

NUEVO TIPO DE PUENTE SUSPENDIDO

(Artículo escrito en el año 1902)

Con motivo de la construcción de un acueducto suspendido de 84 m. de largo para el canal de la Rinconada de Lo Espejo, sobre el río Mapocho en la proximidad de Maipú, un distinguido ingeniero, ex-profesor del ramo en la Universidad del Estado, se espresó diciendo que «vería construida una canoa suspendida pero no vería correr el agua por ella.»

Pero no ha acontecido así i el acueducto está construido i el agua corriendo desde mas de dos años (1).

Es curioso observar, para comprender lo poco fundado de aquel vaticinio, que el caso de un acueducto es el tipo ideal de un puente suspendido porque presenta el tipo ideal de una carga uniformemente repartida en que se funda la teoría matemática de estos puentes.

Indudable es que una deformación cualquiera producida por una carga concentrada en un puente de esta naturaleza, destinado al escurrimiento de agua, debe ser fatal, porque una desnivelación en el plano del canal aumenta la concentración, produce la descarga de otras partes y tiene que traer como consecuencia un desquiciamiento de la obra para concluir por una ruptura no del puente sino de la canoa.

Y es esto lo que me aconteció en la canoa de Lo Espejo, hasta el momento en que pude colocar el plan en una inclinación determinada dando una mayor altura al centro igual a la flecha, para que al recibir toda la carga se obtuviera la inclinación indicada, i haciendo que el aumento de la carga se produjera lentamente.

En estas condiciones el servicio se hace correctamente i sin tropiezo alguno.

(1) Pronto a publicarse este artículo se ha producido el accidente de la ruptura de un cable de este acueducto, lo que ha traído la destrucción total de la obra. No se conocen bien las causas de esta ruptura, pero, según informaciones, el cable se ha cortado al centro en el punto en que la tensión es menor.

La tensión mínima es $p \times \frac{a^2}{2b}$ i la máxima $p \times \frac{a}{2b} \sqrt{4b^2 \times a^2}$ i siendo jeneralmente $b=0.16a$ se tiene: *tensión máxima un 5% superior a la tensión mínima*. En el acueducto del Mapocho la flecha del cable era como el décimo del claro i, por lo tanto, esta relación era mayor. ¿Por qué se cortó el cable donde la tensión era menor? Es esta una cuestión por dilucidar.

He reconocido los defectos capitales que tiene esta obra, provenientes unos de las condiciones en que se presenta, otros de la falta de esperiencia; la observacion de ellos como el estudio meditado de sus causas me han llevado a entrar en modificaciones al tipo usual de puentes suspendidos que ha sido implantado en el acueducto que se ha construido sobre el rio Claro para el canal de Cumpeo, 30 kilómetros al sur oriente de Molina, con el éxito que esperaba.

Como es sabido, para contrarrestar o reducir las deformaciones que sufren los puentes suspendidos por efecto de una gran concentracion de peso se ha recurrido al expediente de dar a la viga rijidez en cierta estension i a colocar tirantes directos del anclaje a puntos determinados de la viga pasando por los apoyos, tirantes que en frances llaman *haubans* i cuya traduccion mas castiza es *obenques*, nombre que se dá en náutica á los tirantes que fijos en algun palo soportan una mesa.

Estos obenques no resuelven totalmente la cuestion pero aminoran considerablemente los efectos.

Es curioso observar que la teoría no permite fijar las bases sobre las que debe fundarse el cálculo de resistencia de estos tirantes, por lo que se han propuesto sistemas diversos que no son por cierto razonables i que llevan a resultados distintos.

Influye considerablemente en este estudio el efecto de la dilatacion que produce estiramientos i acortamientos desiguales en el cable parabólico i en estos tirantes, siendo causa de alzas i bajas diferentes en la parte de la viga que está mantenida en suspension tanto por el cable como por los obenques.

Esta consideracion lleva a proponer como solucion racional el calcular las dimensiones de uno i otros como si sostuvieran aisladamente toda la carga, lo que aumenta la cantidad de metal empleado en la construccion.

La accion de los obenques en la conservacion de la forma teórica del puente, o sea para impedir su deformacion, se produce por dos causas.

Primeramente, por que mientras la carga obra en la parte del puente mantenida en suspension por los obenques no carga en el cable parabólico i, como tal, conserva la posicion teórica de éste, i despues, porque el peso obrando verticalmente i produciendo una tension en los obenques, produce tambien en la viga un esfuerzo horizontal considerable que a primera vista es soportado por el estribo correspondiente, como lo indica la figura 2.

Pero si se considera que este esfuerzo ántes que significar una presion en el estribo, significa un arrastre jeneral del tablero, es de evidencia convenir en que este esfuerzo será contrarrestado en parte por la accion de los obenques de la ribera opuesta. I si existe la union ríjida de la viga, producirá en la parte de ella una tension llamada a contrarrestar tambien el descenso del tablero solicitado por otra carga local situada en la parte central no cubierta por los obenques.

Pero esto sucede si la carga primeramente considerada obra sobre los obenques, que si lo es sobre el cable no existe en la viga ese esfuerzo horizontal.

