

Estudio sobre la confección de cimientos de concreto armado

EN la erección de construcciones especiales como, por ejemplo, chimeneas, depósitos de agua de gran altura o similares, de máquinas de gran tamaño, se presentan a veces dificultades de importancia debido a las cualidades del subsuelo. En general, no se dispone de un subsuelo firme o de roca, sino que a veces hay que construir sobre arena suelta, aglomeraciones poco firmes de piedras u otro subsuelo inadecuado.

En estos casos suele proyectarse la fundación en forma de bloque de hormigón armado, cuyas dimensiones hay que tomar en consideración, así como también las condiciones generales de la construcción, tales como su planta, su peso, los esfuerzos dinámicos, las oscilaciones, etc. Pero no solamente las dimensiones de los cimientos desempeñan un papel importante, sino que también influyen esencialmente en la distribución y la posición de las armaduras de fierro que reciban y transmitan las fuerzas probables.

Como las condiciones de cada proyecto son diferentes, es casi imposible dar reglas generales para determinar las dimensiones y demás características de las placas, cilindros o prismas que forman el cuerpo intermedio entre el subsuelo y la construcción misma. Pero para definir y resolver proyectos de esta índole o similares, sirve tal vez la descripción de un caso que el autor tuvo la oportunidad de tratar en el Instituto de Ensayes de Materiales de la Universidad Técnica de Dresde.

Se trataba de erigir una chimenea de 100 metros de altura para una planta eléctrica, sobre un subsuelo de poca resistencia contra presión. Además, las aguas subterráneas tenían un nivel muy alto, de manera que se decidió emplear una placa circular de cemento armado de 16,3 mts. de diámetro y de 1,6 mts. de espesor. En un principio se previeron únicamente fierros planos, en forma anular, para armadura; pero se consideraba necesario aclarar más la distribución de los esfuerzos, y para lograr este objeto se emplearon dos métodos: el de cálculo y el de ensaye.

Para aplicar el cálculo se supuso, a fin de no complicarlo demasiado, que habrían ciertas simplificaciones referentes a la presión del subsuelo y que, además, se emplearía una «placa delgada», caso que ya había sido tratado teóricamente en forma completa. Era necesario, en fin, concentrar el muro de la chimenea en un círculo

de diámetro igual al diámetro medio de este muro e invertir el conjunto de manera que la presión del suelo cargara la placa y ésta, a su vez, a la chimenea.

Así resultan las tensiones de flexión, o sean las tensiones radiales σ_r y las tangenciales σ_t y además el plano de flexión y, especialmente, la elástica en la sección meridional. Pero efectivamente, la chimenea no descansa en una sección anular, sino que el espesor de su muro se aproxima a un octavo del diámetro de la placa, y de este modo aparecen esfuerzos cortantes considerables fuera de las tensiones de flexión σ_r y σ_t . El resultado de los cálculos para las tensiones radiales y tangenciales o anulares, puede representarse gráficamente por separado para cada una de las dos, en tal

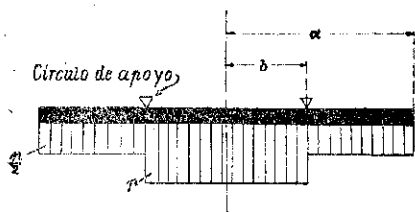


Fig. 1

forma que la presión del suelo p significa la carga y el muro anular de la chimenea, el apoyo. (Véase fig. 1).

Según los ensayos que se describen más abajo, puede considerarse la presión del suelo en el área interior del círculo, como distribuido casi uniformemente y la presión, a lo largo del perímetro de la placa, en primera aproximación como cero; su distribución en el anillo exterior de la placa que sobresale a la base de la chimenea, tendrá casi la forma de un triángulo de altura p que puede reemplazarse, para simplificar el cálculo algo complicado, por un rectángulo de igual área con $p/2$ como largo del lado correspondiente.

Bajo todas esas suposiciones, se calculan las tensiones radiales σ_r .

a) En la zona circular interior (dentro del muro de la chimenea):

$$\sigma_{r_o} = \frac{3}{64} \cdot \frac{a^2}{h^2} p [26 \nu^2 - 3\beta^2 (\beta^2 + 2) - 10\beta^2 - 7 - 20 \lg \beta]$$

b) En el anillo volante circular del exterior del muro de la chimenea:

$$\sigma_{r_i} = \frac{3}{64} \cdot \frac{a^2}{h^2} p [3\beta^2 \frac{1}{\nu^2} (\beta^2 + 2) (1 - \nu^2) + 13(\nu^2 - 1) - 20 \lg \nu]$$

En estas fórmulas significan:

h , el espesor de la placa

a , el radio de la placa

b , el radio del círculo de apoyo

r , la distancia del corte respectivo desde el centro de la placa

y las razones, $\frac{b}{a} = \beta$ y $\frac{r}{a} = \nu$.

