preciso presuponer que no sólo está elegido el tipo de estructura a construir, sino que también se ha realizado un rápido dimensionado

de la misma, a fin de conocer, como es práctica, frecuente en los problemas ingenieriles, el coste o presupuesto aproximado de la solución adoptada, presupuesto que, desglosado en varias partidas esenciales, ha servido de base y justificación para la eliminación de las restantes soluciones ensayadas. En realidad, todo el desarrollo de los cálculos justificativos no es más que la comprobación de una serie de dimensiones previamente concebidas por el ingeniero o arquitecto proyectista.

En rigor, la determinación del valor más conveniente del coeficiente de seguridad no es más que la introducción de una nueva variable que permita el establecimiento de las más apropiadas dimensiones de una estructura, con el fin de conseguir un mínimo presupuesto, compatible con la seguridad, dentro del tipo de estructura elegido, y que, en general, constituirá un estudio de dimensionado correctivo, complementario a la discusión comparativa de las distintas soluciones proyectadas.

Son, pues, datos de este problema:

- I. Peso aproximado de los distintos elementos que integran el conjunto, establecidos con un coeficiente de seguridad arbitrario, tres, por ejemplo, como valor más usualmente adoptado.
- II. Coste o precio aproximado de dichos elementos.

Además de los datos consignados en los dos apartados arriba mencionados, influyen notablemente sobre el valor adecuado del coeficiente de seguridad a introducir en el proyecto, un conjunto de variables características del proceso de ejecución de la obra y del proyecto mismo. Es indudable que una obra que se prevé ha de estar poco vigilada, debe dimensionarse con un margen de seguridad más amplio, para cubrir en lo posible los riesgos que se derivan de una defectuosa realización, pudiéndose decir otro tanto de aquellos casos en que los materiales a emplear sean más o menos dudosos en cuanto a su comportamiento resistente.

Del mismo modo, un estudio teórico funcional de la estructura, realizado con poca minuciosidad, por premuras de tiempo o por otra circunstancia cualquiera, necesita, como contrapartida, un mayor valor del coeficiente de seguridad, destinado a compensar el deficiente cálculo de los elementos proyectados. Finalmente, en aquellos casos en que sea de esperar una amplia fluctuación de las sobrecargas actuantes, deberá también adoptarse un mayor margen de seguridad para prever la posibilidad de ocurrencia de una sobrecarga imprevista.

En virtud de los razonamientos precedentes, son también datos:

- 1.º Grado de control en la ejecución de las obras, con arreglo a la clasificación de: a) Obras muy vigiladas; b) Obras de tipo normal, y c) Obras poco controladas.

2.^o Tipo de sobrecarga actuante: a) Puentes y garajes; b) Edificios para viviendas; c) Oficinas, locales públicos y espectáculos.

3.^o Bases teóricas de cálculo, establecidas con arreglo a los apartados:

a) Cálculo riguroso de estructuras rectilíneas.

b) Cálculo normal de estructuras rectilíneas.

c) Cálculo riguroso de estructuras curvas y espaciales.

d) Cálculo normal de estructuras no rectilíneas.

e) Cálculos rápidos de anteproyecto, o aproximados.

4.^o Tipo de material a emplear, según se trate de estructuras metálicas, o de hormigón en masa, o armado.

Para completar el conjunto de datos necesarios en el cálculo del coeficiente de seguridad, sólo falta por considerar la importancia del quebranto económico que, para la economía nacional, representa, en su más amplio sentido, el hundimiento de la obra en proyecto. Es evidente que, cuanto mayores sean las proporciones del desastre a que puede dar lugar la rotura de uno o varios elementos, mayor ha de ser el valor del coeficiente de seguridad, y puesto que la magnitud de la catástrofe sólo puede apreciarse por medio de una adecuada valoración de los daños causados, se hace

preciso estimar las pérdidas humanas y materiales que el desgraciado accidente puede producir.

Con el fin de eliminar el penoso trabajo que para el proyectista impone la búsqueda de datos y estadísticas de accidentes a que el posible hundimiento puede dar lugar, se han construido unas tablas, en las cuales puede obtenerse, de un modo inmediato, el coste representativo de las pérdidas causadas por el desgraciado siniestro.