He comprendido la ventaja que existe en que este esfuerzo se produzca constantemente en su máximo de valor, por lo que he llegado a desligar por completo del cable parabólico la parte cubierta por los obenques, de modo que en todo momento la viga

central esté sujeta a sufrir la tension producida, a lo ménos, por la accion horizontal de los obenques debida al peso muerto de la construccion.

Para el caso de una carga uniformemente repartida, como sucede en un acueducto, esta tension es dada por el total del peso vivo i muerto i como tal el máximo en todo momento, de modo que este sistema de puente suspendido aplicado a las canoas suspendidas ofrece casi una rapidez completa del sistema, como he podido comprobarlo en el acueducto que últimamente he construido sobre el rio Claro, en que he puesto a prueba este «nuevo tipo de puente suspendido.»

Esta espresion «casi una rijidez» es bastante exacta porque el problema que se presenta en un acueducto bajo el punto de vista de la carga es el mantener la rijidez para pequeñas diferencias de ella, porque nunca el agua de un canal se echa o se corta de un repente, siendo esta operacion paulatina por naturaleza.

* *

He sintetizado este nuevo tipo como «un puente colgante colocado entre dos muelles»: es esta un espresion que esplica claramente el sistema.

La modifica la idea de unir las vigas tendiendo a que los esfuerzos de presion de los muelles sobre los estribos se equilibren produciendo una tension en la viga del puente colgante.

Esta circunstancia hace que sea necesario pensar en adoptar el fierro para la viga, pero como en Chile seria costosa una construccion semejante, he reducido su aplicacion solo para resistir al esfuerzo máximo de tension producida por la carga máxima igualmente repartida en el puente, adoptando una viga continúa de forma I que en el comercio existen de secciones i largos considerables.

En una palabra la obra de fierro constituiria lo que llamaré la *cama* del puente, debiendo completarse las demas secciones de un puente suspendido con obra de madera o de madera i fierro combinados.

La conservacion delicada se reduciria en una construccion semejante a las piezas que constituyen la canoa, pues el resto podrá ser cambiado, cuando se quiera, sin dicha dificultad.

* *

En los puentes suspendidos es caso desfavorable una carga uniformemente repartida en la mitad del puente: produce las mayores deformaciones en el cable parabólico i, por lo tanto, en la viga del puente.

Una situacion semejante en el tipo que propongo seria altamente desfavorable porque produciria un descenso en la parte cargada que podria comprometer la estabilidad de los obenques: se reduce considerablemente estos efectos con los cables que en la figura 2 están señalados con las letras *AB* i *AC*.

Supuesto cargada la mitad de la parte suspendida, los cables *AB* i *AC* impedirian por de pronto el levantamiento del punto *A* del lado opuesto, porque para ello habria que

levantar el peso muerto de la mitad del puente, él que jeneralmente es superior a aquella carga; i los cables AC del lado cargado reducirian la deformacion del cable parabólico en esa parte porque trabajarian cuando el descenso llegara a cierto límite ayudando así a los obenques o convirtiéndose ellos mismos en tales.

Ayudadas estas disposiciones con la de dar rijidez a las vigas de madera, o ausiliares en cierta lonjitud puede llegarse a reducir las deformaciones a límites prácticos.

*
* *

Hai que convenir en que en estos puentes existen movimientos i oscilaciones que es necesario tomar en cuenta.

Por de pronto, la rijidez que puede darse a las vigas auxiliares no puede ser tal que evite por completo las deformaciones, las que en tésis existen para todo puente cualquiera que sea su naturaleza.

Pero no es difícil conseguir en cualquier tipo de vigas una rijidez continúa en 20 m., lo que haria estenderse a varios obenques o barras colgantes una reparticion igual de las tensiones.

Sea la viga de madera sistema Howe, sea el tipo articulado de pendolones i tirantes sistema Finck, sea una baranda de mallas de barras de fierro, o cualquier otro tipo de viga se llegará a conseguir esta rijidez en límites aceptables.

Para el acueducto de Río Claro me bastaba una viga doble T para obtener la rijidez deseada.

*
* *

La cama de la canoa queda, pues, constituida por dos vigas I paralelas i unidas por viguetas de la misma forma, en las que cargan las vigas armadas.

Para un puente carretero estas viguetas son las mismas cualquiera que sea la lonjitud del puente, salvo la circunstancia de aprovecharlas para formar la resistencia al viento agregando cruces de San Andres.

Es esto lo que he hecho en el puente acueducto de Río Claro.

En este caso, coloqué cables horizontales a tierra con 45° de inclinacion desde los tercios del puente, calculados para resistir al esfuerzo del viento, i completé la estabilidad de la obra aprovechando de las viguetas i agregando tirantes en cruz. Esta disposicion sirve tambien para efectuar un buen trabajo con las vigas cuando el esfuerzo horizontal de los muelles no es equilibrado i obra sobre uno de los estribos como sucederá cuando esté solo cargado un muelle.

Pero en frente del esfuerzo producido por la carga máxima, debida a la accion del viento, él es insignificante en las viguetas, bastando para tomarlo en cuenta con reducir a 7 kilogramos el trabajo por milímetro cuadrado para estas piezas que serán de fierro I del comercio.

