

SOLUCION EMPLEADA EN EL SEXTO DEPOSITO DE AGUA DEL ABASTECIMIENTO DE MADRID, CONSTRUIDO SOBRE SUELOS EXPANSIVOS POR EL CANAL DE ISABEL II

Por JESUS DE ARCENEGUI

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Presenta el autor el interesante estudio sobre suelos expansivos, basado en un informe de la Jefatura de Sondeos, y que ha servido de base para encontrar la solución que permite terminar el sexto Depósito del abastecimiento de aguas de Madrid, cuya construcción quedó interrumpida por la aparición de las arcillas expansivas.

Las obras del sexto Depósito para el Abastecimiento de Aguas de Madrid, se empezaron a ejecutar por el Canal de Isabel II, con arreglo a un Proyecto en el cual se empleaba una solución normal de depósito enterrado con recinto cerrado por muros de hormigón, solera del mismo material y cubierta plana apoyada sobre pilares, ambos de hormigón armado.

Su capacidad era de 120 000 m.³, dividido en cuatro compartimientos de 30 000 m.³, aproximadamente, cada uno.

Con arreglo al Proyecto indicado, se ejecutaron obras que, en líneas generales, eran las de la excavación del vaso, muros de contorno del depósito en la mitad de su longitud total, muros divisorios también en la mitad, aproximada, del total, dos de los cuatro pozos de tomas de agua en lo que se refiere a sus obras de fábrica y parte del Canal de alimentación del depósito. Por circunstancias derivadas de la guerra de Liberación, los obras fueron paralizadas y en este período se pudo apreciar que el terreno sobre el que se ejecutaba el depósito no era estable.

La inestabilidad de estos terrenos fué puesta de manifiesto por las averías que se produjeron en una casilla de guarda situada en un lugar

inmediato al vaso del depósito en su lado Este. Transcurridos unos seis años desde que fué terminada su construcción, se observaron diversas grietas en distintas zonas de la casa, tanto en los muros exteriores como en los tabiques y techos del interior. Las fotografías que ilustran este artículo corresponden a esta casilla, en las que se pueden apreciar la gran importancia de las grietas aludidas. Este hecho produjo la natural alarma y motivó el que las obras no se continuaran, de acuerdo con el Proyecto de Ampliación y Mejora del Abastecimiento, con arreglo al cual se habían empezado.

La gravedad del problema planteado y la dificultad de encontrarle solución, por ser debido a la existencia de un terreno cuyo comportamiento no era aún bien conocido, ha tenido detenida la continuación de las obras del sexto Depósito desde la paralización antes indicada. Con el fin de conocer la naturaleza y disposición del terreno y tener un punto de partida para la adopción de las medidas oportunas que garantizaran el éxito de las obras, fué solicitado de la Jefatura de Sondeos, Cimentaciones e Informes Geológicos y realizados por ella, un informe en 1955 y dos series de sondeos en 1959 y 1960,

acompañados de sus correspondientes informes.

En resumen, se deduce del estudio de ellos que existen en líneas generales, en los terrenos donde ha de construirse el sexto Depósito, dos capas de *arcillas expansivas francamente peligrosas*; una, superficial, designada en la figura 1.ª, "Gráfico del perfil III", con la letra *b* y otra profunda designada con la letra *a*.

La capa *a* se encuentra por bajo de los 10,00 metros de profundidad, y la capa *b*, que se ex-



tiende por el lado E. del Depósito, a unos 2,50 metros de profundidad y con un espesor de unos 3,00 m., cuya capa ha sido cortada por la excavación del Depósito. Esta capa es la que ha originado la ruina de la casa del guarda y ha desaparecido al excavar el vaso del Depósito.

Entre estas dos capas *a* y *b* de arcilla, existen capas de arenas arcillosas con más o menos agua, designadas con la letra *c*, y lentejones de arcillas designadas con las letras *b'* y *b''*, de análogas características a la *b*.

Las arcillas de la capa *a*, por su profundidad y por encontrarse bajo un nivel freático prácticamente permanente, se consideran "no influente en la posible obra", y las de la capa *b*, por haber sido suprimida por la excavación del depósito, no la tienen tampoco, pero quedan como peligrosas las de la *b'* y *b''*.

