

mecanismos de redistribución en estructuras de hormigón armado cargadas hasta rotura

JAVIER MANTEROLA, ingeniero de caminos

837 - 10

sinopsis

La razón de ser del estudio de los mecanismos de redistribución hay que buscarla en la necesidad de precisar la carga de agotamiento de las estructuras y así poder definir con exactitud el coeficiente de seguridad o relación entre carga de agotamiento y carga de servicio.

Esta ha sido la causa de que el método clásico, tan fecundo durante muchos años, haya sido modernamente puesto en revisión, ya que no nos ofrece información alguna de la distancia a la rotura en que se encuentra la estructura cuando está en servicio.

Este artículo no es más que una breve introducción al problema de las redistribuciones que sufren los esfuerzos que solicitan a las estructuras cuando su proceso de carga se lleva hasta la rotura.

Toda estructura cargada, para resistir, desarrolla unos mecanismos internos que al deformarse producen la energía necesaria para transmitir la carga a los apoyos. Las deformaciones de la estructura, producidas por los esfuerzos, deben cumplir tanto las condiciones de compatibilidad que le imponen las coacciones exteriores, como las interiores propias de las características del material. El principio del trabajo mínimo, junto con estas condiciones de compatibilidad, ordenan la manera de resistir de la estructura o, lo que es lo mismo, configura los mecanismos de distribución de esfuerzos.

El cálculo clásico de las estructuras cumple perfectamente las condiciones de compatibilidad externa de deformaciones después de homogeneizar el comportamiento del material, cualquiera que sea su sollicitación.

Ahora bien, el hormigón, por sus características propias se deforma de modo diverso según la cuantía y la clase de sollicitación. Se fisura rápidamente con la tracción y la compresión elevada lo plastifica.

Estas propiedades del hormigón hacen que las condiciones de compatibilidad de deformaciones internas cambien a lo largo del proceso de carga, separándonos, por tanto, de las hipótesis de la teoría clásica. Los esfuerzos se ordenan de formas diferentes dando lugar a unas distribuciones más adecuadas a las condiciones de resistencia de un material fisurado o plastificado.

La obtención de los mecanismos de redistribución de esfuerzos es muchas veces complicada y se ha soslayado con fórmulas empíricas deducidas de ensayos hasta rotura. No obstante, creemos que es muy importante llegar a conocerlos, pues es el método en que la intuición del fenómeno físico puede prolongarse hasta la rotura.

Para alcanzar el agotamiento, las estructuras de hormigón armado pasan de un período casi completamente elástico a los períodos de fisuración y plastificación parciales que pueden producir redistribución de los esfuerzos que la solicitan. Esta se producirá por de pronto en las estructuras externamente hiperestáticas (losas, vigas continuas, etc.), en las cuales las condiciones de compatibilidad puedan cambiar por plastificación de determinadas zonas y en las estructuras externamente isostáticas en las que las condiciones de compatibilidad interna de deformaciones varían con el tipo de sollicitación del material.

A continuación vamos a exponer dos ejemplos, uno con estructura externamente hiperestática y otra externamente isostática, en los que podrá verse con más claridad los conceptos hasta aquí expresados.

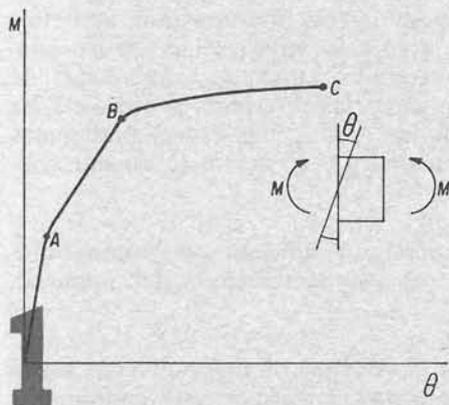
vigas continuas

La sollicitación típica de una viga es la flexión.

La ley de momentos rotaciones de una sección que se lleva hasta la rotura ofrece el aspecto de la figura 1.

Empieza con un período aproximadamente elástico —*OA*— que corresponde a la fase en que el hormigón no está fisurado.

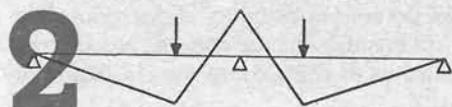
Sigue con una fase —*AB*— correspondiente al desarrollo de la fisuración y en el que el acero se mantiene dentro de las tensiones admisibles. El punto *B* corresponde al comienzo de las deformaciones plásticas del acero.



