Observaciones sobre la construccion de tranques, a propósito de la caida de los tranques Austin (Pensilvania i Texas)

Traducido del *Engineering Record*, 11 Nov 1911, por *Leonardo Lira*)

1. Subpresiones interiores e inferiores.—El señor Freeman dice en su artículo publicado en el número de 19 de Octubre del *Engineering News:*

«He observado que muchos de los libros clásicos de ciencias aplicadas, de construcciones de albañilería i de teoría de tranques dicen mui poco respecto al peligro que entrañan las subpresiones interiores o inferiores en un tranque de grandes dimensiones i a lo importante que es tomar medidas para resistirlas. Tambien traen mui escasas nociones sobre las presiones orijinadas por el hielo o por por las dilataciones.

Comentando la ruptura de los dos tranques, la atribuye incuestionablemente a «la penetracion de la presion del agua al interior i debajo de la masa del tranque conjuntamente con los efectos secundarios que disminuyen la resistencia al deslizamiento.»

Mas adelante agrega que, habiendo calculado las tensiones en muchos tranques, ha llegado a la conclusion de que «la presion del agua penetra en los poros de la albañilería i en las rasgaduras que comienzan a formarse entre la albañilería i el subsuelo de roca. Esta presion de agua se reduce hasta llegar a 0 en la parte inferior de aguas abajo del tranque.» Agrega:

«Por lo que he visto en los dos tranques Austin, me inclinaré en el futuro a imponer el criterio que exije que se resista la presion estática total del agua, suponiéndola que penetre desde la cara de aguas arriba del tranque sin disminuir hasta casi llegar a la cara de aguas abajo en el pié del mismo. Seguramente es racional suponer que la presion total del agua penetrará a alguna distancia bajo el tranque, i la razon en que esta presion disminuirá a medida que avancemos hácia aguas abajo es sencillamente una cuestion de áreas relativas de entrada i salida i tamaño de las hendiduras. La influencia de la resultante de las presiones será de hacer estancas las junturas cerca del pié de aguas abajo del tranque, de manera que la subpresion penetrará mas

adelante i con mayor intensidad que una fuerza que fuese variando gradualmente hasta valer cero en el pié de aguas abajo del tranque. Se concibe que las rasgaduras del subsuelo de roca permitirán que la subpresion atraviese casi el total del ancho del tranque con una disminucion pequeña de su intensidad. En esta hipótesis debe calcularse la posicion i direccion de la resultante i verificarse qué resistencia contra el deslizamiento se obtiene.»

La subpresion estática debajo de un tranque ha sido mas o ménos considerada por muchos injenieros, pero la presion interna dentro del cuerpo del tranque mismo parece que ha sido jeneralmente despreciada o ignorada. Esta presion nace simplemente de la falta de continuidad de una estructura que se supone monolítica, i como sucede en muchos casos, se ha abusado un poco del uso de piedras de grandes dimensiones («plums») i particularmente si el trabajo es hecho por un contratista interesado sólo en obtener la mayor ganancia, hai un riesgo permanente en que el asentamiento de ellas sea defectuoso i por consiguiente haya, i en realidad hai, innumerables cavidades lenticulares, por decirlo así, en las cuales la presion estática debe penetrar. El hecho de que estas cavidades sean comunmente pequeñas i, por consiguiente, indescubribles, aumenta mas bien que disminuye el peligro. Sucede con relativa frecuencia que burbujas de aire son arrastradas con el mortero i en cierto modo forman como un panal dentro de la masa del tranque. Es imposible que la mas minuciosa inspeccion pueda prevenir estos defectos en las construcciones llamadas «*cyclopean masonry*». Si en vez de los elementos de grandes dimensiones se usase una capa de concreto de 3 pulgadas i ella fuese completamente revuelta i vaciada como un líquido, no «colocada», podria subsanarse el peligro indicado. Desgraciadamente el costo de esta operacion la hace prohibitiva en los grandes cubos de los tranques.

Una causa mas comun aun de la existencia de las presiones internas está en las junturas entre el material trabajado de un dia con el del siguiente, como lo observa mui bien el señor Freeman. El articulista inspeccionaba recientemente la cara de un tranque bien calculado en un dia en que el agua llegaba hasta un poco mas abajo de la cresta del tranque i, por consiguiente, quedaba libre la cara posterior, la que aparecia materialmente cubierta de gotitas de agua en las junturas verticales i horizontales. El termómetro marcaba una temperatura inferior a 0° i la fila contínua de gotas habia formado como una pequeña cortina bajo cada juntura. Desgraciadamente no habia a mano una máquina fotográfica para tomar nota de un caso tan especial. Un momento de reflexion hace ver claramente que semejante tranque no es en absoluto una construccion monolítica, sino simplemente una muralla estanca con junturas i su estabilidad no depende ni de la cohesion ni de la resistencia al cizalle de su material sino del casual entrelazamiento de los bloques separados.