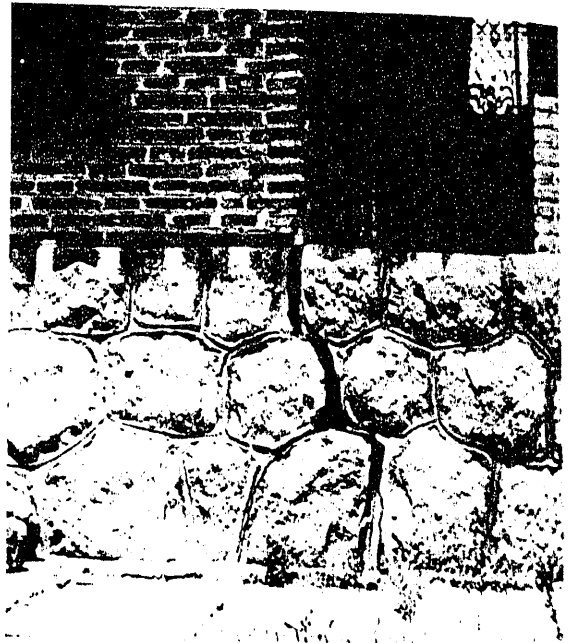
Respecto a los ensayos de penetración, se comprobó que podía llegarse a cargas de 3 kilogramos/m.² a "profundidades normales", que varía de 1,00 m. en el lado O. a 4,00 m. en

el E., según el gráfico, si bien en el informe se dice es necesario bajar hasta los 6,00 m. en algún punto aislado del ángulo NE.

El estudio de las curvas de hinchamiento a profundidades distintas y en diferentes sitios del vaso, representadas en la figura 2.ª, "Gráfico de hinchamiento", reflejan que las cargas de hinchamiento nulo para la zona de arcillas son muy elevadas y no posibles de alcanzar con la estructura normal de un depósito.

Según los estudios de Kantey y Brinek, los fenómenos de rotura de estructuras por hinchamiento de arcillas tienen lugar cuando se da una combinación de: *a*) un espesor de arcilla, *b*) una capa freática baja, *c*) una condición de desecación en el suelo.

Las tres circunstancias concurrían en el caso de los terrenos del sexto Depósito, y si sobre este



terreno se construye una planta cubierta y más con las dimensiones del sexto Depósito, al suprimirse el proceso de evaporación que mantiene el terreno en equilibrio, o por otras posibles causas, aún no bien conocidas, se produce un aumento de humedad en las arcillas, y como consecuencia el aumento de su volumen.

El problema planteado no era privativo de este depósito, como es bien sabido, teniéndose noticias de su existencia en los Estados del Sur de EE. UU., Africa del Norte y del Sur, Oriente Medio y también en Australia, donde reviste gran importancia, pues por manifestaciones de los ingenieros de allí, venidos al Primer Congre-

o Internacional de Suelos Expansivos, celebrado en el "Tecnion City de Haifa" (Israel), en junio de 1962, pudimos informarnos de que un 30 por 100 de los terrenos del país presentaban esta característica.

Mr. Jennings, Profesor de la Universidad de Witwatersrand, en Africa del Sur, en el Congreso antes aludido, planteaba en la forma siguiente los distintos problemas a resolver cuando nos



encontramos en la necesidad de construir sobre suelos expansivos.

- 1.° Problemas de la interacción entre el suelo y la estructura:
 - a) Cargas producidas por la estructura.
 - b) Capacidad de la estructura para soportar deformaciones.
 - c) Capacidad de carga del subsuelo.
 - d) Producción de los diferentes movimientos.
- 2.° Problemas del proyecto de la estructura:
 - a) Proyecto por flexibilidad y aislamiento.
 - b) Proyecto por rigidez.
 - c) Mezcla de estructura flexible y rígida.
 - d) Proyecto de los cimientos.
- 3.° Problemas de levantamiento de construcciones existentes.
- 4.° Problemas y efectos asociados:
 - a) Daño a las obras cercanas.
 - b) Daño a los desagües y viajes de aguas.
 - c) Daño y cambio en los niveles freáticos.
 - d) Fuente de desecación local.