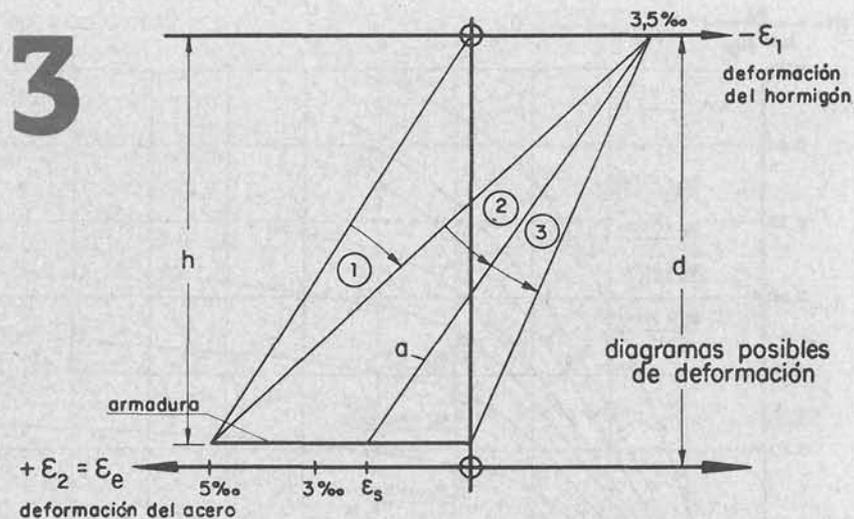
La fase *BC* representa el aumento de momento debido al incremento del brazo mecánico, que es el único recurso, junto con los pequeños incrementos de carga de la armadura, que le queda a la sección para resistir.

Esta ley varía en la forma y amplitud de sus fases, con las características y cuantía de los materiales que la forman, y cada una de ellas se caracteriza por tener distintos coeficientes de proporcionalidad entre el momento y la rotación. Esta es una de las principales causas de la redistribución de esfuerzos que se originan en las vigas continuas.

La figura 2 representa la distribución de momentos flectores de una viga calculada según la teoría elástica.



Para una carga determinada habrá puntos de esta ley de momentos flectores cuya situación en la ley de momentos-rotaciones corresponda al tramo *OA*, otros al *AB*. Al ser distintos en estos puntos los coeficientes de proporcionalidad entre mo-



mentos y rotaciones, las hipótesis de momento de inercia constante a lo largo del proceso de carga supuesta en la teoría clásica deja de ser válida. Esto da lugar a un pequeño cambio de la distribución de momentos flectores, o lo que es lo mismo, se produce una redistribución de esfuerzos. Generalmente, el efecto de esta redistribución es muy poco importante.

Ahora bien, cuando alguna de las secciones, al crecer la carga alcanza el punto *B* de la curva de momentos-rotaciones, los giros que en ella se producen son tan grandes que la distribución de esfuerzos para las cargas siguientes difiere radicalmente de la teoría clásica.

El mecanismo de redistribución sería, en este caso, la rótula que se forma en el primer punto donde la ley de momento-flectores alcanza el punto *B* de la ley de momentos-rotaciones.

A partir de este momento el cálculo para las cargas siguientes sería el de dos vigas apoyadas, si hemos supuesto que el primer punto donde la viga alcanza la plastificación es el punto sobre el apoyo central. La rotura se produciría con la aparición de una segunda rótula en alguna de las vigas.

Ahora bien, este cálculo como vigas apoyadas entraña en sí una capacidad de giro en la sección sobre apoyo suficiente para que las vigas funcionen como apoyadas. Si éste no se produce, la viga se romperá sobre el apoyo antes de la aparición de la segunda rótula.