Para un puente de via simple la carga será de 480 kilogramos por metro cuadrado,

comprendido el peso muerto, i estarán entónces sometidas a un esfuerzo de $2.5 \times 480 = 1200$ kilogramos por metro corrido, colocando a 2.50 m. las viguetas.

El momento solicitante será entónces $\frac{1}{8} \times 120 \times 5^2 = 3750$.

Para éste se necesitaria viga I de 0.25 m. de alto i con un peso por metro corrido de 55 kilogramos.

El peso de cada vigueta seria 275 kilogramos.

I es mas desfavorable el caso de la carga uniforme que él de un peso concentrado formado, por ejemplo, por una carreta mui cargada o por un motor (8000 kg. en dos ejes), porque en este caso el peso se reparte en tres o cuatro viguetas gracias a las vigas suplementarias i, en el mas desfavorable, el momento solicitante seria:

$$\frac{1}{4} \times \frac{8000}{3} \times 5 = 3333.$$

* * *

Una de las dificultades que presentan los puentes suspendidos es la conservacion de la forma por efecto del resbalamiento de las barras de suspension que cargando a veces en partes mui inclinadas del cable pueden fácilmente deslizarse si no se han tomado las precauciones para impedir este movimiento.

No tengo detalles precisos de lo que se hace en Estados Unidos i Europa para evitar este resbalamiento, pero se concibe que tomando el cable con abrasaderas o embolviéndolo con un corchado de alambre bien apretado puede llegarse a obtener un punto de apoyo para la estabilidad de la suspension de la barra.

Pero, cualquiera que sea la forma, es prudente no contar con un buen ajustaje, por lo que he ideado un procedimiento para obtener completa confianza: consiste éste en una disposicion que denomino «El aparejo.»

La tension mínima del cable está dada por la fórmula:

$$T_0 = p \times \frac{a^2}{2b}$$

Siendo p la carga por metro corri lo, a la mitad del claro i b la flecha.

La tension máxima es:

$$T_m = p \times \frac{a}{2b} \sqrt{4b^2 + a^2}$$

Corresponde la primera a la parte horizontal del cable i la segunda a la parte alta o línea de arranque en el apoyo.

El cálculo del cable se acostumbra hacer, i es lo natural, para la tension máxima dándole la seccion correspondiente en toda su estension: hai, como se vé, un exceso de material.

En mi procedimiento calculo la seccion para la tension mínima i completo la resistencia con barras que unen las de suspension i cuyas dimensiones son calculadas tanto

para llevar este objeto cuanto para impedir el resbalamiento de las últimas: por supuesto que entre las barras de suspension del o de los trozos centrales no hai necesidad de union, pero que conviene colocar provisoriamente para dar la forma al puente conservando la distancia prevista de los puntos de suspension.

De la última barra o punto de suspension se amarran hebras de alambre que completen la resistencia i que forman parte del cable hasta el anclaje.

Como lo indica la figura 4, las barras de suspension son dobles i quedan montadas a caballo en el cable por medio de una pieza especial a la que se unen por pernos.

El conjunto de estas piezas en forma de Ω de las barras de suspension i de union i de los pequeños haces de alambres que unen las últimas barras al anclaje es lo que llamo «el aparejo.»

Construidos los cables, total o parcialmente, se coloca el aparejo de uno i otro lado, se corre en uno i otro sentido hasta dejarlo en la posicion designada i puede entónces recibir la cama del puente.

En el acueducto de Río Claro, en que la construccion de los cables se hizo por parcialidades, se procedió por levantar la cama, construida en la caja del rio, hasta dejarla en una posicion aproximada a la que debia ocupar; se armaron en seguida los dos aparejos tendidos en el suelo, se levantaron con sus propios cables i se fueron enganchando las barras de suspension, principiando por las del centro; i recojiendo mas i mas los cables del aparejo fueron enganchadas las demas.

Obtenido esto, se colocaron cables simples de 19 hebras tomando el aparejo i en número necesario para resistir el peso de la cama; despues de esta operacion se quitaron las barras de union de los puntos de suspension en la parte central i se desligó la cama de los cables ausiliares, quedando colgada de las barras de suspension. Tomó ella inmediatamente su posicion recta, pero quedando un poco baja: se corrijó esta diferencia subiendo la cama por medio de un acortamiento de las barras, que es operacion fácil.

Es el hecho que con un procedimiento de esta naturaleza se logró armar el puente, de un tramo de 96 m. i con una altura de 17,50 m. sobre el fondo, sin necesidad de andamiaje.

*
* *

Tenia interes en efectuar esta operacion en la forma indicada.

En primer lugar, debiendo efectuar la construccion del acueducto en una época en que las creces de los rios ponen en peligro el andamiaje, temia que una obra costosa, dada la altura, pudiera desaparecer en un aluvion, como quedaban los recuerdos de haber acontecido algo semejante con un puente construido años atras en el mismo punto; i esto me llevaba a decidirme resueltamente por la construccion sin andamios.