Una vez en posesión de todos los datos iniciales, puede emprenderse ya el proceso operatorio; pero antes de comenzarlo, conviene advertir que, en buena lógica, no existe ninguna razón fundamental que obligue a adoptar un mismo coeficiente de seguridad para todos los elementos o, mejor, partes funcionales de una misma estructura. En general, dicho coeficiente será distinto para el forjado que para las carreras o largueros, y distintos, a su vez, los correspondientes a los soportes, de los referentes a las vigas o elementos principales.

Con el fin de ordenar los cálculos del coeficiente de seguridad de un determinado grupo estructural, es conveniente seguir el desarrollo indicado en el cuadro adjunto, en cuyo encabezamiento se anotan las constantes fijas.

$$1 + \frac{Q_m}{Q_s}; \quad \frac{\Phi_s}{Q_s}; \quad P_m; \quad P_{\Phi_s}; \quad D$$

CUADRO DE COSTES TOTALES

$$\text{Valores fijos: } K_m = 1 + \frac{Q_m}{Q_s} \quad K_{\Phi_s} = \frac{\Phi_s}{Q_s} \quad P_m = \dots \quad P_{\Phi_s} = \dots \quad D = \dots$$

1	Coeficiente de seguridad C_i .....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
2	Coeficiente de reducción $\bar{\omega}_i$ (Tabla 8-III) .....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
3	$m_{s,i} = K_m + \bar{\omega}_i \cdot K_{\Phi_s}$ .....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
5	Coste de 1. ^{er} establecimiento $P_i = P_m + \bar{\omega}_i P_{\Phi_s}$ (en ptas.) .....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
6	$P_i + D$ (en millones de ptas.) .....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
4	Probabilidad de hundimiento Γ_{hi} (Abacos 1 a 75),	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
7	Coste total $R_i = P_i + (P_i + D) \Gamma_{hi}$ .....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

En cada pieza o conjunto de piezas análogo, pueden considerarse tres clases de cargas o solicitudes: La primera, Q_s , se refiere a la sobrecarga accidental, definida con arreglo a las normas de la Instrucción. La segunda, Q_m , corresponde a la sobrecarga permanente que actúa, como la anterior, sobre la pieza o grupo de piezas que se considera, pero con exclusión del peso propio de estos últimos elementos. Se refiere, por decirlo de otro modo, al peso muerto que, de un

modo permanente, grava sobre el grupo estructural cuyo coeficiente de seguridad se desea averiguar. La tercera representa el peso propio, ϕ , del elemento o elementos resistentes que integran el citado grupo funcional, que, por consiguiente, dependerá del valor asignado al coeficiente de seguridad.

El valor de la constante

$$K_m = 1 + \frac{Q_m}{Q_s} \quad [9]$$

queda, en virtud de estas definiciones, completamente determinado y representa, junto con la constante K_{ϕ_s} , la importancia de la acción de la sobrecarga sobre el conjunto de elementos que se considera. En rigor, sería preciso sustituir las sobrecargas Q_m , Q_s y ϕ por las tensiones σ_m , σ_s y σ_ϕ creadas por ellas en la fibra extrema de la sección cuyo coeficiente de seguridad se desea conocer; pero como el valor que se introduce es la relación entre las mismas, en la práctica basta con considerar directamente las sobrecargas actuantes en lugar de los efectos que ellas producen.

Según ya se ha visto, el valor del peso propio ϕ es función del coeficiente de seguridad C ; pero si, como es práctica usual, se dimensiona la estructura rápidamente y a modo de anteproyecto, con un coeficiente tres, sus dimensiones quedarán inmediatamente determinadas en este tanteo inicial que, según se ha dicho anteriormente, sirve de base para la estimación del presupuesto de la obra y para la discusión de soluciones.

Por esta razón, y a título de punto de referencia, aparece entre las constantes el peso propio ϕ_s , representativo del valor particular del peso de los elementos resistentes en cuestión, cuando estos últimos se han dimensionado con un coeficiente de seguridad tres.

Otro tanto puede decirse de los presupuestos o costes P_m y P_{ϕ_s} . El primero representa el coste de primer establecimiento de toda la obra (estructura, cierres, muros y accesorios), que con su peso Q_m carga sobre la pieza o piezas análogas en estudio. Dicho de un modo más riguroso, representa el importe de los desperfectos a que puede dar lugar la rotura de la pieza considerada, con exclusión del coste de esta última. La segunda partida, P_{ϕ_s} , representa, como en el caso anterior de los pesos propios, el coste de primer establecimiento de la pieza o conjunto de piezas resistentes, de peso ϕ_s , dimensionadas con un coeficiente de seguridad igual a tres.