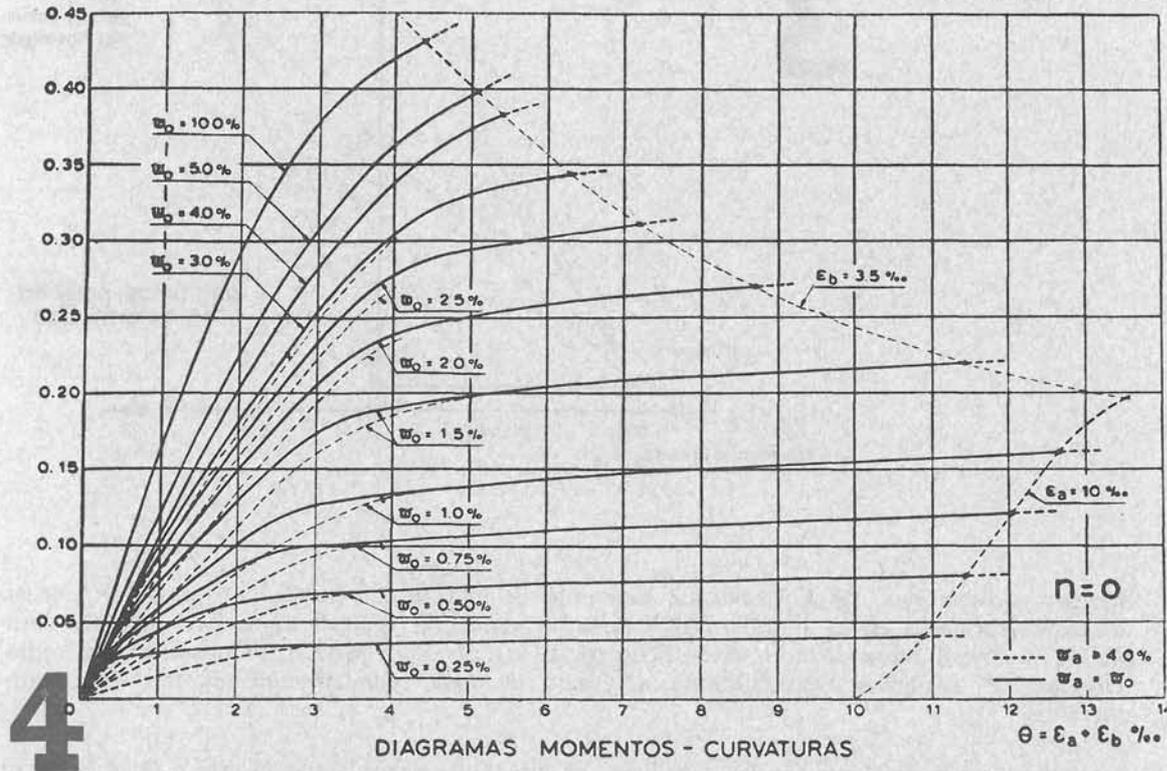
Para una misma sección, la capacidad de giro depende de la cuantía de armadura de tracción. H. Rüschi presentó una propuesta sobre este tema al Comité Europeo del Hormigón que se representa en la figura 3. Los dominios indicados con números sobre la figura, tienen la siguiente significación:

DOMINIO 1

Dominio de las vigas poco armadas, para las cuales la resistencia de la zona comprimida del hormigón no está aprovechada al máximo en el estado de rotura, ya que la deformación del hormigón no llega al límite del 3,5 por 1000.

$$m = \frac{M}{b h^2 \sigma_{br}}$$

Acero 40



Rüsch en este dominio limita las deformaciones del acero al 5 por 1.000 por condiciones de fisuración y deformación, pero en la realidad pueden llegar a la de rotura del acero con giros de la sección muy superiores a los obtenidos con el 5 por 1.000. La rotura de la sección se produce después de una gran fisuración.

DOMINIO 2

Dominio de las vigas normalmente armadas, para las cuales la resistencia del hormigón y del acero están plenamente aprovechadas. Este dominio está limitado por el «porcentaje crítico de armadura» a , representado por la recta que une la deformación máxima de compresión del hormigón y el alargamiento correspondiente al límite de elasticidad de la armadura. La fisuración y deformación en la rotura son grandes.

DOMINIO 3

Dominio de las vigas fuertemente armadas, para las cuales la deformación de la armadura principal de tracción es inferior al límite elástico, incluso en el estado de rotura. Los giros en este dominio son pequeños.

La figura 4, debida a Ferry Borges, representa una serie de leyes de momentos-curvaturas para vigas con diferentes cuantías de armaduras.

influencia del esfuerzo cortante

La capacidad de giro de la rótula sobre apoyo se complica más si tenemos en cuenta la influencia del esfuerzo cortante que en la sección sobre apoyos es importante. La fisuración se produce en el hormigón a consecuencia de las tensiones principales de tracción que le solicitan. El esfuerzo cortante, cuando su relación al momento es grande, produce una gran incurvación en la dirección de las isostáticas de la flexión y la fisuración cambia de dirección.