Obraba tambien para adoptar este procedimiento un espíritu de economia, pues los cálculos me hacian ver que era mas barato este sistema que él con andamios, desde que tenia 17,50 m. de altura en la parte mas profunda.

Pero queria tambien experimentar para la construccion de estos puentes en los casos en que ofrecen sus grandes ventajas, como son en rios navegables i profundos i en cajones estrechos.

Sucedió como creía, en un mes con no mas de 15 operarios quedó armada la cama establecido el tráfico por el puente para la continuacion de los trabajos.

Los procedimientos de construccion son interesantes i voi a dejarlos consignados en estos apuntes.

La cama de 96 m. de largo la dividia en cuatro trozos de 24 m., de los que 2 aproximadamente componian los muelles i otros 2 el trozo central suspendido.

Teniendo las pilastras de apoyo, coloqué un cable central de trabajo, destinado primeramente para correr los muelles i para levantar despues los trozos centrales una vez libre este cable del peso de los muelles.

Los trozos correspondientes a éstos fueron armados próximamente al nivel en que debian quedar, dejando volada una estremidad para poder tomarlos del cable central por medio de cables i poleas que pendian de él i que colocados en una rueda acanalada que corria en el cable central permitia llevar el trozo a su situacion señalada.

La figura 5 indica la posicion del trozo de muelle en el momento de lanzarlo.

Colocado en situacion, se procedió a fijarlo por medio de hebras de alambre amarrazadas en los anclajes, en número necesario para recibir la carga muerta, la que se colocó en seguida para que sirviera de ausiliar en la construccion del trozo central.

La operacion de armar esta parte de la cama i de alzarla ofrecia sus inconvenientes.

El espacio que dejaba libre la caja del rio no cubierta por las aguas era la estrictamente necesaria para colocar los 48 m. del trozo central, i 12 m. de éstos quedaban dominados por el muelle ya colocado; era pues necesario elevar 12 m. la cama i correrla tambien 12 m. para llegar a su posicion definitiva.

El peso de cada uno de los trozos de 24 m. con sus accesorios de poleas, entablados era de 2 toneladas próximamente i las poleas o teeles de que se dispone jeneralmente no dan prácticamente una alza mayor de 3 m.; debia, en consecuencia, arbitrarne algun procedimiento para poder izar las piezas.

Las vigas adaptadas del tipo I de 200 milímetros de alto resistian a su propio peso sin defleccionarse en una longitud de 12 m. i para la armadura del puente se debia evitar su defleccion, pues de otro modo era difícil llegar a colocarlas en su posicion calculada,

Para obtener este resultado se levantó cada trozo con dos teeles tomándolos en la forma indicada en la figura 6.

Los cables *AB* deben formar una pirámide para impedir la volcadura del trozo de cama durante la construccion.

La operacion de izarlo i de correrlo se hizo fácilmente por medio del procedimiento que paso a indicar.

Como los teeles no dan prácticamente una alza mayor de 3 m, era necesario pensar en cubrir esta altura con ellos, dejar descansar el trozo en amarras suplementarias, sacar los teeles i disponerlos para subir otros 3 m. i por operaciones sucesivas llegar a los 12 m.; por lo tanto habia que preparar las cosas para estas operaciones de cambio, las que debiendo efectuarse en el aire era menester reducir la altura de izamiento en cada operacion a 1.50 m. a la que podian hacer los cambios fácilmente los operarios colocados sobre el trozo de cama.

El aparato corredizo sobre el cable central de trabajo está indicado por la figura 7 que explica fácilmente el objetivo de cada una de las piezas.

El cable de suspension estaba formado de trozos, de los que uno, el que carga en la polea, era de 4 m. i terminaba por argollas en sus dos estremidades, de modo que este cable solo podia correr ésta distancia en uno i otro sentido. De estas argollas colgaban trozos de 1.50, que llevaban una argolla en una estremidad i un gancho en la otra, i que iban a terminar en las amarras del trozo de cama por un lado i en el gancho del tecele por otro.

El cable auxiliar estaba formado de trozos de 1.50 m. idénticos a los anteriores.

El dispositivo del aparato de suspension lo indica la figura 8.

El trozo *AB* es el de 4 m. Recojido el tecele, el punto *A* sube mas o ménos 1.50 m. los mismos que baja el punto *B*, i el trozo de cama ha subido el mismo, 1.50 m.; se toma el punto *C* con el cable ausiliar i se afloja el tecele hasta que trabaje este cable, quedando, entónces libre el cable de suspension.

En este estado es fácil explicarse la operacion de quitar un eslabon por lado a este cable, volver los puntos *A* i *B* a su posición de la figura i colocar el tecele para continuar en la segunda operacion de alza de otros 1.50 m., i así continuar hasta quitar todos los eslabones i llegar a colocar el trozo de cama en su posición definitiva.

El acto de correrlo, estando una vez a media suspension o en cualquier otro memento, no ofrece dificultad, es cuestion de un esfuerzo horizontal.

Otro detalle interesante que me ha sujerido la práctica, i que conviene anotar, se relaciona con el modo de practicar la fuerza.

El punto de apoyo para subir las piezas puede estar en las piezas mismas como fuera de ellas; en el primer caso, hai que considerar el peso del motor para calcular el cable central de trabajo, i en el seguido, el valor del esfuerzo vertical.