Como puede apreciarse, la experiencia adquirida por Mr. Jennings, sin duda alguna una de las máximas autoridades en esta materia en la actualidad, nos muestra que el problema es complejo.

Aparte soluciones de tipo circunstancial empleadas en Tejas y Africa del Sur para luchar contra los movimientos de estos terrenos, los tres grandes grupos en que podemos clasificar las soluciones hasta ahora empleadas para construir sobre terrenos expansivos son las siguientes:

- a) Construcciones rígidas independientes de los movimientos del terreno.
- b) Construcciones flexibles tolerando los movimientos del terreno.
- c) Construcciones rígidas tolerando los movimientos del terreno.

Estudiando las posibilidades de aplicación de cada una de estas soluciones, no dieron un re-



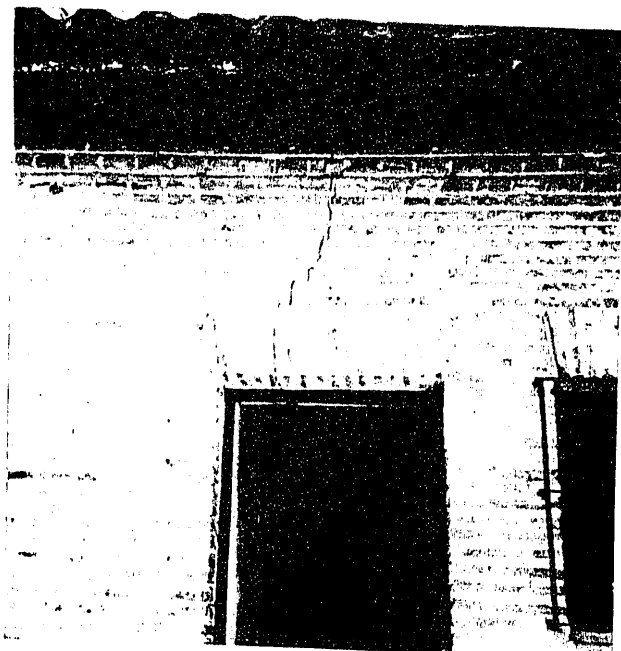
sultado satisfactorio, bien por ser excesivamente cara o por no reunir las necesarias condiciones de seguridad.

La primera de las indicadas ha sido la utilizada en el Depósito de Hillcrest (Denver-Colorado), en 1960-61, y supuso un aumento de más de quinientos mil dólares, sobre lo previsto para suelo normal, para una capacidad de 30 millones de galones, muy parecida a la del que estudiamos (Engineering News Record, July 28, 1960).

En el depósito de Porte des Lilas (París), de 200 000 m.³ de capacidad (Technique et Sciences

Municipales, mayo 1962), se ha empleado el sistema de solución rígida, adoptando disposiciones especiales en la construcción, para asegurarse de que el estado de humedad del subsuelo bajo el depósito, no ha de alterarse y eliminar así el peligro de hinchamiento.

La disposición de la estructura del vaso de este Depósito en dos plantas superpuestas, con 7,50 m. de desnivel entre ellas y su aislamiento del terreno inferior y colindante mediante recintos ahovedados, con pasillos de inspección



entre ambas, parece ser de muy cara y complicada construcción.

Planteado así el problema, no teniendo a nuestro alcance la experiencia completa de soluciones aplicadas en casos similares y resultando extremadamente onerosas la aplicación de los sistemas hasta ahora considerados como clásicos para estructuras de más reducido tamaño, se planteó la necesidad de buscar otro emplazamiento o de encontrar una solución adecuada para nuestro caso.

La situación elegida para el sexto Depósito era, sin duda, acertada; está situado al final de las cotas altas que separan las cuencas del Abroñigal y del Jarama y dominando la zona a abastecer.