Toda fisura supone una interrupción brusca en el camino de las isostáticas, lo que ocasiona una redistribución de éstas y su evolución, con el desarrollo de la fisuración, llega a ser complicadísima. La fisuración reestructura el mecanismo de trabajo interno con la formación de una serie de bielas de hormigón, las cuales están cosidas con la armadura transversal y la longitudinal y empotradas en la parte de hormigón no fisurado. Esta estructura interna que se forma es hiperestática y es la que al deformarse desarrollará la energía suficiente para resistir. La viga se convierte en mecanismo.

Las figuras 5a y 5b representan la fisuración de una viga a flexión pura y a flexión y esfuerzo cortante combinados.

La hipótesis de deformación plana de la sección transversal es admisible en el caso de la figura 5a.

Pero en la 5b es inadmisibles e incluso un estudio por secciones pierde aquí su sentido.

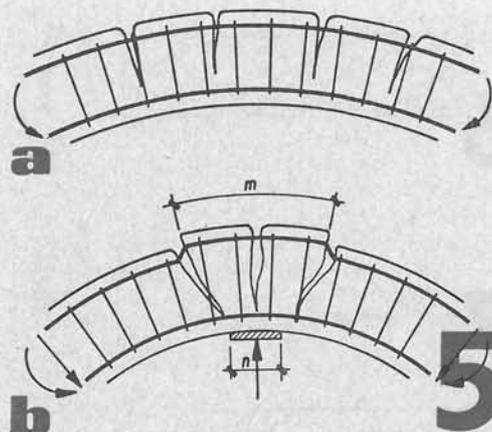
Las magnitudes m y n determinan una rótula cuyos puntos de giro pueden situarse en el extremo de las fisuras inclinadas.

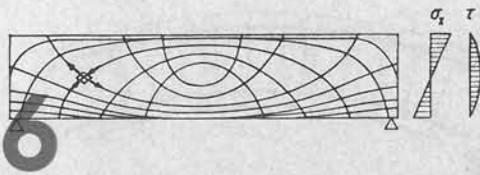
El haber tenido en cuenta el efecto del esfuerzo cortante nos ha llevado a que si bien el mecanismo de redistribución sigue siendo una rótula, sobre la capacidad de giro de ésta influye, además de la cuantía de armadura longitudinal, el esfuerzo cortante y la cuantía de armadura transversal, que es la que controla la amplitud de la abertura de la fisura inclinada de esfuerzo cortante.

Resumiendo, podemos decir que sobre la distribución de momentos flectores obtenida por la teoría elástica inciden las siguientes redistribuciones.

1. Una pequeña redistribución de esfuerzo debido al cambio de rigideces de las secciones de la pieza cuando aparece y se desarrolla la fisuración.
2. Una segunda y gran redistribución de esfuerzos cuando sobre alguna de las secciones se alcanza la plasticidad de la armadura.

La capacidad de giro de esta sección depende, además de su ley de momentos rotaciones, del esfuerzo cortante y de la cantidad de armadura transversal que controla la abertura de las fisuras inclinadas.

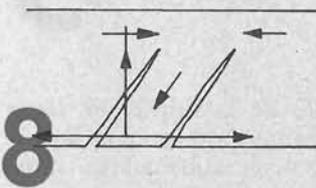
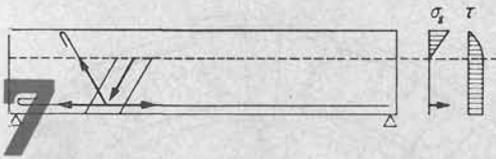




esfuerzo cortante en vigas isostáticas

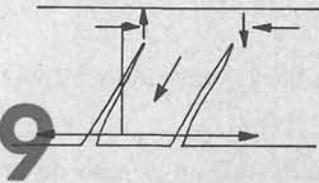
La teoría clásica de armado a esfuerzo cortante, siguiendo a Mörsch, admite las siguientes hipótesis:

1. El esfuerzo cortante produce una distribución de isostáticas cuyas tracciones principales las absorbe el hormigón sin fisurar (fig. 6).
2. Cuando estas tracciones sobrepasan la resistencia del hormigón a tracción, éste se fisura, formando grietas a 45° que configuran una celosía isostática formada por la armadura y por las bielas de compresión (fig. 7).