Por ejemplo, si se quisiera subir piezas, como en este caso, de dos toneladas de peso por un medio directo, accionando solo una polea con un motor fijo en el suelo, habria que calcular el cable de trabajo para un peso de 4 toneladas: poner entónces un cable doble duplicando el valor de los aparatos accesorios necesarios para la colocacion del cable central, todos los que, como éste, deben desaparecer una vez construido el puente.

Esto es costoso i sin duda es mas barato accionar desde la pieza misma, pero contando con un peso adicional considerable.

Fué reducido todavia este peso en la construccion del acueducto de Rio Claro, por medio de un procedimiento que evita las sacudidas de la construccion, por el movimiento a mano de los tecles, i las causas de accidentes, por ir cinco operarios embarcados en el trozo de cama.

Para proceder se hizo funcionar el tecele desde abajo amarrando un cordel a la cadena, el que era recojido por medio de una poleita diferencial fija a un palo colocado en el suelo i cargado con piedras.

Un muchacho bastaba arriba para todas las operaciones.

El esfuerzo producido por este cordel equivale a parte del peso de los hombres que debieran accionar embarcados, por lo que es necesario tomarlo en cuenta al calcular el cable central.

Se comprende que con este procedimiento puede fácilmente construirse un puente suspendido sobre un río navegable o sobre quebradas profundas, quedando todavía la posibilidad de correr los trozos centrales, armados en la línea del eje del puente i en las orillas, pero que no considero tan económico como el anterior.

Para los casos de ríos navegables, bastaría armar en tierra los trozos de cama i embarcarlos en barras, las que colocadas en línea bajo el cable central, vendrían a sustituir al suelo para operar.

*
* *

El estudio de los puentes suspendidos me ha llevado a introducir otras modificaciones que considero de importancia.

Como es sabido, este sistema de puentes está desprestigiado en Europa por los diferentes accidentes sufridos; pero en Estados Unidos no sucede lo mismo.

El carácter más importante de ellos es su valor económico para los grandes tramos, i no hai duda de que es esta circunstancia lo que le ha valido su adopción en la República Americana, en la época en que este país no formaba todavía su gran riqueza; i aun creo seguirá su adopción en claros de 500 i más metros para puentes carreteros porque, como sucede en el puente de Brooklyn, en estos casos el peso vivo es una parte alcuota del peso muerto, i así las deformaciones producidas por éste son insignificantes.

De los accidentes que hasta hoy conozco se refieren unos a dislocación, producidos por el viento i la dilatación, i a destrucciones, debidas a defectos de construcción i falta de vigilancia en la conservación.

Recordaré los principales.

El puente de la Roche Bernard, en Francia, ha sido varias veces dislocado en su superestructura por fuertes vientos que lo han tomado por debajo. En Estados Unidos se ha salvado este inconveniente por medio de cables inferiores que impiden el levantamiento del puente.

El puente sobre el Niágara, por el que pasa ferrocarril, pero cuyos trenes lo atraviesan a cierta velocidad, ha sufrido rupturas en la arista de las piedras que forman la sillera de sus pilastras, debidas a un esfuerzo de flexión producida en ellas por los cables a causa de haberse juntado los cilindros de dilatación colocados sobre las pilastras impidiendo su funcionamiento. Se obvió este inconveniente sustituyéndolas por de hierro i cambiando el sistema de cilindros.

El puente de Brooklyn sufrió una dislocación de su parte central debida, por lo que me esplico, a una extraordinaria dilatación de sus vigas en un día de calor no previsto. Como se sabe, este punto tiene una inclinación en el trozo central de 3% en cada sentido, y se comprende que un alargamiento excesivo ha producido una fuerte compresión en las dos pilas, cuyo resultado ha sido levantar el centro para dar lugar al estiramiento produciendo en consecuencia su dislocación.

Como casos de ruptura se recuerda la terrible catástrofe del puente la Basse-Chêne en Angers, acaecida en 1850, pero cuyas causas no conozco.

En Rusia, donde existen algunos puentes de esta especie, hubo algunos años atrás

un accidente grave debido a la ruptura de uno de los cables en el anclaje; la causa fué su debilitamiento por la corrosion producida por las sales amoniacales de las defecaciones animales, llevadas aquellas por las aguas lluvias en las infiltraciones. El nitrato de amonaco es un oxidante i es mui natural que este fuera en aquellas aguas.

La esperiencia ha llevado a modificar las disposiciones jenerales de los puentes suspendidos o colgantes i es el estudio de estas causas de accidentes i de las condiciones económicas de establecimientos de estas obras lo que me ha obligado a innovar adoptando los «apoyos rotatorios i los anclajes visibles.»

*
*
*

Por de pronto no considero conveniente en Chile adoptar la pilastra de mampostería para estos puentes, porque sosteniendo pesos considerables que pueden tomar una fuerte cimbra en los temblores, presentan una circunstancia desfavorable, desconocida i difícil de apreciar en la práctica.