Finalmente, el valor de D , suma de las pérdidas humanas y materiales causadas por el hundimiento, se deduce añadiendo a los daños materiales que se estiman como probables la partida correspondiente al primer sumando, que se obtiene bien por medio de los datos facilitados por la citada tabla de posibles daños, o bien por la evaluación directa qué, por diversos conceptos, crea el proyectista como más oportuno.

Una vez definidos estos valores, la marcha a seguir es completamente automática. Para ello se escriben, en la primera fila, los diversos valores del coeficiente de seguridad que se quieren tantear. En correspondencia con ellos se anotan, en la segunda fila, los coeficientes ω_i obtenidos de una tabla auxiliar de reducción de pesos propios, según distintos tipos de piezas, destinada a eliminar la enojosa tarea que para el proyectista supone la determinación de nuevos pesos propios y presupuestos para diversos dimensionamien-

tos con diferentes coeficientes de seguridad. A continuación se calculan los coeficientes $m_{s,i}$, iguales a la suma del producto $\omega_i K_{\phi_s} + K_m$.

Conocidos ya los valores de $m_{s,i}$, pueden calcularse, junto con los correspondientes valores de C_i , las probabilidades de hundimiento $\Gamma_{h,i}$, por medio de los oportunos ábacos, que, a causa de su extensión, no pueden figurar en el presente resumen. Estos nomogramas, de dos variables, $m_{s,i}$ y C_i , determinan el valor de la citada probabilidad, en millonésimas; con arreglo a los distintos casos de sobrecargas en locales públicos, viviendas o puentes; cálculo riguroso, normal o aproximado; estructuras de hormigón o metálicas, y obras muy vigiladas, normalmente ejecutadas o poco controladas.

Con estos valores se rellena la fila 4, que, por comodidad, se ha desplazado dos lugares, hacia abajo, en el cuadro adjunto. De un modo análogo al efectuado en la fila 3, se completa ahora la fila 5, cuyos datos aparecen bien en la cabecera del cuadro o bien en la fila 2.

Sumando a esta fila la cantidad constante D , se obtiene la fila 6, que conviene expresar en millones de pesetas. De este modo, si la fila 5 representa el valor en pesetas del coste de primer establecimiento, y la fila 4 se ha escrito, tal como aparece en los ábacos, en millonésimas, el coste total R_i de obra asegurada (fila 7), se deduce rápidamente, por simple adición de la fila 5, al producto de las filas 6 y 4.

Las distintas columnas así calculadas establecen una mutua correspondencia entre los valores del coeficiente de seguridad tanteado C_i y sus respectivos costes totales de obra asegurada R_i . Con arreglo a este sentido económico, más amplio que el de primer establecimiento, el coeficiente de seguridad C , a adoptar en el proyecto, corresponde a aquel valor C_{nir} , cuyo coste total de obra asegurada, R_{min} , goce de la propiedad de ser mínimo.

Como ya se ha apuntado en páginas anteriores, no existe ninguna razón por la cual el coeficiente de seguridad a introducir en los cálculos sea el mismo en toda la estructura. De un modo general, y con las excepciones a que una regla tan amplia da lugar, basta con hallar en la práctica tantos coeficientes de seguridad distintos como partes fundamentales de estructura o, mejor, tipos de piezas distintas, intervienen. Así, en un edificio, es conveniente adoptar un coeficiente de seguridad para el forjado, otro para vigas y otro para pilares en general. En un viaducto, cabe considerar otros tres coeficientes: uno para forjados y largueros del tablero, un segundo para la palizada y tímpanos y un tercero para el arco, pudiendo desglosarse el primero en dos, como correspondientes a los largueros y al forjado, por separado. En algunos casos especiales, como en las cubiertas de campos de deportes, es conveniente estudiar dos coeficientes de seguridad: uno, considerando como daños los causados en la hipótesis de estar el graderío total-

mente ocupado por los espectadores, y otro, correspondiente al supuesto de un violento vendaval o fenómeno cualquiera, cuya propia naturaleza excluya la posibilidad de existencia de un público más o menos numeroso, bajo la visera que se estudia, pudiendo generalizarse el caso descrito a los proyectos de los puentes, en donde la acción de un intenso huracán es incompatible con la presencia de seres humanos o de vehículos, sobre el tablero.

