

Documento número 9.

Informe del Sr. Ingeniero Espinosa sobre las reformas propuestas por D. Leon Derote.

I.

He recibido la comunicacion de esa Secretaría, fecha 10 del actual, en que por acuerdo de la H. Junta se sirve trascribirme la que en 21 de Abril anterior le dirigió la Secretaría de Fomento, relativa á las variaciones que el ingeniero belga Sr. Leon Derote ha propuesto respecto del túnel, y las cuales se refieren: primero, á adoptar en su prosecucion la forma enteramente circular; y segundo, á emplear en el revestimiento puramente ladrillo, con un barnizado de cemento en todo su contorno interior.

Teniendo á la vista el informe del Sr. Derote, en que propone el cambio de que voy á ocuparme, así como la contestacion que la Secretaría de Fomento dió á la consulta que con el propio motivo le dirigiera esa H. Junta, voy á permitirme, por creerlo de mi deber, hacer detenidas observaciones al informe del Sr. Derote, sólo en cuanto á las modificaciones referidas, tanto por ser yo el autor de la seccion aprobada en 1879, y es la que trata de variarse, como porque ese cambio, en el caso de que se verificara, introduciría á mi modo de ver en el túnel inconvenientes muy trascendentales.

Comienza el Sr. Derote por observar la forma de la bóveda que se está construyendo, por razon de ser no un medio punto, sino un arco de $147^{\circ} 28'$. La observacion está formulada así:

«Por lo que toca á la forma de la seccion, es sin razon, á mi juicio, que se ha adoptado una bóveda en arco de círculo con quiebra (*jarret*) en sus arranques para la parte superior del túnel.»

En nota separada, el Sr. Derote habia hecho esta observacion, y contestándola, le hice notar que la causa porque se ejecuta esta bóveda en lugar de un medio punto, que tuviera por diámetro la cuerda de aquella, es porque se realiza una economía de 2049160 ladrillos efectivos; es decir, que habia que computar además los que se rompen en la fabricacion y transporte, lo cual debia tomarse en consideracion, si con la mencionada bóveda (que es un arco de círculo de $147^{\circ} 28'$) se obtenia, como en efecto se obtiene, la área libre necesaria para el paso de los cuerpos flotantes (segmento de círculo de $1^{\text{m}},47$ de flecha por $3^{\text{m}},925$ de cuerda), y todo esto sin perjuicio de la estabilidad de la bóveda.

El Sr. Derote, tomando acaso en consideracion estas explicaciones, le dió

otro giro al asunto y propone ahora simplemente prolongar la bóveda para convertirla en un medio punto, cuyo diámetro no será ya $3^{\text{m}},925$, sino $4^{\text{m}},017$, y esto lo conduce á convertir la seccion del túnel en un círculo perfecto. Son de notarse las consideraciones en que se funda para ello.

Asienta que á igualdad de abertura libre entre los dos arranques de una bóveda, se tiene que dar mayor espesor á los estribos que la sostienen, cuanto mayor sea el rebaje de dicha bóveda; pero como en los túneles no hay estribos, propiamente dichos, el Sr. Derote emplea este equivalente: á igualdad de abertura, el empuje de una bóveda es menor cuando el intrados es un medio punto, y que en los túneles donde se cuenta sólo con la resistencia que el terreno vírgen detrás de los piés derechos oponga al empuje de una bóveda, es conveniente para que ésta sea estable, reducir ese empuje en lo posible, sobre todo en los terrenos compresibles, é infiere de esto la necesidad de que la bóveda sea un medio punto. Agrega que en el caso del túnel de Tequixquiac, el defecto que supone en la bóveda es fácil de corregir, sencillamente con prolongarla en ambos extremos hasta llegar al medio punto. Efectivamente así lo verifica; pero al hacer la aplicacion de sus abstracciones, el Sr. Derote olvidó una condicion esencial establecida por él mismo, puesto que la bóveda que propone para reemplazar la que se está construyendo, no tiene la misma abertura libre que ésta, sino otra mayor, y de aquí que el correctivo que se imaginara produce un resultado contrario y origina un mal cuya trascendencia no debe dejarse pasar desapercibida. Procederé por partes.