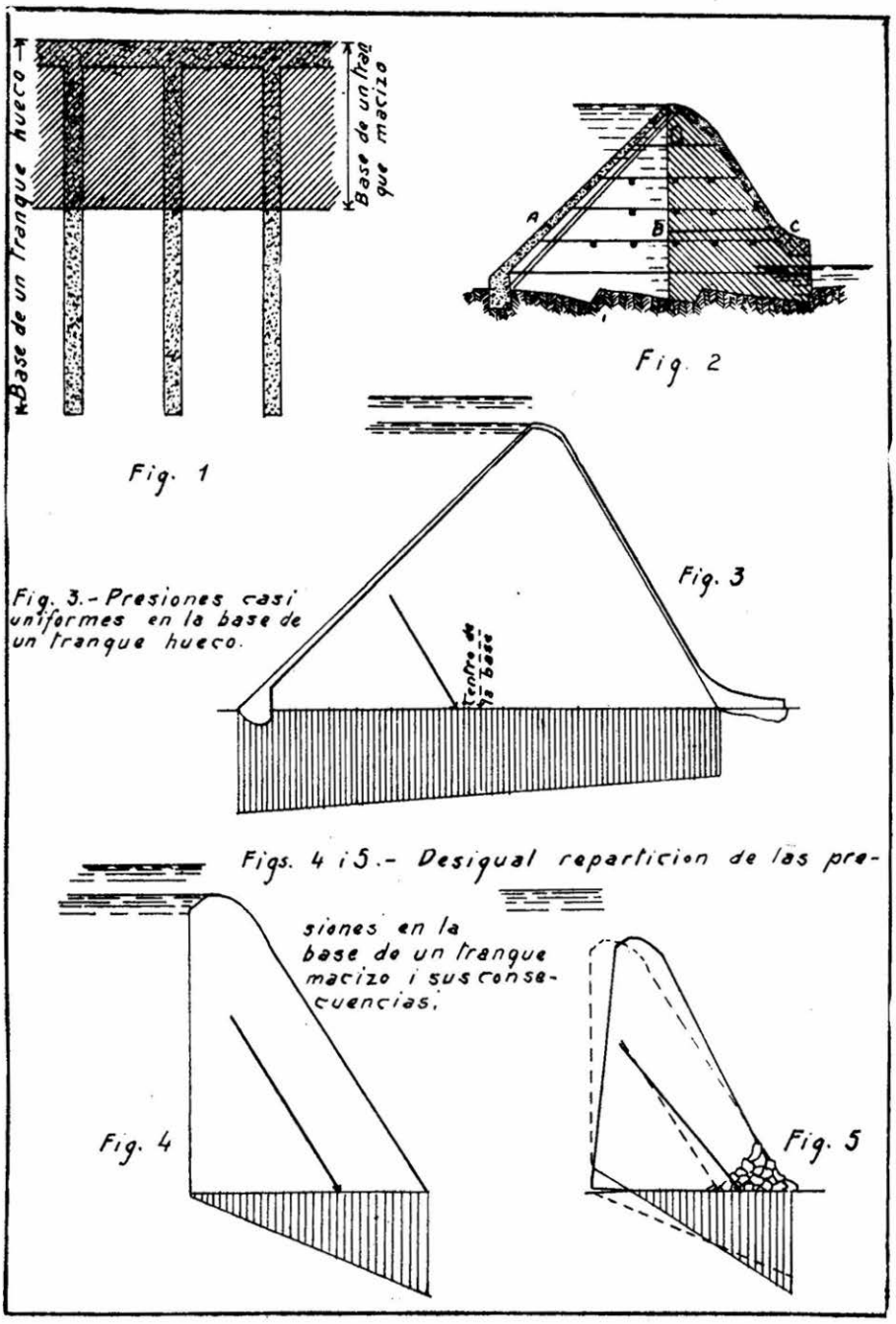
Si el peso de los prejuicios es tan grande que no permita ir a escudriñar claramente hasta los principios fundamentales ignorando los precedentes i la práctica que hicieron que *entónces* se hiciese necesario el uso del único material a

mano, la albañilería o el concreto; en una palabra, si uno debe continuar proyectando una seccion compacta i maciza porque sus antepasados que no tenian alternativa posible así lo hicieron, entónces ciertamente que el único remedio es escavar i escavar mas i mas profundamente i continuar acumulando material, hasta que por el solo peso bruto quede estable el tranque a pesar de todas las fuerzas solicitantes, conocidas i desconocidas, que pueden nacer debajo i dentro de él.