El hormigón por sí solo no absorbe ninguna parte del esfuerzo cortante y todo debe ser absorbido por la armadura de esta celosía.

Vemos, pues, cómo ya para resolver el problema del esfuerzo cortante, la teoría clásica establece un mecanismo de redistribución de tensiones.



La experimentación ha demostrado que, ciertamente, mientras no existen fisuras incli-

nadas la deformación transversal de la pieza es casi nula y, por tanto, la tensión de los cercos verticales despreciable.

Ahora bien, cuando aparece la fisuración inclinada la apreciación de la teoría clásica de la formación de una celosía isostática es inexacta (fig. 8).

Un mecanismo más exacto sería el siguiente:

La componente vertical de la deformación de la biela es la que pone en carga al cerco, como ocurre en la teoría clásica, pero la biela forma parte de un mecanismo que lo constituyen el hormigón no fisurado y las armaduras longitudinal y transversal. Se encuentra empotrada en la cabeza de compresión y atada por las armaduras. Cada uno de los componentes de este mecanismo tiene distinta rigidez, y forma entre sí un mecanismo hiperestático. La diferencia de rigideces entre las partes que lo constituyen determina la intensidad de deformación que corresponde a cada uno y, por tanto, su contribución a la absorción del esfuerzo cortante (fig. 9).

Dos cosas quedan claras de lo dicho, la primera es que la carga que absorbe el cerco depende de la deformación vertical de la biela comprimida y, segundo, que esta deformación depende de la relación de rigideces de los elementos que constituyen el mecanismo.

La diferencia de rigideces es un factor decisivo de la tensión del cerco. La experimentación ha demostrado que en vigas de sección rectangular, en que la relación de rigidez de la biela a rigidez del cerco es muy grande, los estribos no llegan a alcanzar deformaciones de fluencia en vigas que rompieron por esfuerzo cortante.

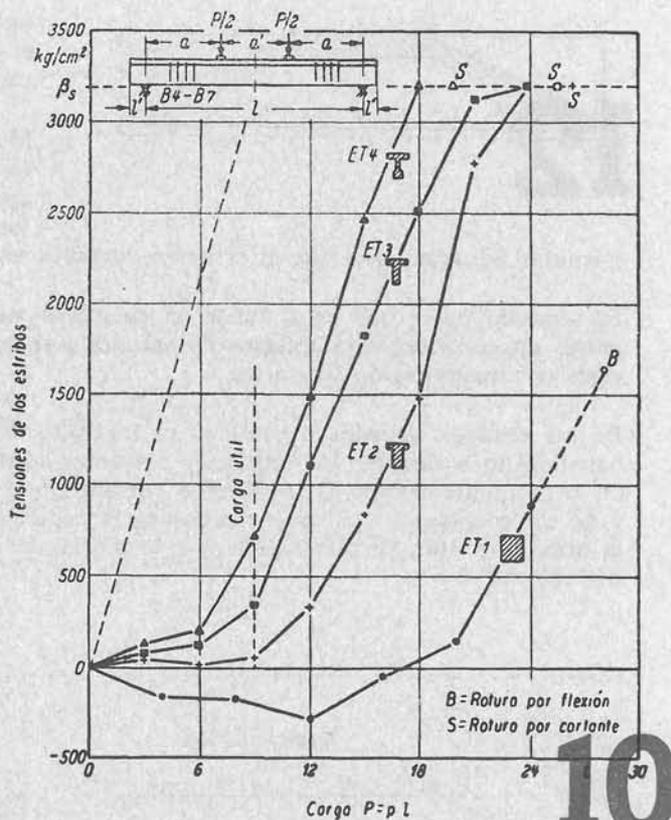
La figura 10 representa las leyes de carga aplicada-tensión en los cercos, en cuatro vigas con idéntica cabeza de compresión e idéntica cantidad de armadura, en los que únicamente varía el espesor del alma (Leonhardt-Walter).

Estos mismos autores han deducido también de sus ensayos de Stuttgart, que dado que el mecanismo de resistencia a esfuerzo cortante se concreta en unas bielas que tienden a empujar a sus estribos, la eficacia de éstos será tanto mayor cuanto mejor absorban dichos empujes, deduciendo que las mejores lo constituyen los estribos inclinados a 45° y muy próximos entre sí, seguido por los estribos verticales y finalmente por las barras levantadas.