Asienta el Sr. Derote que solamente con haber prolongado la bóveda actual hasta convertirla en medio punto, ha disminuido el empuje de ella sobre el terreno; pero seria suponer que el todo es menor que la parte. Si el Sr. Derote tomara por diámetro para su bóveda la cuerda de la bóveda actual, habria estado en lo justo; pero habiendo procedido como lo hace, la bóveda que se construye no es más que una parte de la que él propone, y por solo este hecho, el empuje de su bóveda no puede haberse reducido sino que ha aumentado.

Para demostrarlo, y aunque esto parezca innecesario, adjunto dos dibujos: en el número 1, he representado con *a, b, c, d*, la semi-bóveda del medio punto que propone el Sr. Derote, y con *b, e, f*, la línea contorno del cielo de una excavacion, que se sostendría naturalmente, de manera que dicha línea seria la de equilibrio, y todo el terreno comprendido entre ella y el contorno de la bóveda, supuesto del mismo peso específico que la mampostería de la bóveda representaría la sobrecarga.

El dibujo número 2 representa, mediante las mismas convenciones que el anterior, la semibóveda que se está construyendo con su sobrecarga.

Para estudiar la estabilidad de estas bóvedas, he construido por el método del Dr. Scheffler, fundado en una construccion gráfica aproximativa, la

curva de las presiones con el *mínimum* de empuje en la clave y en la hipótesis de la incompresibilidad de las dovelas, y para que esto fuera admisible en la práctica, he deducido del espesor de la bóveda dos zonas, una superior y la otra inferior, próximamente cada una de una cuarta parte del espesor de la bóveda, por medio de los contornos virtuales que están indicados con líneas puntuadas; las curvas están designadas por *m*, *n*, *p*, para la del medio punto en la figura 1, y por las mismas letras en la figura 2, para el arco de $147^{\circ} 28'$. Del cálculo de los elementos y construcción con éstos de dichas curvas, se obtiene la situación e intensidad de la presión resultante de la bóveda sobre el terreno en ambos casos, y está representada en la bóveda de medio punto, propuesta por el Sr. Derote, por el peso de una columna de mampostería de la misma naturaleza que la de la bóveda en construcción de $5^m,96$ de altura, con la dirección indicada en la figura 1, y en el caso de la bóveda que se construye actualmente, dicha columna tiene $5^m,57$, con la dirección que igualmente indica la figura respectiva.

Aunque la diferencia entre estos dos números sea corta y tenga muy poca ó ninguna significación, bajo el punto de vista de la compresibilidad del terreno, viene, sin embargo, á demostrar que el medio punto propuesto por el Sr. Derote, en lugar de disminuir el empuje sobre el terreno, lo aumenta, y que por este concepto me parece que la modificación no procede.

La consecuencia práctica que de aquí se infiere, es que si la bóveda que se está construyendo, y que á juicio del Sr. Derote sería imprudente proseguir, porque está expuesta á que se produzcan en ella fisuras, á consecuencia de la considerable presión que ejerce sobre el terreno que supone de una resistencia inferior al empuje de la bóveda, la que él propone estaría en peores circunstancias, toda vez que, como dejó demostrado, no ha hecho más que aumentar dicho empuje.

Este resultado, y la manera violenta por la que pasó de la sección aprobada á la de un círculo, no acusan que todo fuera el resultado de un estudio detenido, sino el propósito previo por parte del Sr. Derote, de implantar en el túnel de Tequixquiac la sección circular que, en el estado actual de los trabajos, no hace más que introducir una imperfección en la obra. Es indudable que en terrenos distintos que el de Tequixquiac, la forma de sección que se ejecuta tiene sus inconvenientes, y es á ellos á los que alude el Sr. Derote probablemente. En cambio, es de extrañarse que desconociere, ó por lo menos no hiciera mérito alguno de las ventajas que dicha sección proporciona, y el hecho de que hubiese sido calculada con los datos de la localidad y con sujeción á las necesidades que tiene que satisfacer. En lo que sigue he procurado, cuando ménos, dar la demostración de todo esto, pero tengo ántes que hacer notar un defecto de estabilidad en la bóveda que propone el Sr. Derote, y que por sí solo la hace inadmisibles, si no es que se enmiende.