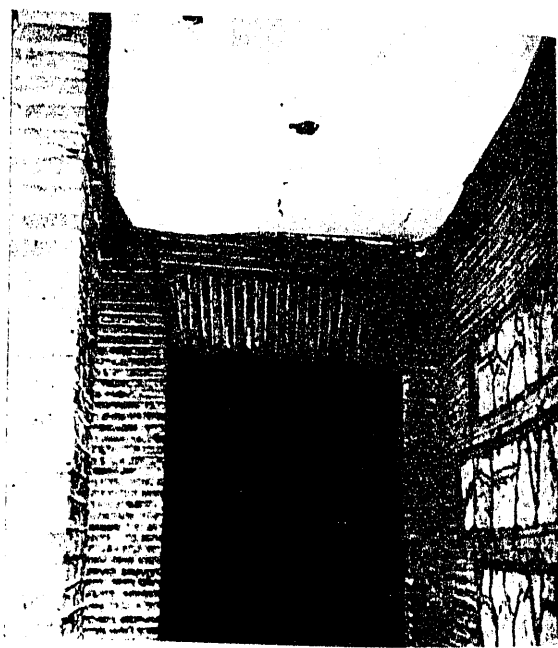
Por otra parte, las arcillas expansivas se encuentran repartidas más o menos profusamente por toda la zona, y es probable que sobre la acumulación de los inconvenientes ya reseñados, nos encontraríamos, al cambiar, con un terreno

de iguales o parecidas características. Esto, sin tener en cuenta que sería necesario abandonar, dejando inútil para la construcción, todo el vaso del depósito ya excavado y el coste de los nuevos terrenos a expropiar.

Con el fin de buscar una solución viable al problema y para aminorar los efectos que los levantamientos del terreno pudieran producir en la estructura del vaso del depósito, se dividió éste en varios compartimientos con estructuras independientes.

Para la forma de estos compartimientos que serían, estructuralmente, como depósitos aislados, al no poder contar con el terreno para apoyo de los muros de contorno, se eligió la cilíndrica como más adecuada.

Tratando de encajar la capacidad del Depósito de 120 000 m.³ en depósitos cilíndricos que se ubicaran en la excavación hecha, teniendo en



cuenta la conveniencia de eliminar las capas de arcillas superficiales, las llamadas *b* anteriormente, y dar mayor rigidez al cilindro que ha de constituir las paredes de los depósitos, se llegó a dividirla en doce unidades iguales de 40,00 metros de diámetro y 8,00 m. de altura de agua en vez de los 5 metros del Proyecto anterior, y obteniéndose así una mayor seguridad en el servicio caso de que, pese a las precauciones tomadas, los movimientos previsibles en el terreno pudieran dañar alguna unidad.

Estas doce unidades forman dos a dos los seis compartimientos independientes de que

consta el Depósito, con una capacidad cada uno de 20 000 m.³.

En las conclusiones del Informe, redactado por el Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Profesor Jiménez Salas, se llegó a cifrar los posibles movimientos absolutos del terreno en 10 centímetros, y los relativos, en 5 centímetros.

Con estos datos y por ser en principio más tranquilizadora en cuanto a su estanquidad, se estudió la solución con solera rígida en cúpula

la posibilidad de construir una estructura con solera flexible apoyada sobre el terreno, unida elásticamente al anillo de cimentación sobre el cual se apoyaba la pared del depósito. De esta forma, el gran peso del agua gravita sobre el propio terreno, y los posibles y pequeños movimientos diferenciales entre solera y pared quedan absorbidos por la elasticidad del elemento que los une. Para la cubierta se conserva la forma de cúpula por la razón antes dicha.