Es evidente que, en estas circunstancias, la diversidad de los daños causados en una u otra hipótesis, conduce a diferentes valores del coeficiente de seguridad. Sin embargo, es raro el caso de ser los efectos meteorológicos una sobrecarga tan desfavorable, que aun cuando se proyecte con un valor bajo del coeficiente de seguridad, sean causa predominante en el dimensionado de la estructura que, en general, viene condicionado, primordialmente, por las sobrecargas propias de su utilización, razón por la cual no debe ser frecuente la comprobación de un coeficiente de seguridad propio para los casos de ausencia de personas sobre la estructura.

Conviene hacer la observación de que el valor numérico obtenido como resultado final del método expuesto corresponde, en rigor, al valor del coeficiente de seguridad eficaz. En consecuencia, el dimensionado de los distintos elementos que componen la estructura debe realizarse de tal modo que satisfagan la condición de que el producto del coeficiente de seguridad obtenido por la solicitud a que está sometida la sección considerada sea igual a la solicitud máxima (carga crítica de pandeo o rotura) que puede resistir la pieza en virtud de las características geométricas y mecánicas de la sección y del material empleado; respectivamente.

Este concepto del coeficiente de seguridad es, por otra parte, más moderno y amplio que el anticuado criterio de considerar dicho coeficiente como relación entre las tensiones de rotura y trabajo. Si las tensiones fueran siempre proporcionales a las cargas exteriores, los dos coeficientes serían iguales y los mismos resultados se obtendrían en uno u otro caso; pero esta condición sólo se realiza en el campo teórico de la elasticidad, no extrapolable hasta la rotura.

Por tal motivo, se recomienda dimensionar las distintas secciones por el procedimiento expuesto anteriormente, no sólo por establecer una adecuada concordancia con la tesis desarrollada en el cuerpo teórico de este estudio, sino también por su mayor generalidad; toda vez que el tradicional coeficiente de seguridad elástico no parece poseer una evidente justificación, tanto en los problemas de inestabilidad como en el moderno campo de las estructuras pretensadas.

Por otra parte, no cabe oponer a este método los inconvenientes derivados de una mayor complicación en los cálculos del dimensionamiento de secciones, puesto que, aun en el caso de piezas de hormigón armado, en las cuales se considere el comportamiento

anelástico de dicho material (*), las operaciones a realizar son tan sencillas o más que por los métodos clásicos.

Conclusiones.

Uno de los corolarios que se deducen del presente estudio es la conveniencia de no adoptar un valor único para el coeficiente de seguridad, en toda una misma estructura, sino que, por el contrario, cada pieza o conjunto de piezas, análogas, debe proyectarse con un coeficiente que, por lo general, variará de unos grupos de elementos a otros, de acuerdo con su propio carácter funcional.

El significado físico de esta oscilación de valores obedece a un conjunto de variables. Si en primera aproximación sólo se considera la acción de la sobrecarga accidental, se comprende fácilmente que todos aquellos elementos que primero reciben su acción deben estar dimensionados con un margen de seguridad suficiente para poder hacer frente a una sobrecarga excepcional que, en un instante dado, puede solicitar la estructura. A medida que la pieza en cuestión crece en importancia, tanto su propio peso como la carga permanente transmitida por otros elementos que sobre ella carguen, representan un elevado porcentaje de la solicitud exterior total. La presencia de dicha sobrecarga excepcional sólo supone un débil aumento relativo en el valor de la solicitud total; y el citado margen de seguridad puede reducirse al disminuir el campo de fluctuación de probables valores de las cargas exteriores.

Dejando a un lado las consideraciones de orden teórico, parece oportuno circunscribir el tema a tratar en este lugar a las consecuencias de tipo práctico que se derivan del estudio realizado.

Uno de los primeros problemas que se plantean al comenzar el estudio funcional de una estructura es el de la estimación del grado de precisión con que deben desarrollarse los cálculos, o, dicho de otro modo, el de la conveniencia, bien de aceptar o rechazar determinadas hipótesis simplificativas, o bien la de realizar u omitir ciertas comprobaciones referentes a los esfuerzos secundarios.