Este señor ha incurrido en un error trascendental, prolongando simple-

mente la bóveda sin cuidarse del espesor. Tan ha sido indiferente á este respecto, que el ladrillo de $0^m,11$ de ancho, que se fabrica hoy, lo ha disminuido ó consentido llanamente en que se disminuya á $0^m,10$, siendo el resultado de esto que se reduzca en la cantidad de $0^m,04$ en el espesor que tendría su bóveda, si fuera á ser construida con los ladrillos actuales; pero esta diferencia solo puede significar que no sospechó el peligro á que estaba expuesta su bóveda por defecto de espesor, pues de otro modo habría procedido en contrario respecto de las dimensiones del ladrillo.

En la figura número 1, que representa la bóveda del Sr. Derote, he indicado con la línea *p*, *q*, la situación que correspondería á la junta de arranque de la bóveda actual, si ésta no hubiese sido prolongada hasta modificarla en medio punto, en cuyo caso esa junta sería su base fija é invariable, y se ve que hasta allí la curva de las presiones de que antes he hecho referencia, está perfectamente dentro de los contornos virtuales de la bóveda, que son los límites prácticos en que se funda la suposición de la incompresibilidad de las dovelas, y que por tanto, la estabilidad queda enteramente asegurada; pero esa misma línea de las presiones en la prolongación del Sr. Derote, hasta llegar á su base fija *b*, *c*, se sale enteramente al extrados de dicho contorno virtual, y por esto deja ya de tener las seguridades de estabilidad práctica que posee la bóveda actual.

Esta curva llega al punto *p*, que es el contorno material de la construcción, y con esto no se consigue más que una estabilidad teórica que no llena de ningún modo las condiciones del caso actual. Si el material de la bóveda fuera absolutamente resistente é incomprensible, pudiera admitirse una estabilidad relativa; pero no siéndolo el ladrillo, dicha estabilidad queda formalmente comprometida: de manera, que la bóveda propuesta por el Sr. Derote necesita corregirse, en caso de aceptarla, ya no sólo por un dictado de la prudencia, sino porque con el espesor que le ha dejado tiene todas las probabilidades de dislocarse.

He demostrado lo erróneo del procedimiento en que descansa absolutamente el cambio de forma de sección, en lo que se refiere al empuje de la bóveda; es decir, que el Sr. Derote no ha hecho más de agravar el mal que pretendiera corregir.

Voy ahora á ocuparme de una hipótesis también inexacta que, en concurso con lo anterior, estableció para hacer ese mismo cambio.

La hipótesis fué suponer que el terreno en que se está abriendo el túnel es de tal manera compresible, que no puede resistir al empuje de la bóveda que se está construyendo.

Semejante suposición, solamente ha podido hacerla el Sr. Derote, desentendiéndose de los datos locales, tan precisos ya que el problema de Tequixquiac presenta.

La formación, geológicamente hablando, en que se está abriendo el tú-

nel, es la toba pomosa ó tepetate tan conocida ya, pues que en el Valle es la única de que puede disponerse para cimentar naturalmente una construcción de importancia. Alternando con la toba, concurren las margas en la formación del túnel, que á su vez tienen una consistencia comparable á la de la toba, si se ha cuidado de preservarla de una exposición prolongada al aire, pues éste ejerce una acción desagregante sobre ellas; pero si esa exposición se ha evitado, entonces, repito, que la consistencia es comparable á la del tepetate.

De que estas formaciones resisten por sí solas pesos ó empujes de mucha consideración se tienen abundantes ejemplos. Muchos edificios y principalmente templos, que por su elevación representan un peso considerable, descansan sobre estas formaciones en distintos puntos del Valle, entre ellos Zumpango y sus inmediaciones, sin que haya sido necesario reforzar el suelo, conservándose esas construcciones en perfecto estado. Localizando más la observación, puedo citar como construcciones mucho más inmediatas al túnel las chimeneas de hornos de ladrillo que tienen más de 14 metros de alto, y el horno continuo de cal, de 13 metros y de un peso respetable, que sustenta la formación á que me refiero, sin haberse notado hasta ahora ninguna deformación ó cuarteadura en ellos; todo lo cual viene demostrando que el terreno puede recargarse sin temor alguno, con una columna de mampostería de 14 metros á 20 y aun más metros.