Estas dificultades aparecieron claramente a nuestro espíritu en la concepcion orijinal de los tranques de concreto armado i nos pareció manifiesto que el remedio debia buscarse en una concepcion radicalmente nueva del problema entero. Nos pareció que en lugar de grandes remedios debiéramos emplear pequeños preventivos. Por consiguiente, se adoptó una concepcion en la cual, por decirlo así, *el tranque no tiene base*, es decir en la cual la base en planta del tranque es estendida considerablemente, miéntras que el área de contacto con la fundacion para que la distribucion de las presiones sea uniforme, es reducida considerablemente. En otras palabras, el tranque *macizo* reclama una base contínua en contacto con sus fundaciones. En el tranque *hueco* anillos relativamente angostos o contrafuertes la sustituyen, aunque abarcan una área de base mucho mas grande. En la fig. 1 la base relativa de un tranque macizo está achurada i superpuesta a la base de un tranque de concreto armado de la misma altura. Si se recuerda que es solamente cuando el agua está acumulada que puede ejercer su presion estática total, se verá que este nuevo proyecto permite una salida corta i rápida a cualquiera vía de agua que esté en contacto con la presion hidrostática del estanque.

Al proyectar la seccion de los dos tranques para el Gobierno de Puerto Rico, de los cuales el mas grande tiene 115 piés de alto por 1,200 piés de largo, dimos por ejemplo un ancho de 42 pulgadas a la base de cada estribo o contrafuerte, pero estendiéndolos 138 piés hácia aguas arriba i abajo del tranque. Una via de agua que penetra en la fundacion justamente bajo el tabique frontal i en el medio del ancho del contrafuerte, puede escapar lateralmente recorriendo una distancia de 21 pulgadas, en lugar de verse obligada a atravesar cerca del ancho total de la base, como sucede en un tranque macizo en donde encuentra cerrada su salida por el valor máximo de las presiones en el pié del tranque. En una palabra, si la base de un tranque es un punto peligroso, el remedio radical es *suprimir la base* en el sentido en que he dejado esplicada la cuestion.

Lo anterior vale tambien para las junturas existentes dentro del cuerpo mismo del tranque. Una juntura defectuosa en un tranque macizo atraviesa el espesor total B C de la seccion trasversal. La misma juntura en un tranque hueco atraviesa solamente la cortina frontal cuyo espesor A es una fraccion insignificante del espesor total. I aun mas, en los casos en que tal filtracion ocurra, es visible instantáneamente. I si existe, no es sólo absolutamente inofensiva sino que avisa inmediatamente su existencia ante la inspeccion mas descuidada i puede ser tapada con rapidez. Por consiguiente de un solo golpe esta nueva concepcion de los tranques elimina las fuer-


Base de un tranque hueco
Base de un tranque macizo
Fig. 1
A
B
C
Fig. 2
Centro de la base
Fig. 3
Fig. 3.- Presiones casi uniformes en la base de un tranque hueco.
Figs. 4 i 5.- Desigual reparticion de las presiones en la base de un tranque macizo i sus consecuencias.
Fig. 4
Fig. 5

zas solicitantes en el *interior i bajo el tranque*, las que son imposibles de determinar en un tranque macizo i que una vez que existen es imposible el destruirlas.

El señor Freeman ha dicho que:

«En cuanto a la penetracion de la presion del agua dentro del cuerpo del tranque, él ha pasado diez años buscando un tranque absolutamente impermeable i no ha encontrado ninguno.» «En cambio ha encontrado muchas pruebas de la penetracion del agua a traves del tranque. Debe, por consiguiente, preverse siempre la existencia de filtraciones i el consiguiente desarrollo de subpresiones, particularmente en los planos de juntura del trabajo de un dia con el del siguiente.»

Me seria mui grato mostrar a este distinguido injeniero i a cualquier otro profesional no solamente uno sino cincuenta tranques, con toda clase de cargas, que son absolutamente estancos i en todo caso el área afectada por una filtracion en la cortina es siempre tan pequeña que es enteramente despreciable en sus efectos respecto a la estabilidad.