Es evidente que el criterio seguido en la resolución de este problema no está presidido por unas determinadas evidencias objetivas, sino que, en general, se basa en una serie de juicios subjetivos, la mayoría de las veces, función del carácter o de la experiencia adquirida.

Por otra parte, es indudable que, tanto las decisiones tomadas respecto a las propias normas en la ejecución del proyecto como las referentes a las tolerancias admitidas en la recepción de los materiales y su puesta en obra, repercuttirán en el margen de

(*) Véase *Sobre el comportamiento anelástico del hormigón armado en piezas prismáticas*, de E. Torroja. Publicación núm. 54 del I. T. C. C.

seguridad que poseerá la estructura; una vez que ésta se haya construido.

Como lógica consecuencia, no tiene nada de extraño el hecho de que, al desarrollar un tema como el presente, en el cual se trata de determinar el valor del coeficiente de seguridad, en evidente dependencia con el grado de precisión con que se realizan los cálculos, surja, como corolario final de este estudio, la condición determinativa de su conveniente aproximación. Si el coste de la obra es función del coeficiente de seguridad, y éste, a su vez, está ligado por una cierta relación al rigor del cálculo desarrollado en el proyecto, la ley de vínculo que enlaza aquél resultado con este último dato, que puede modificarse a voluntad, presupone, en el caso de liberarlo a modo de parámetro variable, la existencia de una función cuyo valor mínimo, representativo de la solución más económica, definiría de un modo preciso el tipo de cálculo con el cual debería estudiarse el mecanismo funcional de la estructura.

Un cálculo riguroso exige más horas de trabajo que un cálculo menos aproximado, puesto que, de no ser así, este último habría sido olvidado y sustituido por el primero, más rápido y exacto. Entre uno y otro existe, evidentemente, una cierta diferencia en número de operaciones, que puede traducirse en horas de técnicos de distintas categorías, y, en definitiva, en una diferencia de honorarios.

A igualdad de las demás circunstancias, un cálculo riguroso presupone una reducción en el coste total de obra asegurada, R . Si se determinan con arreglo al procedimiento expuesto en el apartado anterior, los coeficientes de seguridad C correspondientes a las dos hipótesis planteadas, se obtienen dos costes totales mínimos, uno para cada caso, y, por consiguiente, una diferencia entre ambos presupuestos. Si esta diferencia, evidentemente favorable al cálculo más riguroso, compensa los gastos que por su mayor laboriosidad origina, se deduce que deben realizarse los oportunos cálculos de la Memoria con el mayor rigor, en beneficio de una mayor economía de los materiales. Si, por el contrario, el balance de presupuestos no alcanza a cubrir los gastos adicionales de un meticoloso estudio, se comprende que el caso que se considera no merece un preciso y riguroso cálculo, y que hasta con una comprobación de los distintos elementos, por los procedimientos usuales, para alcanzar la solución óptima.

Cuanto se ha dicho acerca del rigor, con el cual debe desarrollarse el cálculo, es aplicable también al control de la obra. El autor del proyecto, a la vista del plan general según el cual se ha de construir la estructura, se ve precisado a decidir las normas, más o menos tolerantes, que han de regir su ejecución.

Por un lado, cuanto más esmerada sea la construcción, más reducido será el coeficiente de seguridad y, por consiguiente, menor el coste de la obra. Por otro, la ejecución minuciosa exige un mayor control sobre las diversas operaciones a efectuar, y como

obligada consecuencia, impone la ineludible condición de destacar un técnico a pie de obra y tal vez unos equipos o cuadrillas especializados que garanticen la perfección exigida a su trabajo. Tanto una como otra solución, supone una sobretasa que carga el presupuesto en una cierta cantidad.

Siguiendo el método propuesto para calcular el coeficiente de seguridad, se obtiene un conjunto de presupuestos, tanto como grados de control de obra se tanteen, que reflejan, de un modo objetivo, la importancia económica que representa la mayor o menor vigilancia, o esmero, con que se realiza la construcción, o lo que es lo mismo, la reducción en el coste total conseguida por estos conceptos. La indeterminación antes existente sobre el particular, queda ahora eliminada y su discusión se reduce a la simple comparación de unas economías con unas inversiones.