¿Cuál es la presión que tiene la bóveda sobre el terreno? Ya lo he manifestado al hablar de mis dibujos: representa el peso de columna de mampostería de ladrillo de cerca de 6 metros de altura (de otra manera valuada dicha presión representa una carga de un kilogramo por centímetro cuadrado) que, como se ve, es una fracción pequeña del peso que corresponde á las construcciones que acabo de citar.

Pero lo que, sobre todo, viene en comprobación de la suficiente resistencia del terreno, es la operación trescientas veces repetida ya cuando menos, de aislar tramos de bóveda en lo general de 3 metros de longitud, desprendiéndolos lo necesario en sus cimientos para poder construir inferior y ulteriormente el tramo de cubeta que le corresponde, procediendo así según el sistema belga de ejecución que se sigue.

Esta operación muy delicada y difícil de hacer, cuando el terreno tiene alguna tendencia á deformarse bajo la presión superior, se comenzó á ejecutar en los primeros tramos con todo género de precauciones; pero la experiencia que hoy se tiene permite ya atacar con franqueza esta operación, siendo todo el resultado de la seguridad adquirida de que el terreno ofrece por su resistencia un punto de apoyo firme é inmutable. Cualquiera deficiencia del terreno habría dado lugar en la construcción de cualquiera de estos ya numerosos tramos á alguna deformación ó cuarteadura en la bóveda construida previamente, pero este caso no se ha presentado. Es de notarse,

y llamo sobre ello la atención, que no se necesita ningún ademe auxiliar para ejecutar la cubeta; lo cual habla bastante en pro de la consistencia del terreno, y digo que es de notarse, porque lo común en ese sistema de ejecución es recibir con un ademe la bóveda á medida que se abre la excavación para construir la cubeta.

He creído deber hacer estas referencias para tranquilizar á esa H. Junta, acerca de la pretendida compresibilidad que admite el Sr. Derote como base de su variación, y para demostrar que la palabra imprudente empleada por él, como única prueba de sus aseveraciones, no tiene fundamento alguno, si no es suponiendo carencia completa de los datos locales que ofrece la cuestión.

II.

He examinado la reforma atendiendo á la estabilidad de la bóveda; tendré que ocuparme aún de ella por lo que respecta á la cubeta; pero principalmente este párrafo tiene por objeto ver si la forma circular es la más racional tratándose de un conducto hidráulico que funciona como canal cubierto.

Pude observar que el Sr. Derote trabajó su informe bajo las impresiones que le produjera la lectura del informe, de los trabajos del acueducto de Croton para abastecer de agua la ciudad de Nueva York, correspondiente al año de 1887; y viendo que la sección que consulta, es, puede decirse, una calca de una de las que constan en dicho informe, pues hay identidad aun en detalles de construcción, como son el número de hiladas de ladrillos, colocación de estos, rellenos de mampostería, etc., infero que el Sr. Derote ha encontrado conveniente aplicar esa sección circular en Tequixquiac, á pesar de sus inconvenientes, y sin examinar bastante si son análogas las circunstancias para que esta aplicación pudiera ser justificada.

Por poco que se examine el informe se observa luego que falta esa analogía de circunstancias. En efecto, el acueducto está dividido en dos tramos, uno que funciona de la misma manera que el túnel de Tequixquiac, es decir, como un canal cubierto, y otro que se hunde en el terreno y funciona como sifón.

En el primero la sección adoptada es la que se llama allí de herradura, siendo su cubeta un trapecio terminado por arcos de círculo, en sustitución de los lados rectos, lo mismo que lo que se hizo para la cubeta del túnel de Tequixquiac, cuando consulté la sección aprobada en 1879, y sólo la parte del acueducto que funciona como sifón tiene sección circular idéntica á la que propone el Sr. Derote.

Yo me permito llamar la atención de la H. Junta Directiva sobre este hecho, y es, que los ingenieros de Nueva York no han hecho uso de la