Con nuestra concepcion hemos añadido una fuerza resistente de que carecen en absoluto los tranques macizos i es la componente vertical de la presion de agua que actúa haciendo presion sobre el tranque hácia abajo, comprimiéndolo contra la fundacion, miéntras que con el tranque macizo la presion del agua trata por entero de despazarlo o darlo vuelta.

Hai naturalmente muchos casos en que un tranque debe construirse sobre terrenos de naturaleza porosa como cascajo, pizarras, piedras calcáreas i algunas piedras areniscas i aun sobre arena. La esperiencia que nos ha dado la construccion de cuarenta tranques en terrenos de fundacion inseguros nos ha enseñado mucho. Sobre fundaciones de cascajo, arcilla o arena, incapaces de soportar el peso del tranque i su sobrecarga, se hace necesario prever una fundacion artificial a manera de piso. Entónces adoptamos la solucion de practicar hoyos a intervalos pequeños, que aseguren contra la subpresion. En ciertas clases de roca suficientemente firmes para soportar el peso, pero que son penetrables a las filtraciones, la precaucion elemental es descender uno o dos tabiques estancos hasta llegar a la roca maciza i entónces asegurarse completamente barrenando un número suficiente de agujeros a una profundidad suficiente en la roca dentro del área hueca del tranque, para estraer así cualquiera presion interceptada del estanque, que de otra manera pudieran acumularse i solevantar las capas de la roca.

El problema se vuelve mui sencillo cuando se le trata con el criterio *preventivo* en vez del *curativo*, i ademas gozamos de la gran ventaja de quedar habilitados para inspeccionar cualquier superficie interior i conocer así exactamente los resultados que se han alcanzado.

***

2. *Rupturas verticales.*—El señor Freeman dice:

«El tranque Austin que se quebró por rupturas verticales espaciadas con bastante regularidad, demuestra que tranques rectos de concreto tienden a desarrollar

secciones de ruptura por contraccion separadas de 50 a 75 pies una de otra. Algunas de las superficies de las quebraduras de los estremos del tranque Austin se ve que se han desteñido, mostrando con eso que el agua ha filtrado a traves de las rupturas ántes de la catástrofe.»

En consecuencia pide que se prevea la contraccion con la adopcion de junturas de espansion.

Una vez mas nosotros hemos sido justificados a posteriori. En todos nuestros tranques de lonjitud considerable no solamente introducimos una sino un par de junturas de dilatacion en todos los estribos, a intervalos de 15 a 20 piés. En otras palabras, en lugar de esperar que el tranque se quiebre en trozos de largo reducido, le ejecutamos en pequeños trozos por prevencion. La utilidad de estas junturas de dilatacion ha sido probada con mucha frecuencia en los tranques construidos en las áridas rejiones del Este de los Estados Unidos. Un embalse destinado a la irrigacion por ejemplo, se encuentra vacío durante el invierno, i, por consiguiente, la cara esterior del tranque está sometida a la contraccion máxima, debido a que se encuentra espuesta al frio mas intenso. Tan pronto como el embalse se llena en el verano, comienzan las dilataciones, que se ven aumentadas por la bajada de las aguas en setiembre, que espone la misma cara a la accion directa de los rayos solares. En tales casos es elemental el proveer al tranque de un gran número de junturas de dilatacion.

*
* *

3. *Tensiones debidas a la temperatura.*—Estas tensiones nacen en el interior del tranque por las variaciones estremas de temperatura. El señor Freeman dice que tales tensiones deben producirse en los climas del Norte, en que la cara de aguas abajo del tranque llega a temperaturas cercanas a 0° miéntras el centro de la masa permanece a 50°.

El señor Stearns dice que en un tranque de grandes dimensiones de albañileria, su parte interna adquiere gradualmente el término medio de la temperatura del año i cambia despues mui poco durante el año. En el invierno las caras esteriores i en especial aquellas que estan espuestas al contacto del aire, se contraen tanto vertical como horizontalmente, i como el interior permanece a una temperatura casi constante, i no se contrae, las porciones esteriores deberán rasgarse o forzosamente deberán producirse en ellas tensiones que impiden, por consiguiente, que tales zonas de las secciones trasversales transmitan presiones a la fundacion. Recomienda enseguida al injeniero que al proyectar un tranque suponga que una capa esterior de varios piés de espesor en un tranque de gran espesor será enteramente inhábil para resistir las tensiones moleculares de compresion.

