

«En el principio, y partiendo de esta consideracion, hube de fijarme en una construccion de piedra bruta, para la mampostería de la cubeta, y combinar en consonancia los elementos de la seccion; esta fué la causa por la que propuse una pendiente en el túnel de 0,00135. Posteriormente, tuve la idea de reformar dicha pendiente, disminuyéndola á fin de obtener una depresion general en la línea del Desagüe, y por este medio aumentar la caida disponible á las atarjeas de la ciudad de México. Dada la invariabilidad de los demas elementos que concurrían para hacer la reforma, no quedaba más, á mi modo de ver, que modificar la superficie áspera del paramento de la cubeta formado de mampostería ordinaria; al efecto, habia que hacer uso de la piedra labrada de un costo excesivo que casi habria hecho duplicar el presupuesto, ó bien de la piedra artificial ó del ladrillo. Ya he indicado que este último me ha parecido poco resistente, para resistir la accion del agua en movimiento, con la velocidad média de 2^m,24; agregaré que la piedra artificial tiene bajo este respecto ventajas incontestables. Una experiencia bastante sencilla hará ver con evidencia que la piedra artificial resistirá incomparablemente más que el ladrillo la accion del frotamiento, y consiste en frotar en seco ó con agua un ladrillo con una piedra artificial. Esta experiencia es para mí concluyente, y de ella infiero que si se juzga que el ladrillo puede resistir, la piedra artificial resistirá mucho más y que es de preferirse. En cuanto á mí, juzgo que el ladrillo no podrá resistir, á ménos de mejorar su calidad, empleando otro material y reconociéndolo más, es decir, recargando su costo con el transporte de la tierra, probablemente de una gran distancia, y el aumento de combustible y tiempo de la calcinacion.

«En cuanto á las claves de piedra que el Sr. Derote juzga inconvenientes, las he considerado útiles, pues forzándolas en su colocacion con las debidas precauciones, creo que se independe mucho el sostenimiento de la bóveda del endurecimiento del mortero en la region de la clave, y que así se consigue minorar la depresion de la bóveda al descimbrar, á la vez que esta operacion puede apresurarse, y el ahorro de tiempo compensa, á mi modo de ver, con gran ventaja, un ligero aumento que pudiera haber en el costo de la clave. No hay homogeneidad en la construccion, es cierto, pero yo solo veria inconveniente en ello si la clave fuera de un material ménos resistente que el ladrillo.»

Para puntualizar más lo que sobre este asunto tengo que agregar, me es preciso copiar textualmente algunos de los párrafos relativos del informe del Sr. Derote, en que dice:

«A la verdad, si se construyera la cuneta (y por esta palabra se designa aquí el conjunto de los piés derechos y del radier inferior), con piedras artificiales en todo el espesor de la mampostería, teniendo cuidado evidentemente de dar á estas piedras la forma de dovelas, de tal modo, que la cuneta así construida, formase una bóveda continua que resistiera en todos sentidos á la pre-

sion de las tierras y de las aguas del subsuelo, á la verdad, digo, en ese caso no encontraria nada que reprochar á ese sistema, si no es su costo excesivo; pero lo que es enteramente inadmisibile, á mis ojos, es construir un anillo delgado y continuo de mampostería, sin tomar la precaucion habitual de disponer esa mampostería de modo que forme verdaderamente bóveda en todos sentidos.»

«Un anillo de mampostería debe ser el equivalente de un anillo de metal que se introdujese en el terreno. El debe resistir á las presiones provenientes de todos lados á la vez. Las razones que hacen mampostear con embovedado la parte superior, existen para que se mamposteen del mismo modo las partes laterales y la inferior.»

«En el caso particular que nos ocupa, propongo que se construya enteramente de ladrillo el anillo de forma circular de que ántes hablamos. Así lo indica la figura 2 del croquis número 2.»