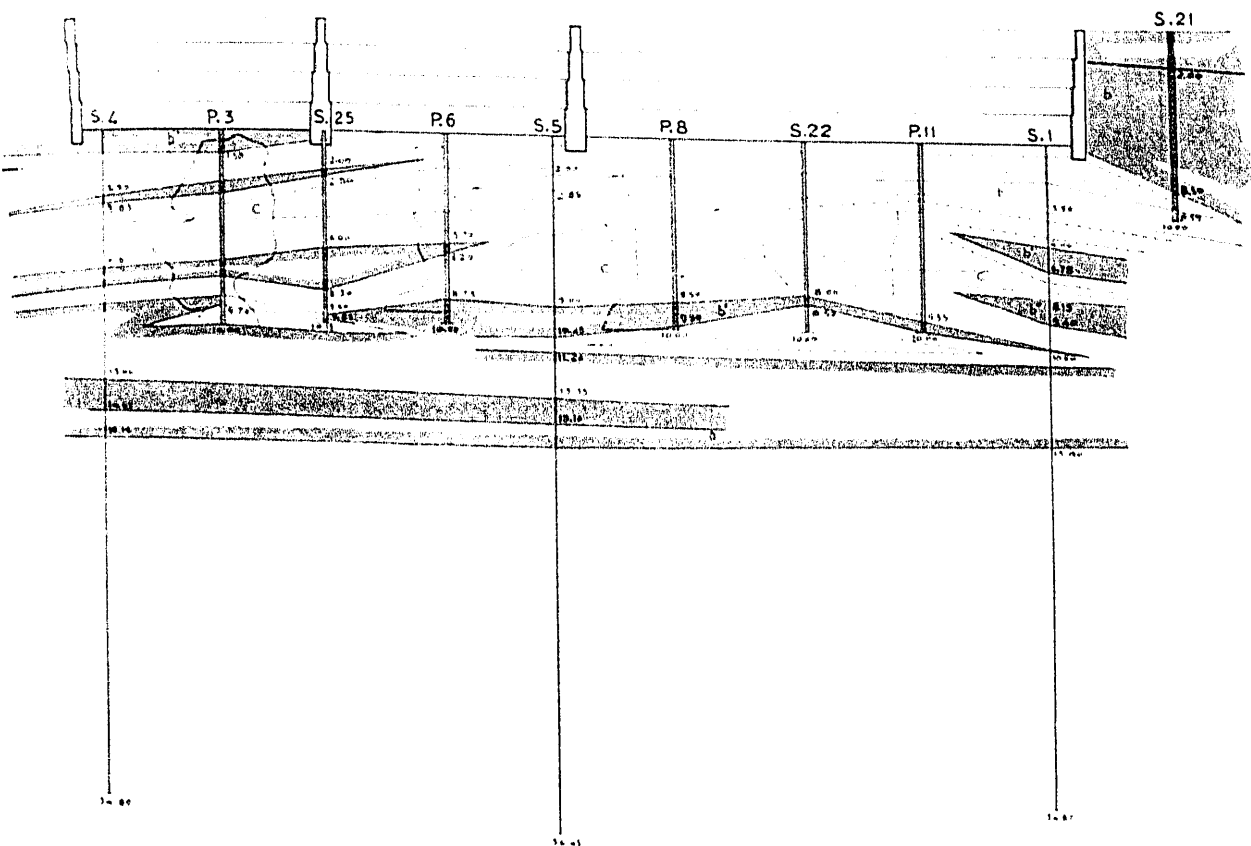


Fig. 1.ª — Gráfico del perfil III.

invertida que sirviera, en su contorno, de cimiento al cilindro que forma la pared y a su vez en la parte superior de ésta apoyar otra cúpula que constituyera la cubierta, evitando así la existencia de pilares apoyados en el terreno, que no ofrece garantía.

Desgraciadamente las hipótesis de cálculo necesarias, deducidas del Informe antes aludido, para dimensionar esta cúpula invertida dado el gran peso del agua que sobre ella gravitaba, la hacían de construcción antieconómica y de muy difícil realización, por lo que se pensó en

Puestos al habla con la Casa Americana Preload, dedicada a la construcción de depósitos cilíndricos precomprimidos, fue sometida a su consideración la conveniencia de la solución con depósitos de su patente, pues el zunchado de estos depósitos los capacitan especialmente para su trabajo como viga en un desigual levantamiento del terreno en los puntos de su contorno.

