

NUEVO METODO PARA EL CALCULO DE PRESAS-BOVEDAS

Por JOSÉ LUIS FERNANDEZ CASADO,

Ingeniero de Caminos e Ingeniero Aeronáutico.

Explica sucintamente el autor el método que propone para el cálculo de presas-bóvedas, sobre cuyo fundamento se refiere a la 5.ª edición del libro de Fernández Casado "Cálculo de estructuras reticulares".

El Ingeniero civil que proyecta grandes estructuras ha tenido siempre en el cálculo una de sus mayores servidumbres.

El cálculo llega a tiranizar de tal manera la concepción de una estructura, que si no se dispone de un tiempo ilimitado — circunstancia difícil en la época actual —, se llega a veces a la paradoja de que es el método de cálculo el que impone la estructura.

En el fondo, este proceso es lógico. No por falta de capacidad en la comprensión del mecanismo de un método de cálculo, sino por falta de tiempo y en especial porque exija casi un completo personal desarrollo del mismo, no estamos en condiciones de sacrificar centenares de horas en un proceso que, en esencia, es completamente mecánico.

Si bien en muchos tipos de estructuras los métodos de cálculo se han sistematizado hasta el punto de poder ser desarrollados sin dificultad alguna por auxiliares, con solamente una vigilancia del Ingeniero en los diversos resultados parciales, no sucede así en otros muchos casos, lo cual obliga al que proyecta a sumergirse en una larga y penosa etapa de ejercicios matemáticos que, como no responden a un proceso de creación sino de medida, levantan en lo más íntimo nuestras rebeldías al sentirnos encadenados al desarrollo de unas complicadas fórmulas matemáticas con alcance absolutamente limitado. Dolor que a veces se paga (la mayoría de las veces muy mal) equiparando la bondad de una solución con la cantidad y complejidad de los cálculos que nos han conducido a ella, desviando la esencia de las cosas, que es independiente del dolor, y convirtiendo al Ingeniero en un ser polarizado, con el peligro de su deshumanización con respecto a la obra.

Un caso típico de esta clase de estructuras son las presas-bóvedas. Los americanos han llegado a un completo desarrollo de su cálculo mediante el procedimiento de *tried load*, pero éste exige en su desarrollo (si no se cuenta con equipos muy especiali-

zados) una atención tan profunda y prolongada para el que proyecta, que es, a nuestro parecer, una de las principales causas de que no se construyan muchas presas-bóvedas.

No pretendemos decir que el método propuesto sea breve, pero sí que su mecanismo es sencillo y que, en cualquier momento de su desarrollo, puede comprobarse la exactitud de los resultados parciales. En esencia, su dificultad estriba en tener preparadas unas hojas encasilladas, en las que su relleno se hace automáticamente, por simples operaciones de sumas y multiplicaciones.

El fundamento del método está expuesto en la 5.ª edición del libro de C. Fernández Casado, *Cálculo de estructuras reticulares*, en el cual se introduce el concepto de sistema característico de un nudo espacial, tanto para la distribución de un momento o de una fuerza aplicados en su vértice, pero es necesario utilizar estos conceptos con ligeras variaciones en su mecanismo de aplicación, convenientes al caso tan concreto de la estructura que nos ocupa:

a) Los sistemas característicos del nudo: deformaciones en función de esfuerzos, deben calcularse en conjunto, convirtiéndose, por tanto, en uno sólo de seis ecuaciones en lugar de dos a tres ecuaciones.

En el cálculo de este sistema deben tenerse presentes las modificaciones de la rigidez y factor de transmisión debidas al esfuerzo cortante (modificaciones que se exponen en el citado libro).

b) Debe introducirse por cada barra un nudo auxiliar, situado en el punto medio de cada una de aquéllas.

El primero de estos apartados tiene por objeto introducir en las transmisiones las deformaciones angulares y lineales a la vez. Con el segundo, conseguimos que en los nudos auxiliares se compensen relativamente los esfuerzos transmitidos.

c) Exceptuando la primera distribución, en la que las fuerzas están aplicadas directamente sobre los

nudos de la retícula, en las restantes puede prescindirse de transmitir a éstos y hacerlo directamente entre los nudos auxiliares.

En resumen, esto conduce a calcular en cada uno de los nudos auxiliares las rigideces (esfuerzos que aparecen en el nudo en función de una deformación unitaria del mismo, cuando los otros tres nudos auxiliares permanecen fijos y se considera aislado el nudo espacial determinado) y los correspondientes factores de transmisión de esfuerzos. Estos coeficientes se calculan con facilidad, teniendo resuelto el sistema característico del nudo espacial correspondiente, conforme se ha indicado en el apartado a).

d) Por último, hay que determinar los sistemas característicos de los nudos espaciales determinados por los nudos auxiliares. El cálculo de los coeficientes de estos sistemas no ofrece dificultad alguna, puesto que se trata de determinar las deformaciones en una sección de una simple barra empotrada en sus extremos (dos nudos reales contiguos) en función de esfuerzos aplicados en dicho lugar.