En segundo lugar, la construccion de pilastras de albañilería no es tanto mas económica que las de fierro, para las alturas que ellas deben tener. Con andamiaje el m.³ de mamposteria de cemento no puede estimarse en ménos de \$ 40 el m.³ y adoptando el precio de 35 cts. para el kgmo. de fierro, puede hacerse una comparacion entre uno i otro sistema.

Sea P la carga por pila i H su altura = 10 m.

Adoptando pilas de mampostería de seccion cuadrada, su volúmen seria:

$$V = \frac{1}{3} \times 10 \left(\frac{P}{150000} \times 1.02736 + \frac{P}{150000} + \sqrt{\frac{P^2 \times 1.02736}{15000^2}} \right)$$

$$V = \frac{717 P}{10^7}$$

Las pilastras de fierro pueden construirse bajo un trabajo de 6 kmos. por mm.² i tendrán una seccion $\frac{P}{6}$, i el peso seria:

$$\frac{P}{6} \times 10 \times 0.000001 \times 7800 = 0.013 P$$

Supóngase $P=300000$, la carga para un puente carretero de 100 m. de claro, i se tendrá que el volúmen de la obra de albañilería para las pilastras de un lado es de $21\frac{1}{2}$ m.³, que al precio de \$ 40, son \$ 860; i si estas fueran de fierro pesarian 3,900 kmos. i valdrian \$ 1,364.

Hai que considerar tambien que el volúmen de las fundaciones aumenta para el puente con pilastras de albañilería porque en la reparticion de la presion en el suelo hai que tomar en cuenta el precio propio de las pilastras, i el obliga a dar 2 m.² de seccion mayor en el caso de la albañilería, lo que aumentará el costo como en \$ 200.

Los vientos i demas accesorios, para permitir el trabajo de 6 kms. en la ferreteria, tambien aumentan el valor de estas obras i éste no será mayor que esta cantidad; por lo que, en el caso considerado, el aumento de precio de las pilastras de fierro sobre el de la de albañilería no pasa de \$ 500 por lado, \$ 1,000 en todo, i bien vale la pena hacer este mayor gasto para prevenirse en contra de los temblores.

Por otra parte, por la disposicion que se dió a las pilastras evité el uso de los rodillos de dilatacion que, como se ha visto, han producido accidentes en la estabilidad de los puentes, aunque esto haya sido debido a disposiciones defectuosas de los rodillos

Hai que agregar dos consideraciones todavia para apreciar los apoyos rotatorios que he adoptado para el tipo de puente que propongo; son una, evitar el esfuerzo horizontal que suponen los rodillos de dilatacion en la parte superior de las pilastras, i otra, facilitar la construccion del puente.

Colocados los rodillos sobre planchas de fierro o fundicion están comprimidos por una fuerza P i la adherencia está representada por $1/15$ de su valor que para el caso que se ha supuesto significa un esfuerzo horizontal de 2,000 kmos, que con un brazo de palanca de 10 m. supone en el empotramiento de la pilastra otro considerable, fig. 9.

No entraré a estimar cuanto representa en el costo esta circunstancia porque seria largo escudriñar i porque me parece bastante con citar este detalle para que se pueda estimar lo que vale el sistema de apoyos que preconizo.

La otra consideracion por analizar es la de que una pilastra simplemente acentada sobre basas que descansan en la fundacion i que termina abajo en curva puede producir un movimiento oscilatorio fácil en su parte superior.

Esta circunstancia tiene para la construccion un valor que se puede apreciar.

En el acueducto de Río Claro aconteció que con la colocacion de un muelle no quedaron verticales las pilastras i hubo necesidad de arreglarlas volviendo la parte superior a su posición señalada corriéndola como 15 cm. Esta operacion fué fácil porque se suspendió el muelle del cable central de trabajo, que estaba apoyado en las mismas pilastras, pero sobre una rueda, i se tiró de la parte superior con una polea diferencial apoyada en los anclajes hasta dejar las pilastras en la vertical; si éstas hubieran sido inamovibles la operacion habria sido difícil i dado el procedimiento usado para formar los cables es de temer sobrevenga comunmente este movimiento en la union del cable i las pilastras.

* * *

La forma que he dado a los apoyos está indicada por la figura 10.

En los extremos llevan basas de fundicion de la misma forma i dimensiones terminadas en curva para recibir el cable i asentar en el suelo.

Para la fundicion la fórmula siguiente dá el diámetro del circulo o cilindro:

$$d = \frac{P}{0.4 e}$$

en que P es el peso, d el diámetro i e el espesor

Para el acueducto de Río Claro en que $P=70000$ kgs. i $e=150$ mm. se obtiene $d=1,166$ m.; se dió a la parte inferior un radio de 0,60 m.

La parte central está formada por vigas I del comercio unidas unas con otras por medio de barras horizontales i diagonales i relleno el espacio entre ellas con albañilería, para completar la ríjidez del conjunto.

La distancia que separa las vigas estremas debe ser, mas o ménos, $1/12$ de su altura.

Cuando la carga fuere tal que no cupieren las vigas en una sola línea se colocarán en dos o mas.

Para conservar la posicion trasversal de las pilastras, se unen unas con otras por medio de barras horizontales angulares i de cruces de San Andres, calculadas para resistir a los esfuerzos del viento sobre las mismas pilastras i parte de los cables.