Contando con la experiencia y colaboración de esta Casa especializada en la construcción del tipo de depósitos que nos interesaba, los conocimientos adquiridos con los informes reci-

bidos en el Departamento de Suelos Expansivos del Bureau of Reclamation de Denver, del Profesor Kellin y del especialista Profesor Dawson Raymond en la Universidad de Austin, así como en el Coloquio Internacional sobre suelos Expansivos celebrado en el Tecnion City, de Haifa,

hormigón precomprimido de 40,00 m. de diámetro, 25 cm. de espesor y 8,00 m. de altura, una solera flexible de hormigón pretensado y una cubierta en cúpula esférica apoyada sobre las paredes cilíndricas. La capacidad de cada unidad es de 10 000 m.³.

SEXTO DEPOSITO

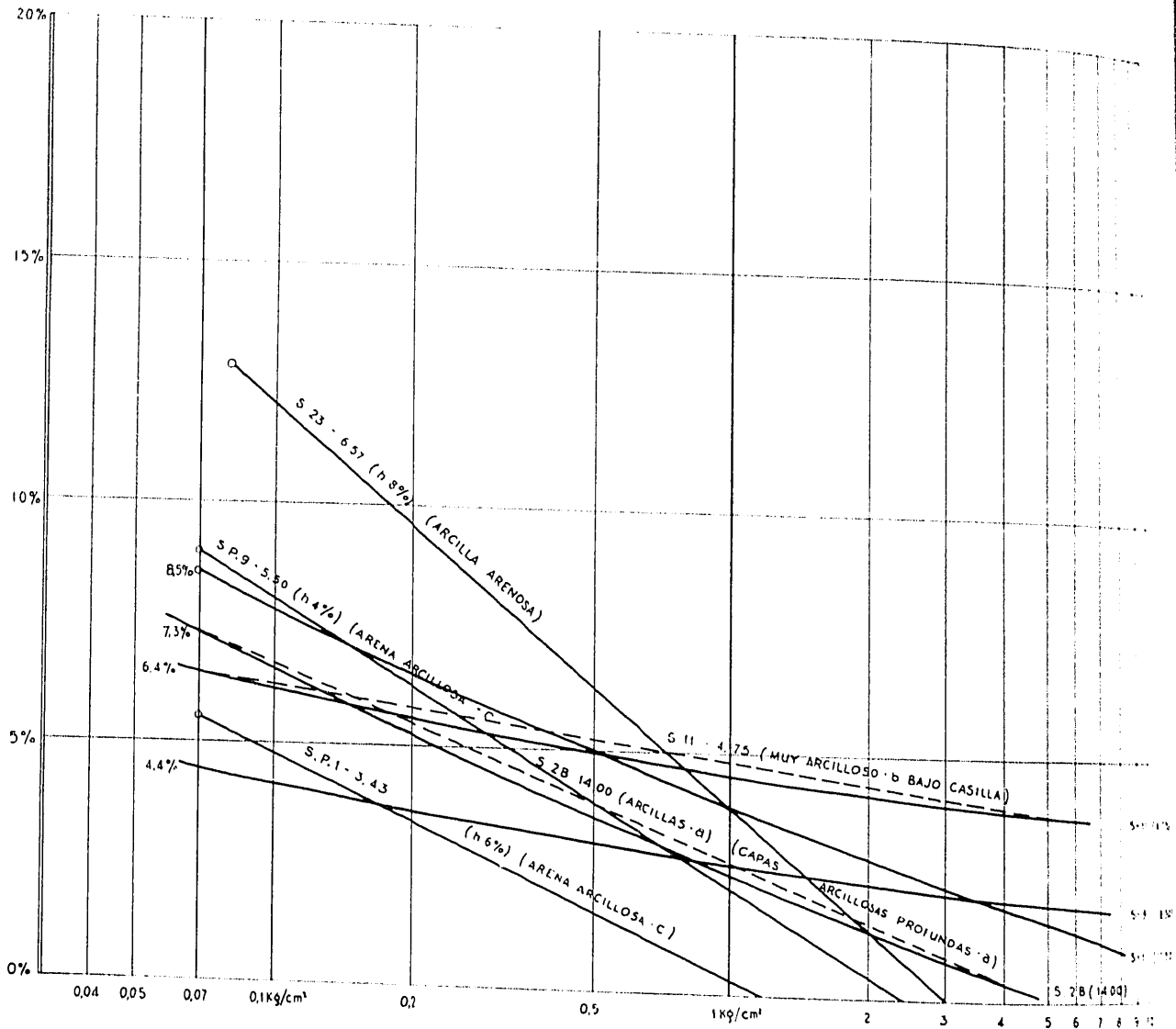


Fig. 2.^a — Gráfico de hinchamiento.

donde fue expuesta la solución elegida y comentada particularmente con el anteriormente citado Mr. Jennings, se ha adoptado la solución empleada.