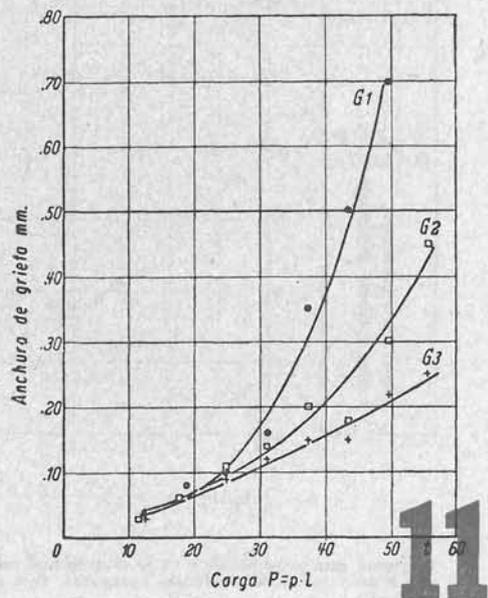
La figura 11 representa la anchura de fisuras de esfuerzo cortante en función de la carga, en tres vigas, con iguales características y cuantías de armadura, salvo que en la primera la armadura transversal la constituyen barras levantadas a 45°, la segunda por cercos verticales y la tercera por cercos a 45°.

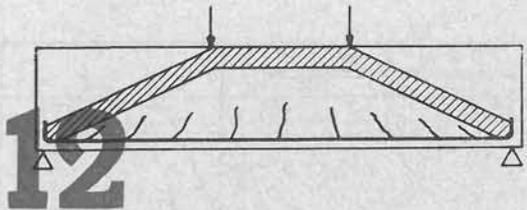
A la celosía hiperestática descrita, se le superpone otro mecanismo formado por un arco atirantado (fig. 12). Este mecanismo pone en juego las tensiones de la armadura longitudinal desde sus mismos anclajes, de ahí la importancia que tienen éstos en la resistencia al esfuerzo cortante. La relación entre la contribución de ambos mecanismos, celosía hiperestática y arco atirantado, a la resistencia al esfuerzo cortante depende principalmente de la esbeltez de las vigas. Para zapatas de cimentación, ménsulas cortas, vigas-pared, etcétera, el efecto arco-tirante es mucho mayor que el de celosía. Podría decirse que la celosía degenera en arco cuando las esbelteces son muy pequeñas.

La situación de rotura de estos mecanismos depende del estado tensio-



Tensiones medias de estribos en función de la carga para vigas con cargas puntuales y distintas anchuras de alma.





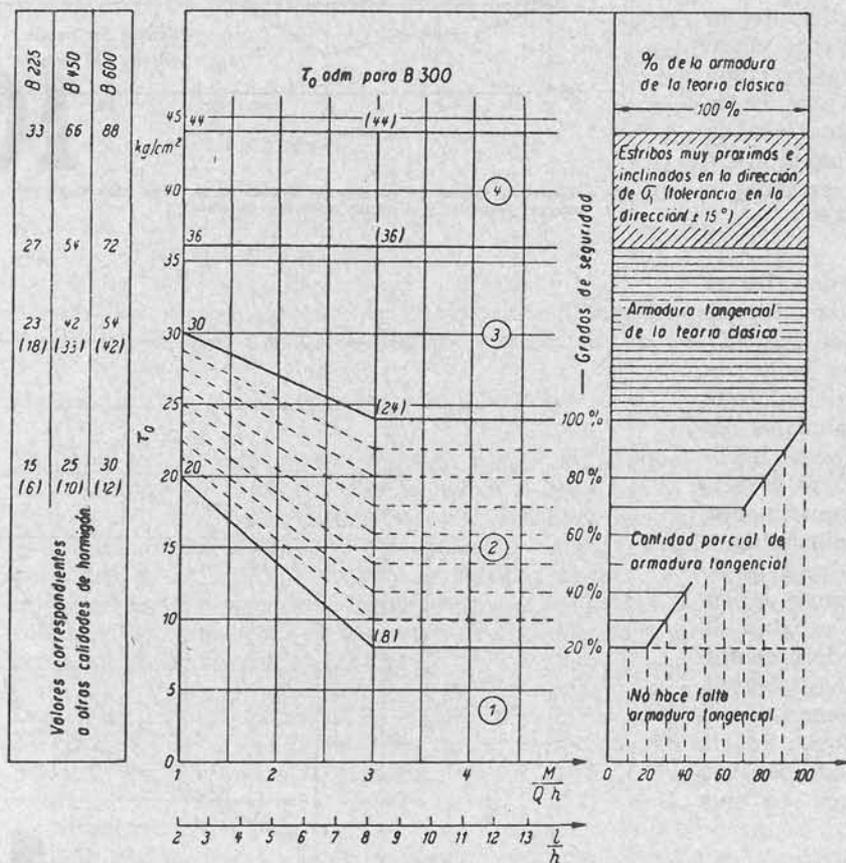
nal de cada uno de sus componentes y sobre el estado tensional, la flexión contribuye de una manera muy eficaz.