Este mecanismo de operar tiene aplicación a muchos tipos de estructuras, arcos, arcos oblicuos, bóvedas, membranas, etc., pero en particular resulta apropiado para las presas-bóvedas, y en general, para las estructuras en las que en los nudos auxiliares tiendan a equilibrarse los esfuerzos transmitidos.

En el cálculo de una presa-bóveda empezaremos por:

1.º Establecer una retícula de arcos y ménsulas en las que consideramos concentrado todo el material de la presa.

2.º Sustituir los arcos por arcos poligonales, con vértices en las intersecciones con las ménsulas.

3.º Introducir un nudo auxiliar en el centro de cada barra de la retícula (en las de contorno puede prescindirse o situarlo en lugar que armonice con simetrías locales).

4.º Calcular las rigideces de flexión (debe tenerse en cuenta la resistencia al esfuerzo cortante), torsión y compresión y los respectivos factores de transmisión para las barras que componen cada nudo espacial limitado por cuatro nudos auxiliares.

5.º Resolver el sistema característico — deformaciones en función de esfuerzos — de los nudos espaciales del apartado anterior.

6.º Determinar las rigideces y los factores de transmisión entre nudos auxiliares contiguos; es decir, los esfuerzos que aparecen en los cuatro nudos auxiliares de cada uno de los espaciales considerados para una deformación unitaria (tres angulares y tres lineales) en uno de las de aquéllos.

7.º Deformaciones producidas por los esfuerzos

unitarios (tres momentos y tres fuerzas) aplicados en los nudos auxiliares, considerando los nudos de la retícula fijos, es decir, los sistemas característicos de los nudos espaciales con vértices en los nudos auxiliares y limitados por dos nudos de retícula contiguos.

8.º Las fuerzas exteriores se consideran aplicadas en los vértices de la retícula y se calculan los esfuerzos que aparecen en los nudos auxiliares.

9.º Se calculan, en cada uno de los nudos auxiliares, las deformaciones (tres giros y tres desplazamientos) por efecto del esfuerzo que compensa el resultado de los transmitidos, según 8.º.

10. Se determinan los esfuerzos que aparecen en cada nudo auxiliar a consecuencia de estas deformaciones, con lo cual volvemos a estar en las condiciones del apartado 9.º, y debemos repetir el proceso hasta alcanzar la exactitud deseada.

11. Conocidas las deformaciones en los nudos

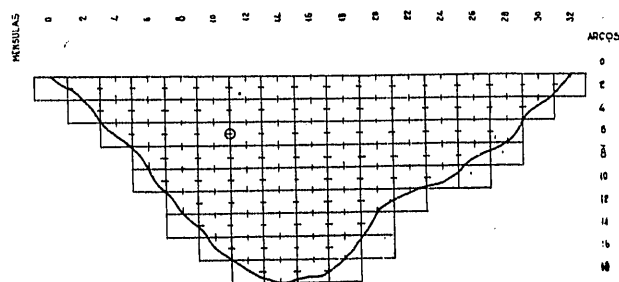


Figura 1.ª

auxiliares (tres giros y tres desplazamientos) mediante los sistemas característicos de los nudos espaciales (apartado 5.º), se calculan las deformaciones en los nudos en la retícula, e inmediatamente los esfuerzos en todas las barras, que quedan determinadas entre un nudo de éstos y otro auxiliar.

A continuación aclararemos brevemente la manera de operar en cada uno de estos apartados.

Respecto al apartado 1.º, el modo de establecer la retícula puede hacerse de diversas formas, que dependerá de la exactitud deseada y de las dimensiones de la presa.

Se puede ensayar dividiendo el arco superior entre 8 a 12 partes iguales y estableciendo una distancia entre arcos del orden de estas divisiones.

En la zona central de la presa, los nudos espaciales quedan perfectamente determinados. En las márgenes pueden resultar nudos espaciales con barras algo desiguales, lo que obligaría a calcular los sistemas característicos de éstos nudos marginales,

CUADRO NÚM. I

Esfuerzos transmitidos por la deformación en el nudo		Deformaciones	f_x	f_y	f_z	m_x	m_y	m_z
A-6-M-11		$(\delta_x =)$ X	$m =$	$m =$	$m =$	$m =$	$m =$	$m =$
		$(\delta_y =)$ X	$m =$	$m =$	$m =$	$m =$	$m =$	$m =$
		$(\delta_z =)$ X	$m =$	$m =$	$m =$	$m =$	$m =$	$m =$
		$(\theta_x =)$ X	$m =$	$m =$	$m =$	$m =$	$m =$	$m =$
		$(\theta_y =)$ X	$m =$	$m =$	$m =$	$m =$	$m =$	$m =$
		$(\theta_z =)$ X	$m =$	$m =$	$m =$	$m =$	$m =$	$m =$
N		Σ						
4-11								
5-12								
7-12								
8-11								
7-10								
5-10								
Totales								

Transmisión de esfuerzos.