En este caso, por la tercera vez, prevenir es mejor que curar. Preferimos *no tener ningun macizo* sino construir el tranque en secciones con un espesor relativamente pequeño, de manera que las diferencias de temperatura entre el interior i el esterior

sean eliminadas en absoluto. Teóricamente el fierro del concreto armado contribuye a este equilibrio.

***

4. *Tensiones producidas por el hielo.*—El señor Freeman llama la atencion hácia las tensiones desconocidas pero de gran magnitud que se orijinan en un tranque a causa del hielo. Dice: No sabemos qué intensidad alcanzan tales presiones, pero podemos asegurar que son enormes i que un término medio de 10 a 25 toneladas por pié lineal de tranque no es raro encontrar en un tranque de las rejiones del norte. Igual cosa asevera el señor Stearns.

Esto es exacto respecto a la pared vertical de un tranque, pero desaparece enteramente cuando esta cara anterior consiste en una cortina inclinada a 45°, que es una concepcion tambien orijinal de nuestros tipos de tranques, la que recibió una hermosa sancion en un pequeño tranque construido no hace muchos años en New Hamphire. La parte principal del tranque tenia la pared inclinada comun a todos. Se hizo necesario construir en un estremo un parapeto para protejer la entrada a una cámara de llaves debajo del tranque. Este parapeto inadvertidamente se formó por medio de un pequeño contrafuerte vertical de concreto sólidamente anclado por alambres de acero al interior del tranque. Al primer invierno el hielo rasgó i empujó hácia adelante el parapeto, doblando los anclajes, miéntras que en el vertedero el hielo sólo resbaló sobre la pared inclinada.

***

5. *Presiones acumuladas en la base.*—El señor Freeman alude de un modo jeneral en su artículo a la acumulacion de las presiones en la seccion de aguas abajo en el pié de un tranque macizo. Esto es un inconveniente inherente a los proyectos de tranques macizos. Esta concentracion de las presiones no sólo tiene lugar en la parte mas débil del tranque sino que tiende a levantar la base delantera, facilitando así la entrada del agua en las rasgaduras que apénas comienzan, i en seguida hace algo peor impidiendo su salida en el pié del tranque, agravando así el problema de las subpresiones. Nuestra nueva concepcion de los tranques soluciona precisamente todo esto. Las presiones son uniformes casi en la totalidad del ancho de la base, con un pequeño exceso hácia el lado de aguas arriba. Nótese cómo esta nueva solucion evita todos los inconvenientes con una disminucion en el costo. En un tranque macizo, cualquiera que sea su costo o su volúmen, las presiones resultan siempre segun el diagrama triangular que parte con 0 en el pié de aguas arriba i concluye con el máximo en el de aguas abajo, el punto más débil. Es de preguntarse si puede haber duda entre un tranque qne descansa sólidamente sobre toda su base (fig. 3) cualquiera que sea el nivel del agua i otro que esté en contínuo balanceo de aguas arriba a aguas abajo (fig. 4), listo para llegar al resultado de la figura 5 en la solicitacion mas

desfavorable. La caida del tranque no solo puede venir de ruptura i rotacion, sino tambien de una combinacion de estas con el deslizamiento. La caida de 35 tranques macizos en el curso de 20 años en los Estados Unidos i en el Canadá demuestran claramente de qué parte está la razon.

***

6. *Vacio.*—El señor Stearns aconseja a los injenieros que tomen precauciones contra la formacion del vacio en los vertederos de los tranques. Es bien conocida ya la influencia que tiene este vacio en la produccion de vibraciones. Nosotros impedimos su formacion por medio de perforaciones practicadas cerca de la cresta del vertedero, que sirven de aspiradores de aire.

***

Conclusiones.—Los tranques de concreto armado debidamente calculados i ejecutados constituyen la construccion mas resistente que se conozca. Se ha dicho con razon que «pasan a formar parte de la jeolojia». Todo criterio justo dice que si el concreto armado se hubiese conocido cuando se comenzaba a aplicar la ciencia en la construccion de los tranques, no se habria construido un solo tranque macizo.

El señor Stearns dice puntualmente:

«Es una desgracia para la ciencia de la injeniería que hayan fracasado tantos tranques de albañilería».

Los profesionales son los culpables si perpetúan una mala práctica cuando poseen una buena, nada mas que porque aquélla tiene en su abono la antigüedad.