La composición de las fuerzas se puede demostrar convenientemente por la curva de flexión en el corte meridional. Se demuestra entonces que la deformación de la

placa circular interior, o sea, su deformación convexa por la parte de arriba, prevalece si el brazo volante es pequeño; si es con vuelo creciente la influencia de su deformación aumenta de manera que al fin se produce una curva cóncava por la parte de arriba. El límite entre los dos casos está en la razón $b : a = 5 : 9 = 0,555$; entonces desaparece la tensión radial y, con ella, también la tensión tangencial en el centro de la placa.

Bajo iguales suposiciones y con las mismas asignaciones, se calculan las tensiones tangenciales o anulares σ_t .

a) En la zona circular interior (dentro del círculo de apoyo, o sea, el muro de la chimenea):

$$\sigma_o = \frac{3}{64} \cdot \frac{\alpha^2}{h^2} p [14 \nu^2 - 20 \lg \beta - 3\beta^2 (\beta^2 + 2) + 10\beta^2 - 7],$$

b) En el anillo circular volante (exterior del muro de la chimenea):

$$\sigma_t = \frac{3}{64} \cdot \frac{\alpha^2}{h^2} p [7\nu^2 - 20 \lg \nu - 3\beta^2 (\beta^2 + 2) \frac{1 + \nu^2}{\nu^2} - 1].$$

Para una razón de los radios $b : a < 5 : 9$ como es empleado en la mayoría de los casos, dominan en el círculo interior las tensiones radiales, es decir, que aquí los fierros tienen que colocarse principalmente en forma radial; sin embargo, deben ponerse también fierros anulares, especialmente frente al apoyo.

En la parte exterior hay otras condiciones. En vista de que las tensiones radiales vuelven a cero en su orilla, dominan las tensiones tangenciales, de manera que allá tiene que preverse ante todo una armadura anular.

En caso de concreto armado, el signo de las tensiones es de mayor importancia, porque depende esencialmente del valor del vuelo, y, además, es decisivo si los fierros tienen que colocarse en la cara inferior o superior de la placa.

Si se trata, en primer lugar, de aclarar el sentido de la deformación y la escasez de tiempo u otros motivos no permiten emplear el cálculo demoroso, entonces se dispone en el ensaye de un medio más sencillo de concebir la acción de las fuerzas.

Para hacer ver claramente las deformaciones y, sobre todo, para que éstas no desaparecieran después del ensaye, se eligió, en vez de un material elástico, un cuerpo plástico tal como el plomo. Además, se amoldó en lo posible el ensaye a la realidad, o sea en cuanto al descanso de la placa en el suelo, a la aplicación de la carga y a las medidas de la placa. Esta, de plomo duro, tenía un diámetro de 230 mm. y un espesor de 12 mm. de manera que el modelo mantuvo una razón de 1 : 70 referente a su diámetro, y de 1 : 210 con respecto a su espesor. En vista de que en una placa más delgada se desarrollan las deformaciones con mayor facilidad y hasta más pronunciadas, se ha elegido el espesor de la placa en un tercio de la escala de las demás medidas del modelo.

El ensaye fué ejecutado en una máquina vertical para la prueba de materiales (prensa) en tal forma, que sobre la plataforma inferior movable se montó un cajón circular de fierro de paredes delgadas, de 155 mm de altura y de 390 mm de diámetro en el interior. Este fué relleno con arena que había sido pasada por un

tamiz de 120 mallas por cm^2 . Sobre esta arena fueron puestas dos hojas circulares de papel de dibujo de 235 mm. de diámetro y encima de éstas la placa de plomo. La carga, en forma de anillo, fué agregada uniforme y céntricamente sobre la placa, tal como actúa el peso de la chimenea sobre la placa del fundamento. La escala de los dos diámetros del anillo fué de 1:70. Para proteger la cara superior de la placa de plomo se colocó un anillo de papel de dibujo antes de poner la carga. El empleo de arena fué debido a que el fundamento de la chimenea debía efectuarse también sobre un subsuelo de arena fina.

La carga fué aplicada de a 500 kg., hasta un total de 6600 kg. Mientras que se aplicó la carga, se hundió la placa en unos 70 mm., en la arena, y la arena desplazada sobresalió sobre el borde del cajón, tal como ocurre cuando se sumerge un cuerpo en un recipiente lleno de agua. Después de este ensaye, se tomó la placa de su lecho y se hicieron las siguientes medidas y observaciones.

1) Dilataciones radiales.