La operacion de colocar estos collares de pilastras no presenta dificultades grandes.

Armadas horizontalmente sobre andamios situados a un nivel tal que jirando la pieza sobre las bases inferiores venga por fin a quedar en la situacion definitiva, se levanta del otro estremo primeramente hasta tomar la inclinacion de 45° apoyándose en un madero o en una pilastra de madera armada ex profeso, i despues se toma del otro lado del puente con un cable para continuar la operacion.

Antes de proceder a esta segunda parte de la operacion hai que sostener fuertemente el estremo inferior a puntos fijos, en sentido contrario al movimiento del cable, porque el esfuerzo producido en éste se traduce en otro paralelo de arrastre en dicho punto, que en parte es equilibrado por la adherencia pero que obra con todo su valor para destruir el macizo de fundacion, por lo que hai que considerarlo en todo su valor.

*
* *
*

Completan las disposiciones jenerales del nuevo tipo de puente suspendido los anclajes visibles o revisables.

Siendo el cable de suspension la parte orgánica del puente, es necesario colocarlo de modo que pueda ser vijilado constantemente i mantenido en condiciones que no sufra la injuria del tiempo.

I siendo el anclaje la union ríjida del cable a los muros de retencion, es natural pensar tambien en proyectarlo de modo que sea revisable i pueda mantenerse en buen estado de conservacion.

Esto lleva en primer lugar a colocar los muros de retencion en situacion tal que la humedad no llegue a la parte en que está colocado el anclaje, por lo que me parece poco práctico ubicar estos muros bajo la vía como se acostumbra por economía.

El muro de retencion está destinado i debe ser calculado para resistir las componentes horizontal i vertical del esfuerzo del cable.

La segunda se equilibra colocando sobre los anclajes un peso igual o mayor que el valor de este componente i la primera con la resistencia al arrastre de las tierras que existen delante del macizo, con el frotamiento de las del costado i con la adherencia del macizo al suelo, pero descontando de su peso el que está destinado a resistir el esfuerzo vertical.

Para comprender las razones que me llevan a adoptar el anclaje que he ideado, conviene dar algunos detalles sobre las condiciones de establecimiento de los muros de retencion.

Para el caso comun de los terrenos de acarreo el coeficiente de adherencia de los muros de albañilería al suelo es 0.57, que he obtenido por esperiencias propias i que es el mismo que dan los autores i, entre otros, Dubosque en su tratado de muros de sostenimiento, de manera que si se quisiera solo contar con esta resistencia para la estabilidad del puente habria que emplear en el muro de retencion un volúmen dado por la fórmula:

$$V \times p = C_v + C_h \times \frac{100}{57}$$

en que p es el peso del metro cúbico de la albañilería i C_v i C_h los componentes del esfuerzo del cable.

Pero si el subsuelo es de piedra o puede considerarse como tal el coeficiente, es ya 0.75 i el volúmen se reduce para la componente horizontal en 31½%.

Esto hace ver que en un terreno de acarreo puede dejarse este 31½% de la albañilería bajo el anclaje sirviendo él para resistir al arrastre o esfuerzo horizontal.

Bajo estas apreciaciones he formado el tipo de anclaje revisable.

Sobre la fundacion hecha con albañilería ordinaria a cierta profundidad coloco dos muros paralelos a una distancia que variará segun los casos, dejando una ventanilla en la parte posterior i al raz de la fundacion: en la parte superior de estas ventanillas se apoyan una o mas vigas de forma **I**, calculadas para resistir al esfuerzo vertical, en las que se remachan fierros **L** de dimensiones determinadas i a los que se ha dado previamente una forma parabólica i abierto agujeros para atravesar barras circulares en que vendrán a amarrarse los alambres del cable (fig. 15.)

Es necesario calcular si la superficie de contacto con la albañilería de las vigas en la parte superior de las ventanillas corresponde a la carga límite de resistencia de la construccion i en caso de que no lo sea deberá colocarse soleras de la misma forma i material que soportan la presion en el muro, lo que convendrá jeneralmente hacer para asegurarse que el peso que carga sobre las vigas es el que da el cálculo como necesario.

Se comprende que dando a los muros cierta altura i espesor puede hacerse que solo la parte posterior de ellos resista al esfuerzo vertical, dejando que la anterior sirva para contrarrestar el esfuerzo de arrastre.

La forma parabólica que se da a los fierros **L** tiene por objeto hacer que en el punto de amarra con las vigas de anclaje sufran ellos solo la tension vertical i que repartan uniformemente la horizontal en el resto del macizo por medio de los fierros **A**. Para facilitar el trabajo de estos i hacer que todo el macizo se apoye en tierra por su parte de adelante se rellena de albañilería el espacio **B**.

Por último, se unen arriba los muros por albañilería sobre vigas tanto para encerrar el anclaje cuanto para que exista union entre los muros e impedir puedan abrirse por efecto de la flexion de las vigas de anclaje. Construido el puente se cierra tambien el muro por sus frentes dejando una puerta por su lado posterior para revisar el anclaje.