Nudo (auxiliar) { Arco, 6.
Ménsula, 11.

Al introducir los nudos auxiliares, conforme al apartado 3.º, no hay inconveniente que las barras marginales tengan dimensiones inferiores, y para evitar el inconveniente apuntado en el párrafo ante-

DEFORMACIONES						
Esfuerzo	δx	δy	δz	θx	θy	θz
$(f_x =)$ x	uno	uno	uno	uno	uno	uno
$(f_y =)$ x	uno	uno	uno	uno	uno	uno
$(f_z =)$ x	uno	uno	uno	uno	uno	uno
$(m_x =)$ x	uno	uno	uno	uno	uno	uno
$(m_y =)$ x	uno	uno	uno	uno	uno	uno
$(m_z =)$ x	uno	uno	uno	uno	uno	uno
Totales						

rior, debe procurarse que no resulten afectadas las longitudes de las barras de los nudos espaciales de retícula próximos.

Por cada nudo espacial, tanto con vértice en uno de la retícula o auxiliar, correspondiente a los apartados 4.º y 5.º, debe establecerse un cuadro ordenado para poder calcular los sistemas característicos de los

Las fuerzas exteriores, al considerarlas aplicadas en los nudos de la retícula, conforme se indica en el apartado 8.º, se compondrán de una fuerza y un momento, iguales, respectivamente, para todos los nudos de un mismo arco.

La transmisión de esfuerzos (momentos y fuerzas) se hace automáticamente rellenando los cuadros adjuntos.

El cálculo de los esfuerzos en las barras, según el apartado II, no ofrece dificultad alguna.

Consideraciones acerca del método propuesto.

El método expuesto tiene una gran universalidad; en esencia, resuelve las ecuaciones de la elasticidad en una estructura por diferencias finitas, sustituyendo el elemento infinitamente pequeño por un nudo espacial y estableciendo las ecuaciones diferenciales por las relaciones existentes entre nudos.

En general, la geometría de la estructura permite agrupar los nudos espaciales en pocos tipos diferentes, por lo que el cálculo de los sistemas característicos y demás características no resulte complicado. Las discontinuidades en la estructura y los bordes, a lo más que pueden conducir es al cálculo de las características de nudos diferentes.

[illegible]

Resultados parciales y totales.

Nudo (auxiliar) { Arco, 6.
Ménsula, II.

Existe libertad en la forma de efectuar las distribuciones de los esfuerzos que, interpretando la estructura, puede llegarse a simplificaciones importantes. Así, en las presas-bóvedas, si se prescinde momentáneamente de los bordes, las distribuciones quedan limitadas a lo largo de una ménsula, con desaparición de los esfuerzos en algunos de los sentidos. Más tarde, calculadas las deformaciones deben introducirse en los bordes y distribuir los nuevos esfuerzos; pero esto puede hacerse fácilmente a lo largo de los arcos. Equivale este procedimiento a considerar en primer lugar la superficie de revolución completa e introducir finalmente las condiciones de borde.

En las presas de doble curvatura, y en general en estructuras con estas características, la convergencia en las distribuciones de los esfuerzos se acelera, puesto que éstas tienden a equilibrarse en los nudos auxiliares.

En las membranas los problemas se simplifican al suprimirse en cada barra la rigidez de torsión y una de las de flexión.

El método es igualmente aplicable a estructuras no superficiales, estableciendo tres direcciones de distribución del volumen.

Finalmente, indicaremos que no es necesario rellenar los cuadros correspondientes a las distribuciones en cada nudo (iguales en cada grupo de nudos); basta con ir registrando las operaciones de la máquina de calcular y llevar los resultados al cuadro de los resultados parciales, mecanismo operatorio sencillo, por lo que lo pueden efectuar auxiliares con la vigilancia del que proyecta en los resultados parciales. Otro tanto puede decirse en el cálculo de las características de los diferentes grupos de nudos.

Observación.

En la aplicación del método no es necesario hacer las transmisiones de esfuerzos directamente entre los nudos auxiliares; puede hacerse por intermedio de los reales, equilibrando correlativamente en una fase los nudos auxiliares y en la siguiente los nudos reales, continuando el proceso de esta manera.

Este último procedimiento, aunque más largo, resulta más claro y de más facilidad para revisar los resultados parciales, además de ser más corto y sencillo el cálculo de las características en los nudos. Los cuadros de las distribuciones se simplifican igualmente.