No puedo conformarme con ninguna de estas aseveraciones, y para contestarlas me parece necesario precisar bien los conceptos y, hasta donde es posible, valorizarlos numéricamente, pues de otra modo la alusion misma á un anillo de metal que hace el Sr. Derote, para encarecer la bondad de su revestimiento de ladrillo, seria objetable en este sentido: que el anillo debería calcularse de la misma manera que si fuese de mampostería ó ladrillo, porque si el espesor de sus paredes no corresponde á la presion que tiene que soportar se rompería, á pesar de ser de fierro. Sin necesidad de hacer esa comparacion, el Sr. Derote debió demostrar con el cálculo que el revestimiento de mampostería del proyecto aprobado no resiste, y que era necesario el de ladrillo, que él propone. En cuanto á mí, digo que la construccion de ladrillo resiste más de lo que se necesita, como muro de revestimiento; pero considerando que además de ser un revestimiento tiene que resistir á una fuerte corrosion de parte del agua, dicho revestimiento no satisface absolutamente, porque se necesitan dos resistencias combinadas y sobre todo la última. Respecto del revestimiento de piedra de la seccion aprobada, digo que sí posee esa combinacion de las dos resistencias.

Consideraré primero la pared de la cubeta como muro de revestimiento.

No es propiamente exacto el paralelo que establece el Sr. Derote entre la pared de la cubeta y la bóveda, es decir, que de ordinario las razones que hacen mampostear con embovedado la parte superior no son las mismas que hay para que se mamposteen del mismo modo las paredes laterales y la inferior, y precisamente en el caso particular que nos ocupa, hay menos paridad entre esas razones. Ellas dependen de la naturaleza de las presiones, y si éstas no son idénticas aquellas tampoco lo serán. Una prueba de ello es que en Tequixquiac se podría muy bien cambiar la forma de la cubeta; no hacerla ovoide ni semicircular, sino trapezoidal, construyendo entonces dos muros planos laterales, y otro para el radier, plano también ó en forma de un arco invertido muy rebajado. ¿Podría susbtituirse la bóveda

superior por una construcción que tuviera algo de semejante con ésta que admitiría en susbtitución la cubeta? Evidentemente no; la bóveda no podría ser reemplazada más que por otra bóveda, más ó ménos rebajada, sin pasar de ciertos límites, y cambiando en consecuencia, de espesor en la clave y arranques, para conservar en su interior la curva de las presiones que asegure su estabilidad. De todo esto se infiere que entre las dos construcciones hay diferencias profundas, las que tienden á desaparecer en los terrenos de una fluidez marcada; pero que por el contrario se acentúan más, mientras más lejos está esa fluidez como se verifica en Tequixquiac. Esas diferencias se explican muy bien cuando se examina la cuestion bajo un criterio más técnico.

En una bóveda hay que considerar, además del peso propio, el de una sobrecarga, consistente en una masa de material más ó ménos considerable; estos pesos dependiendo de la gravedad ejercen una presión invariablemente vertical. La bóveda no tiene más de dos puntos de apoyo que son sus juntas de arranque. Segun que se considere la carga en su totalidad ó se subdivida, para darse cuenta de la curva de las presiones que produce en el interior de la bóveda, hay que determinar los centros de gravedad y por su medio los brazos de palanca; con ellos calcular los momentos del peso de la masa total y sus fracciones, para referir esos pesos á los arranques de la bóveda que, como he dicho, son sus puntos de apoyo. Mi objeto al recordar estos preliminares del cálculo de una bóveda, ha sido desprender este hecho: *que en una bóveda los pesos no entran en el cálculo con su valor sencillo sino con el de sus momentos.*

En un revestimiento cilíndrico, como es el de la cubeta del túnel, y muy particularmente en un terreno indeformable como el de Tequixquiac, las cosas pasan de otra manera muy distinta. Desde luego desaparece el peso del revestimiento ó más bien entra con signo negativo en el conjunto de las presiones que se ejercen sobre las construcciones; pero el signo negativo á que me refiero indica una disminucion del empuje del terreno, en caso de que exista. Despues viene la manera de obrar de dicho empuje, y es la de determinar en cada punto de la superficie convexa una presión dirigida segun la normal á dicha superficie.

En las circunstancias indicadas, las presiones se transmiten circulando por el interior del revestimiento, y la resistencia interior de todos los puntos entra directamente en acción contra la fuerza exterior. *Son, pues, los valores sencillos de las presiones los que obran y no ya sus momentos como en las bóvedas;* y esto es lo que me proponia hacer notar: por lo demás, para que esto se verifique basta que el revestimiento sea curvo; que esté construido de mampostería comun con juntas irregulares y numerosas, ó bien de dovelas de piedra más ó ménos resistentes, ó por fin esté constituido por una pared continua y uniforme de metal, no importa, con tal que la pared

sea curva. Todas las diferencias de constitucion en la pared implican una sola en el espesor que se determina por el cálculo; es lo que se hace en la práctica corriente.