En virtud de estas consideraciones, se comprende que el papel que juega el método expuesto en el anterior apartado es doble, toda vez que no sólo permite calcular el más apropiado valor del coeficiente de seguridad eficaz, sino que también proporciona un criterio objetivo, tanto sobre las condiciones en que debe desarrollarse la ejecución material de la obra como sobre el rigor y precisión con que debe realizarse el cálculo funcional de la estructura.

En general, no pueden fijarse unos porcentajes que reflejen la economía conseguida por uno y otro concepto. La extensa variedad de casos posibles impiden una fuerte fluctuación a estos valores, sin que, por otra parte, puedan resumirse los valores hallados en diversos casos particulares, por razón del gran número de variables que intervienen en el problema que se considera.

Únicamente, y a título más bien de orientación que de referencia, pueden darse los valores medios obtenidos para casos análogos, en los cuales se ha hecho variar una sola condición. Con todas las reservas con que se pueden enunciar unos resultados sujetos a numerosísimas excepciones, puede decirse que, en general, los valores obtenidos son más bajos que los normalmente empleados. La fluctuación de los valores del coeficiente de seguridad, entre una y otra parte de la estructura, alcanza la cifra de 5 décimas, como término medio, siendo frecuente el caso de que el más alto valor se mantenga por debajo de tres.

No parece que sea necesario el desarrollar los cálculos con un rigor mayor que el usual en la generalidad de los casos. Solamente en grandes estructuras, con luces superiores a los 100 m., resulta remunerador un estudio laborioso del régimen funcional. Como término medio puede decirse que la economía que tal cálculo representa es del orden del 1 por 100 del coste de la estructura en cuestión, proyectada con un cálculo normal.

Pero tampoco parece lógico el comprender las estructuras de tipo medio con arreglo a métodos de cálculo aproximados. La economía que un cálculo nor-

mal representa, en relación con un cálculo aproximado, se acerca al 10 por 100, proporción que hace que sólo sea justificable el empleo de los métodos abreviados, cuando su aplicación se refiera a estructuras sumamente económicas, o cuando sus mínimas dimensiones constructivas impliquen ya un coeficiente de seguridad muy elevado y de antieconómica reducción.

Si la economía conseguida por un cálculo muy riguroso sobre un cálculo normal es francamente reducida, en cambio no ocurre lo mismo entre las obras muy vigiladas y las de tipo normal. El paso de un tipo de control a otro supone una reducción del coeficiente de seguridad que, como término medio y con las salvedades ya apuntadas, alcanza a las cinco décimas del valor del coeficiente de seguridad, con unas economías que oscilan alrededor del 15 por 100 del coste de la estructura.

Pero si esta diferencia es verdaderamente notable, más abrumadora es aún la comparación de obras normalmente ejecutadas, y las poco controladas. La deficiente dosificación del agua de amasado, con su campo de amplia fluctuación, impone, como causa predominante, una gran incertidumbre en las características resistentes de los materiales empleados y, como consecuencia, los valores del coeficiente de seguridad se ven incrementados no en décimas sino, a veces, en más de una unidad. El coste de la estructura se ve gravado en unos porcentajes extraordinariamente elevados, del orden del 50 por 100 sobre el presupuesto de ejecución normal, y aun con los altos coeficientes de seguridad resultantes, la probabilidad de hundimiento es todavía superior a la de una obra realizada en condiciones normales.

En un principio, y basándose en algunas orientaciones de eminentes profesores extranjeros, se aleataba la esperanza de encontrar un valor prácticamente constante de la probabilidad de hundimiento, en correspondencia con el coeficiente de seguridad óptimo. Desgraciadamente, ha sido necesario rechazar la hipótesis de una probabilidad tipo, que hubiera simplificado notablemente el proceso operatorio a seguir para la determinación práctica del coeficiente de seguridad. Los valores hallados poseen una amplia dispersión, y mientras que en ciertos casos se reducen a varias millonésimas, en otros superan la milésima, manteniéndose, frecuentemente, alrededor de las 10 a las 600 millonésimas.

La causa predominante de esta fluctuación es la relación de daños causados a costes de primer establecimiento. Cuanto mayor es esta relación, menor suele ser la probabilidad resultante, sin que, como a primera vista pudiera parecer, sea posible establecerlo de un modo categórico, a causa de la influencia perturbadora de la ley de variación del propio coste de primer establecimiento.