Para posibilitar las mediciones de alta precisión, se tornearon antes las caras de la placa con especial cuidado y se marcaron en un semicírculo un sistema de

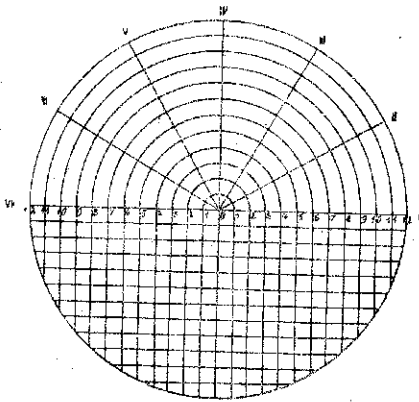


Fig. 2

coordenadas rectangulares y en el otro coordenadas polares. Las coordenadas rectangulares sirvieron para hacer visible ya, a primera vista, las deformaciones de la superficie motivadas por la presión. Las coordenadas polares sirvieron el mismo objeto y, además, permitieron efectuar mediciones de una precisión hasta 0;01 mm., por medio de un dispositivo comparador que consta en sus partes principales de dos microscopios unidos convenientemente, y de los cuales uno se ajusta sobre el punto que se desea medir, mientras que el otro determina su posición sobre una escala de medida. Por los arcos 0 a 12 de estas

coordenadas polares, se dividieron los rayos I a VII en trazos c/u de 1 cm. de largo aproximadamente, de manera que resultaron en las dos caras, un total de 168 puntos fijos para la medición. (Véase fig. 2).

Los largos de estos trazos fueron determinados antes y después del ensaye. Para una cara, p.ej. la inferior, y por un trazo p.ej. entre los círculos 5 y 6, resultaron 7 valores para la variación de su largo, de los cuales se formó el término medio aritmético que se introdujo como la variación del trazo 5 a 6 en dirección radial. De igual modo se determinaron las dilataciones radiales de los otros trazos, las cuales aparecen en el cuadro siguiente:

DILATACIONES MÉDIAS EN MM.

Trazo	Cara inferior	Cara superior
0—1	— 0,04	— 0,02
1—2	+ 00	+ 07
2—3	+ 01	— 03
3—4	+ 06	— 01
4—5	+ 04	+ 00
5—6	+ 14	— 03
6—7	+ 17	— 19
7—8	+ 00	— 05
8—9	— 05	+ 02
9—10	— 05	+ 03
10—11	+ 02	— 02
11—12	+ 14	— 01

El signo + significa alargamientos; el signo — acortamientos.

El anillo de presión, por el cual se transmitió la carga sobre la placa, estaba situado dentro de los círculos de 3 a 6, y se demostró que en los alrededores de 7, es decir, un poco al exterior del anillo se formaban las mayores dilataciones, tanto en la superficie inferior como en la superior. Si se considera un corte por las superficies elásticas a lo largo del diámetro formado por los rayos I y VII como viga volante, empotrada en el trazo 3 a 6, y volando desde 6 a 12, esta viga sufriría, por una carga dada hacia arriba, los mayores esfuerzos y luego dilataciones en la vecindad del punto 7.

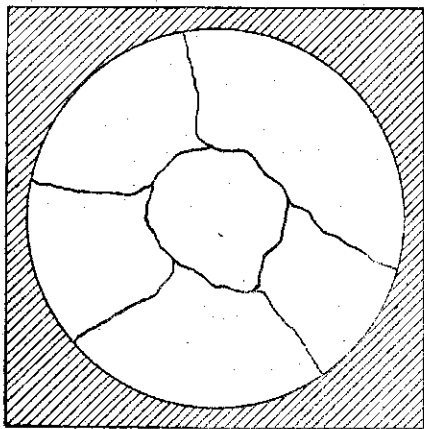


Fig. 3

2) Determinación de las deformaciones.

Para determinar la deformación de la superficie superior e inferior, se puso la placa de plomo sobre una mesa de ajuste, y de ésta se midieron las ordenadas de la superficie elástica sobre el diámetro I y VII en los 24 puntos, por medio de un aparato indicador y con una precisión hasta 1/100 de mm. Las cifras que resultaron de estas mediciones, demostraron que la comparación empleada con una viga volante era la correcta. Un

cálculo matemático preciso, encontraría dificultades extraordinarias para su resolución, en vista de que la distribución efectiva de las presiones en la arena, no puede determinarse con seguridad, y luego que la integración de las ecuaciones diferencia-

les no sería efectuable. Se recomienda, por consiguiente, el cálculo de la placa como viga volante, bajo una presión de dirección desde abajo y, uniformemente distribuída a todo el largo de la viga. Tal cálculo considera solamente, sin embargo, los esfuerzos radiales; los esfuerzos anulares podrían suponerse sencillamente como iguales a los radiales para cada punto correspondiente.

Una comprobación acertada de como se desarrollan efectivamente las tensiones, suministró la forma de las partes del papel puesto debajo de la placa de plomo. Se vieron rupturas tal como ocurriría bajo las mismas condiciones en un cuerpo de material rígido. Primeramente se forzó el núcleo central, venciendo a las tensiones radiales, y después se rompió el papel en dirección radial venciendo las tensiones anulares. (Véase fig. 3).

El ensaye suministró entonces, en un tiempo relativamente corto, una buena demostración de las deformaciones. Permitió formarse una idea sobre el arreglo más adecuado de la armadura para la placa de fundamento de la chimenea y pudieron tomarse convenientemente las disposiciones para la construcción.