Puede apreciarse en los gráficos que complementan este artículo que cada unidad de depósito estará formada por una pared cilíndrica de

El cemento de las paredes es, a su vez, otro cilindro de 2,00 m. de altura y 30 cm. de espesor de hormigón armado. La superficie de apoyo sobre el terreno será fijada de acuerdo con los ensayos oedométricos que habrán de realizarse una vez hecha la excavación y tomadas muestras del propio terreno de asiento con el fin de no

abrepasar la carga admisible por el terreno y evitar asentamientos por fluxión lateral.

La cubierta está constituida por una cúpula esférica de 5,00 m. de flecha, con un anillo zunchado en su mayor diámetro para soportar el empuje y unida elásticamente a las paredes del depósito con la interposición de una junta impermeable.

La solera está formada por una delgada capa de hormigón pretensado, de forma que asegure una compresión permanente superior a la máxima tensión que, en las hipótesis más desfavorables, según el informe del Laboratorio de Mecánica del Suelo, pueda producir los movimientos diferenciales del subsuelo y que se une a las paredes por una junta elástica.

Los posibles movimientos diferenciales del subsuelo se transmitirán atenuados a la solera, gracias a un relleno seleccionado e inerte que se coloca en el interior del anillo de cimentación.

Por el fondo de esta excavación suplementaria, que se realiza con el doble objeto de eliminar las arcillas más peligrosas, que son las más cercanas a la superficie, y repartir y atenuar los levantamientos que el subsuelo pueda transmitir a la solera, se coloca una red de drenes que debe eliminar no sólo las posibles filtraciones a través de la solera del depósito, sino también el agua que pueda subir de las capas freáticas inferiores, impidiendo su permanencia bajo el depósito y su acción sobre las arcillas expansivas. Unos pozos situados al final de los drenes de recogida avisarán la existencia de estas filtraciones, y por su volumen y situación indicarán las zonas de la solera donde se ha producido la fuga o si es debido al agua ascensional del terreno.

Con la disposición adoptada se ha conseguido: a) Eliminar las arcillas de las capas superficiales al situar la solera 3,00 m. más baja. b) Disminuir la diferencia entre las condiciones de evaporación de los terrenos situados bajo los depósitos y los circundantes, ya que en esto se conserva una capa de 5,00 m. de altura de terreno que lo aísla de la atmósfera. c) Una forma y disposición en las paredes, cubierta y cimientos del depósito, adecuadas para conseguir con su colaboración la rigidez y estanquidad necesaria ante los posibles hinchamientos de las arcillas. d) La obtención de lo que pudiéramos llamar una carga pasiva del depósito sobre el terreno, muy superior a su carga activa, ya que por su forma rígida ofrecerá una resistencia al levantamiento, cuando la arcilla quiera actuar en algunas de sus zonas de apoyo, muy superior a la de su natural gravitación sobre ella. e) Aminorar las posibles consecuencias de los movimientos del terreno al dividir el depósito en doce estructuras independientes. f) Suprimir los pilares de apoyo de la cubierta. g) Utilizar la excavación ya realizada para el Proyecto abandonado como recinto de seguridad para caso de rotura de algún depósito, cuya agua no saldrá así violentamente al exterior y sí por las alcantarillas de servicio de los depósitos.

La curva de frecuencia de manifestaciones de movimientos en suelos expansivos llega a casi a su 100 por 100 a los siete años de realizada la obra, por lo que será necesario esta espera para poder asegurar que la solución ha sido acertada y que se ha encontrado una forma de construir depósitos de agua sobre suelo expansivo con un coste parecido al de los depósitos normales.