*
*
*

¿Hai aplicaciones en Chile para los puentes suspendidos?

Es esta una pregunta que por mi parte no puede ménos que ser afirmativa i que cada dia, a medida que estudio la cuestion, voi afirmando mas i mas.

El carácter mas importante de estas obras es su economía producida por el fuerte trabajo que permite el alambre.

Pasado el metal por la hilera sufre una compresion considerable; las fibras se unen sólidamente unas a otras i desaparecen las fallas, todo lo que ha permitido llevar la taza de trabajo a 19 i 26 kmo. por mm.², como sucede en los puentes del Niágara i del Ohio en Estados Unidos, cuyos cables han sido formados con alambres de fierro.

Si a esto se agrega en Chile el uso del riel para las piezas comprimidas o flexionadas se llega a un tipo económico aun mas sintetizado.

Como adecuados para la construccion de acueductos de grandes tramos, en que se presenta el caso ideal de una carga igualmente repartida, he podido comprobar su practicabilidad con las que he construido sobre los rios Mapocho i Claro, que funcionan regularmente.

En otra circunstancia se me ha presentado aconsejar la adopcion de este tipo para acueducto i merece dé a conocer los detalles para que se vea una ventaja que presenta

Concluyendo los estudios para regar parte de la hacienda de Huantelauquen, con aguas sacadas del rio Choapa, debia atravesar el canal el estero de Millagüe, el que corre con una gradiente mas o ménos suave.

El canal llegaba a la salida del Cajon a una altura de 60 mm. i en esta parte se presentaban dos lomas que se aproximaban de uno i otro lado hasta permitir salvar la altura con un acueducto de 126 m. Dando la vuelta por el interior se recorria 11 ks. i se perdía una altura de 11 m. por la gradiente adoptada.

Con 1 m. de desnivel en el acueducto se llegaba a una solucion económica, un precio talvez igual al costo de los 11 ks. de canal i con la circunstancia favorable de quedar 10 mm. mas alto con el agua al otro lado del estero.

Siendo los terrenos por regar de inclinacion suave, estos 10 m. significaban bien 400 cuadras mas de tierras dominadas por el canal, i estimando a \$ 200 el mayor valor de la unidad se llegaba a un beneficio de \$ 80,000 con la adopcion del puente suspendido.

Este caso me parece mui comun en Chile i merece ser conocido para que sea tomado en cuenta en situaciones análogas.

En materia de vías de comunicacion, descartando los ferrocarriles, presentan un vasto campo de aplicacion.

En los puentes carreteros difícilmente podrá encontrarse un tipo mas económico para grandes tramos.

En puentes de simple vía, en que la carga por metro corrido no pasa de 2,000 kilogramos, puede formarse una idea comparando su costo con los acueductos que he construido.

El del Mapocho, con vigas de madera i una carga uniforme de 900 kmos., costó

aproximadamente \$ 16,000 i el del Rio Claro con 1,000 kms. por metro corrido i vigas de fierro costó \$ 22,000, siendo el primero de 84 m. de claro i de 96 el segundo.

En Valparaiso encontrarian otra aplicacion para pasajes de cerro a cerro a traves de las quebradas.

Encuentro tambien otra aplicacion en la formacion de muelles para descarga directa de los buques.

Existiendo a ménos de 200 m. de la costa, profundidades i fondos para la construccion económica de macizos de albañilería pueden unirse éstos a tierra por un puente suspendido i facilitar así la comunicacion con buques atracados al macizo.

Dando a éste 50 m. de largo por 10 de ancho puede resistir a las olas frecuentes en nuestros puertos i con la superficie que encierra puede tener capacidad para la carga i descarga de un buque.

Un muelle como lo indica la figura 19 costaria:

10 × 50 × 11 = 5500 m. ³ muro de desembarque a \$ 30 quintal....	\$ 165,000
5 × 10 × 11 = 550 m. ³ » » » a » 30 »	16,500
Enrocados = 1500m. ³ a \$ 8 quintal.....	12,000
Puente para carros de carga.....	60,000
Imprevistos, etc.....	46,500
TOTAL.....	\$ 300,000

Dando profundidades suficientes podria atracar al muro un buque de gran calado i efectuar la carga directamente del buque al carro i obtener ventajas de consideracion.

Por cierto que el tipo de muelle podria ser mas económico si ya se pensara en usar carros de mano i si se diera a los muros menores dimensiones.

La disposicion de la figura 15 permite aun reducir algo mas el valor del muelle.

La disposicion de este muelle permite atracar dos buques a la vez i hace mas fácil el movimiento de los carros.

El presupuesto aproximado de esta obra seria:

10 × 30 × 11 = 3300 m. ³ muro a \$ 30 quintal.....	\$ 99,000
Enrocados = 1000 m. ³ » a » 8 »	8,000
Puente para carga con carros a mano.....	30,000
Imprevistos, etc.....	28,000
TOTAL.....	\$ 165,000

Esta corta esposicion hace ver que hai campo para la aplicacion de los puentes suspendidos en una escala que merece llamar la atencion de los ingenieros del pais.

Santiago, Abril de 1902.

ENRIQUE VERGARA MONTT.