Despues de haber hecho notar la manera como obran las fuerzas en la bóveda y en el revestimiento de la cubeta, fácil es comprender las diferencias que hay en la manera de resistir de una y otra construcción, y venir en conocimiento de la menor importancia que tiene la cubeta como muro de revestimiento, á pesar de lo que dice en contrario el Sr. Derote. Entre una y otra hay la misma diferencia que entre dos barras sujetas á un cierto esfuerzo: aplicado transversalmente en una de ellas, y longitudinalmente (segun el sentido de las fibras) en la otra, determinando en la primera una flexion; y en la segunda, una compresion; teniendo que resistir la primera como una trabe que descansa por sus dos extremos en dos puntos fijos, y la segunda, como una columna ó pilar. En esta comparacion, que indudablemente representa con verdad el papel de la bóveda y la cubeta en el conjunto de la construcción, se ve con toda claridad cuán diferentes son las circunstancias y el género de resistencias á que se encuentran sujetas, y cuánto dista de representar la cubeta, en ese mismo conjunto, un papel no ya igual, pero ni siquiera comparable con el de la bóveda.

Despues de esta disertacion, queda por averiguar si no obstante todo el revestimiento de cubeta que se está ejecutando tiene la resistencia bastante.

Esto será asunto del cálculo siguiente, para determinar el espesor que deberá tener. La fórmula de que hago uso la tomo de la obra titulada «Explo-tacion de Minas, de Haton de la Goupillère,» y es la siguiente:

$$E = \frac{QD}{2R-Q}$$

en la que las letras tienen la siguiente significación:

- E, espesor del revestimiento.
- D, diámetro interior horizontal de la cubeta.
- Q, presión exterior del terreno por unidad de superficie.
- R, coeficiente de fatiga de la mampostería.

He indicado varias veces que la presión del terreno en la cubeta es nula, pues que en las numerosas excavaciones abiertas para hacerla, no ha sido necesaria ninguna intervención del ademe; pero como se necesita asignar algún valor á Q, para poder estimar la importancia del revestimiento, y los méritos comparativos de cada uno, según su clase, supondré á Q una presión equivalente al peso de una columna de mampostería de ladrillo de 6 metros de alto, igual próximamente al empuje resultante de la bóveda superior, y que equivale á un kilogramo por centímetro cuadrado.

En cuanto á los valores de R, son: $\frac{1}{8}$ de 272 kilogramos, por centímetro

cuadrado, para la piedra natural; $\frac{1}{8}$ de 120 kilogramos idem idem, para la piedra artificial; y $\frac{1}{8}$ de 80 kilogramos por centímetro cuadrado, presión que debe resistir el ladrillo que se use.

Calculando con estos valores la referida fórmula, encuentro los espesores siguientes:

$E = 0^m,102$ para el revestimiento de piedra artificial.

$E = 0^m,170$ para el idem de ladrillo.

$E = 0^m,046$ para el idem de piedra comun.

Pero los espesores del revestimiento que se está construyendo, son: $0^m,15$ en la piedra artificial, que siendo mayor que $0^m,102$, reúne entónces por sí solo $1\frac{47}{100}$ más resistencia de la que se necesita. El anillo interior de piedra á su vez necesita para resistir por sí solo $0^m,046$ de espesor, según el cálculo; pero se le dan $0^m,35$, es decir, que se aumenta á $7\frac{61}{100}$ veces la capacidad de resistencia que requeriría para que subsistiera por sí solo. Si éste se combina con el anillo de piedra artificial, resulta entónces que el revestimiento de cubeta en la seccion aprobada, tiene diez veces la resistencia que bastaría; ésta, á su vez, está ya asegurada en el cálculo con el coeficiente de seguridad de $\frac{1}{6}$; el revestimiento queda asegurado definitivamente con un coeficiente de seguridad de $\frac{1}{80}$.