Muchas de las normas de hormigón armado existentes en el mundo recogen en primera aproximación, el funcionamiento de esta celosía hiperestática por el establecimiento de

fórmulas aditivas en el que el esfuerzo cortante se reparte entre el hormigón y la armadura.

El segundo paso, que es el tener en cuenta el valor que el momento flector toma en el punto en cuestión, está todavía en estudio y se ha llegado ya a conclusiones parciales para vigas con sustentación isostática.

De los ensayos llevados a cabo en el Instituto Otto Graf, de Stuttgart, Leonhardt y Walter han llegado a deducir las tensiones cortantes admisibles en función de la relación $M/Q \cdot h$ (M = momento flector, Q = esfuerzo cortante, h = canto útil); la resistencia del hormigón y de un coeficiente (%) que representa el cociente entre la armadura transversal eficaz y la armadura transversal exigida por la teoría clásica de Morsch. La figura 13 representa estos valores.



13

Propuesta para τ_0 admisible y % de la armadura calculada por el método clásico para hormigón B 300 y barras longitudinales corrugadas. Para otras calidades de hormigón vale la escala izquierda.

Mécanismes de redistribution dans les structures en béton armé chargées jusqu'à rupture

Javier Manterola, ingénieur des Ponts et Chaussées

La raison d'être de l'étude des mécanismes de redistribution doit être cherchée dans la nécessité de préciser la charge d'épuisement des structures et de pouvoir ainsi définir avec exactitude le coefficient de sécurité ou le rapport existant entre la charge d'épuisement et la charge de service.

C'est là la cause pour laquelle la méthode classique, si utile pendant bien des années, a été soumise à révision, car elle ne donne aucune information sur la distance à la rupture où se trouve la structure en service.

Cet article n'est qu'une brève introduction au problème des redistributions subies par les efforts qui sollicitent les structures lorsque leur processus de charge est amené jusqu'à rupture.

Redistribution mechanisms in reinforced concrete structures loaded to the point of rupture

Javier Manterola, civil engineer

The investigation of the redistribution mechanisms in structures is motivated by the need to find out the ultimate load capacity of these structures, and thus establish accurately the factor of safety, i.e., the ratio between the ultimate and the working load.

That is why the classical method of analysis, which has been so useful during many years, has been recently revised, since it does not give any information on the margin between the state of rupture and the normal functional situation.

This article is simply a brief introduction to the problem of the redistributions of the forces acting on the structures, when the loading approaches the ultimate strength.

Verteilungsmechanismus in belasteten Stahlbetontragwerken bis zu dem Bruch

Javier Manterola, Bauingenieur

Die Verteilungsmechanismusuntersuchung gründet sich auf der Notwendigkeit die Ermüdungslast der Tragwerke zu bestimmen und so der Sicherheitsbeiwert oder Verhältnis zwischen Ermüdungslast und Gebrauchslast mit Genauigkeit zu bestimmen.

Das war den Grund warum die klassische Methode, so gut während vieler Jahre, heute nachgesehen wird, da sie uns keine Auskunft der Entfernung zu dem Bruch anbietet, in dem sich das Tragwerk befindet, wenn es in Betrieb ist.

Dieser Artikel ist nur eine kurze Einführung zu dem Verteilungsprobleme, das die Kräfte erleiden, die den Tragwerken beanspruchen, wenn ihre Lastprozess bis zu dem Bruch geht.