Puesto que esta relación puede alcanzar una gama de valores extraordinariamente extensa, se concibe

que el campo de fluctuación de dicha probabilidad sea, del mismo modo, tan sumamente amplia, que apenas puede señalarse una zona de más probable aparición.

Una variación en la estimación de los daños suele arrojar pequeñas diferencias en el coeficiente de seguridad. Únicamente cuando las diferencias son grandes se acusan, como es natural, en los resultados finales.

Tampoco pueden darse unas normas concretas acerca de la economía de presupuestos que este método representa sobre los valores tradicionalmente admitidos para el coeficiente de seguridad. El solo repaso de las cifras hasta aquí facilitadas da idea de la multitud de campos de fluctuación en que cada variable se mueve. En unos casos, la economía obtenida es evidente. En otros, la solución resultante aconseja reforzar los elementos con coeficientes superiores a los normalmente empleados, especialmente cuando se trata de obras poco controladas.

En líneas generales, cabe repetir aquí las conclusiones establecidas en páginas anteriores, en el sentido de que los coeficientes obtenidos son bastante más bajos, como término medio, del valor tres. En consecuencia, y tomando como caso más frecuente la hipótesis de cálculo normal y obra de ejecución también normal, puede decirse que la economía que representa la adopción de los coeficientes de seguridad hallados por el método propuesto, frente a la de un dimensionado con un coeficiente de seguridad tres, suele fluctuar alrededor del 10 al 20 por 100 del coste de la estructura en estudio.

Puesto que se da la afortunada condición de que, cuanto más importantes son los elementos mayor es la economía relativa, se deduce que el valor absoluto de la reducción del presupuesto suele superar el valor medio de los porcentajes arriba citados.

Finalmente, conviene advertir que, evidentemente, este método es susceptible de sufrir posteriores ampliaciones y reformas, especialmente en lo que a datos estadísticos se refiere. El procedimiento gráfico utilizado para calcular las leyes de distribución de los sucesivos productos de variables estocásticas como exponente del modo más general de operar con estos tipos de funciones, es susceptible de ser aplicado a funciones experimentales cualesquiera, sean o no distribuciones de Gauss.

De hecho se ha realizado así, toda vez que no ha sido necesario admitir la hipótesis de que la distribución del producto de dos variables estocásticas de Gauss sea también una función del mismo género. Solamente en algunos casos especiales, en los cuales se ha comprobado después la pequeñez del error cometido, se ha admitido tal hipótesis simplificativa, por comodidad y rapidez.

Desde un punto de vista teórico, queda así resuelto el problema, con toda la generalidad posible, para dejar el campo abierto a cualquier posible ampliación

con leyes estadísticas que, como en el caso de las distribuciones de los defectos de ejecución, presenten una acusada asimetría o una fuerte distorsión en su trazado.

Valores aproximados para casos corrientes.

Los valores medios que resultan en estructuras de hormigón armado corrientes, son los siguientes:

	EDIFICIOS			PUENTES				
	Forjados	Vigas	Soportes	Tablero	Tímpanos y largueros	Arcos		
Obras normalmente vigiladas	Daños importantes	Para sobrecarga	3,1	3,4	3,9	3,1	2,8	2,6
		Para peso propio	2,9	3,1	3,4	2,9	2,6	2,5
Cálculos correctos. Daños pequeños		Para sobrecarga	2,6	2,8	3,2	2,6	2,4	2,1
		Para peso propio	2,4	2,6	2,8	2,4	2,3	2,0
COEFICIENTES DE CORRECCIÓN								
Obras muy vigiladas			0,70 a 0,80			0,77 a 0,84		
Obras poco vigiladas			1,00 a 1,90			1,60 a 1,80		

Estos coeficientes corresponden a una carga de rotura definida por la condición de que, en un grupo de seis probetas ensayadas, solamente una queda por bajo de aquélla.

El hecho de que no se establezca ninguna distinción entre soportes de plantas superiores o inferiores,

obedece a la circunstancia de que, al compensarse la menor variabilidad de las sobrecargas con la mayor importancia de los daños causados por el posible hundimiento, los coeficientes obtenidos presentan débiles diferencias, tendiendo más bien a disminuir a medida que se asciende.