En el revestimiento del Sr. Derote hay 4 anillos de ladrillo de $0^m,10$ de espesor cada uno; el conjunto del revestimiento aumenta por razon de las juntas de los anillos, á $0^m,43$; pero ninguno de ellos reúne por sí solo el espesor de $0^m,17$ que requiere el cálculo, y entónces hago notar que diferentemente de lo que pasa con el revestimiento que se ejecuta, en que cada uno de los anillos basta por sí solo y con exceso, en el del Sr. Derote no basta uno para resistir por sí solo, sino que se necesita el conjunto. Ya reunidos los cuatro anillos, sí representan $2\frac{33}{100}$ el valor de la resistencia necesaria; pero con todo y esto siempre resulta ser menor de 10, que es lo que representa el conjunto del revestimiento de piedra. Por último, el coeficiente de seguridad definitivo del revestimiento de ladrillo sería $\frac{1}{16}$; el de piedra $\frac{1}{80}$; éste queda, en consecuencia, cuatro veces más asegurado que aquel, y esto es lo que me proponía demostrar, para hacer patente que el revestimiento de piedra que se está construyendo está más asegurado que el de ladrillo, que para reemplazarlo propone el Sr. Derote, á pesar de haber asentado en su informe que aquel es absolutamente inadmisibile á sus ojos.

A los resultados que dejo asentados, podria objetarse que sólo se refieren (en lo que respecta al anillo de mampostería comun) á los arcos laterales, porque en el inferior no tiene la mampostería $0^m,35$, sino solamente $0^m,15$. Si se fuere á calcular parcialmente el arco inferior, se tendria $0^m,026$ para el espesor de esa mampostería, porque el radio ha disminuido á la mitad próximamente. Como el anillo tiene $0^m,15$ y no $0^m,026$, es por tanto $5\frac{77}{100}$ más

resistente de lo que se necesita. A su vez los $0^m,15$ de piedra artificial resistirán tambien por razon de menor radio, no ya $1\frac{47}{100}$ sino $2\frac{54}{100}$, la combinacion de los dos anillos representaria entónces $8\frac{31}{100}$ más resistencia de la necesaria. Esto, no obstante, es de lo más sencillo hacer uniforme en toda la extensión de la cubeta el espesor de la mampostería comun. No creo necesaria esta correccion, pero tampoco la repugno. Pero el Sr. Derote parece que el mal lo hacia derivar de la parte del frotamiento, porque: «se podria reprochar, dice, al tipo actualmente aprobado, disminuir el espesor, precisamente en la parte más expuesta á usarse y á destruirse por el frotamiento de las piedras y arenas que arrastran las aguas.»

Bajo este otro aspecto, el reproche deja de tener la misma fuerza. Efectivamente, es el paramento de piedra artificial el que queda expuesto á ese frotamiento, y ciertamente que éste no se ha disminuido en parte alguna; tanto inferior como lateralmente tiene $0^m,15$ de espesor.

El revestimiento de ladrillo del Sr. Derote, resistirá el empuje del terreno; pero no sucede lo mismo con el frotamiento del agua. En este particular, las proposiciones del Sr. Derote las considero no solamente objetables sino inadmisibles de todo punto; esta es, á mi modo de ver, la parte esencialmente vulnerable de todo su trabajo; y esto es tan evidente que tendré ya poco que agregar á lo que dije en mi contestacion, que dejo copiada ántes, relativa á la superioridad incontestable que tiene la piedra artificial sobre el ladrillo, bajo el punto de vista del frotamiento. Como el Sr. Derote parece haber sido herido por la evidencia de esa superioridad, que es tan fácil de hacer manifiesta de un modo experimental, supuesto que indirectamente la ha contestado diciendo: que en la construcción de la cubeta *no se empleen más que ladrillos de buena calidad, comprimiéndolos al fabricarlos, si necesario fuere, para obtenerla;* y que aconseja para el interior del túnel y sobre todo su contorno, un barnizado de fuerte mortero de cemento de 0,025 á 0,030 de espesor, debo decir sobre esto que no considero que tales medios sean bastantes para que yo minore en algo la objecion que antes he formulado y que hoy reitero, porque además esos medios los juzgo contradictorios, segun paso á demostrarlo.

En primer lugar, ese barnizado de cemento, independientemente de sus cualidades intrínsecas de que despues hablaré, es una operacion laboriosa de hacer, y delicada, porque requiere hombres, por supuesto, de habilidades especiales, y más que todo, de conciencia. Y cuando se aglomera tal número de circunstancias en una operacion que se debe extender á una longitud de 8 kilómetros, se concibe que el éxito de ella queda por demás expuesto en manos de hombres que no reportan una responsabilidad efectiva. No puede contarse con la vigilancia, pues por mucha voluntad que se tenga en ella es necesario recordar que la operacion se va á hacer en un medio incómodo, alumbrado artificialmente y estorbado por filtraciones naturales más ó mé-