

Sobre un método para el estudio de la corrosión de los hormigones por los líquidos agresivos

1. INTRODUCCIÓN

Desde mediados del siglo pasado se han efectuado en todas partes investigaciones sobre el problema de la acción de las aguas agresivas, particularmente del agua del mar, sobre el cemento fraguado y sobre los hormigones de cemento.

Los resultados de estas investigaciones, que muchas veces no pasan de ser simples observaciones, han sido publicados en gran número de revistas especializadas.

A pesar del enorme esfuerzo y gran trabajo que estas investigaciones representan, y aun teniendo en cuenta los muchos datos útiles e interesantes conclusiones que de ellas se han derivado, no se ha adelantado gran cosa en el conocimiento científico de la cuestión fundamental del problema, o sea, saber cómo actúan los diferentes líquidos agresivos, particularmente el agua del mar, con sus diferentes constituyentes, sobre las distintas fases del cemento fraguado.

En un importante trabajo de O. Gassner, donde se resumen y critican las investigaciones hechas sobre esta materia, llama la atención sobre la contradicción que se observa en muchas de las conclusiones a que llegan la mayor parte de dichas investigaciones. Esta contradicción se explica teniendo en cuenta, por un lado, la falta de un conocimiento científico de los procesos de hidratación que tienen lugar durante el fraguado y endurecimiento del cemento mismo, y, de otra parte, las diferentes condiciones de experimentación empleadas por cada investigador al tratar de estudiar este problema. Así vemos que, si unos investigadores consideran el problema desde un punto de vista exclusivamente científico, pretendiendo así resolverlo, otros lo enfocan de manera estrictamente empírica, tratando de encontrar un cemento o una mezcla de cementos que presente una adecuada resistencia contra determinados líquidos y sea por ello apropiado para ciertos fines. Consecuencia de esta falta de unidad en las investigaciones es el estado actual del problema, que persiste casi como en los primeros momentos de su planteamiento y envuelto, además, en un cúmulo de contradicciones.

La solución de este interesante problema, cuya importancia práctica aumenta cada día, se hace cada momento más necesaria. En el presente trabajo vamos a intentar enfocarlo de una manera general, tratando de encontrar un método de investigación que sirva para ulteriores trabajos. Para ello partimos, en parte, de nuevos puntos de vista, que nos permitirán interpretar científicamente los resultados obtenidos en condiciones de experimentación sumamente análogas a las que en realidad están sometidos los hormigones.

La mayor parte de los investigadores efectúan sus trabajos de la siguiente manera: Preparan probetas como las normales para las determinaciones de las resistencias por tracción y compresión, las conservan luego en los correspondientes líquidos agresivos, y

deducen, de la variación experimentada en los valores de las resistencias, el grado de corrosión. Estos métodos no consideran en absoluto los cambios químicos que tienen lugar durante la corrosión, y puesto que las fuerzas que actúan en la destrucción por los líquidos agresivos son, en su mayor parte, de orden químico, creemos que el método que se elija debe apoyarse fundamentalmente en el estudio de este orden de fenómenos, si es que se desea aclarar y penetrar en el mecanismo del proceso mismo de la destrucción, único modo de poder luego tratar de corregirlo con base científica.

En realidad, no han faltado autores que tratan de enfocar este problema desde el punto de vista químico (Haegerman, Werner, Assarson, etc.), pero en cambio se han alejado, más de lo deseado, de las condiciones que en la práctica existen. No nos parece, por ejemplo, correcto aplicar directamente a la práctica los resultados que se obtengan de la acción del agua y distintos líquidos sobre un cemento pulverizado finamente, después de fraguado.

El método por nosotros elaborado se basa en la siguiente idea, expuesta por Kühl:

Deben prepararse cuerpos de ensayo con hormigones obtenidos con cementos de distintas propiedades y composiciones, bajo diferentes condiciones de preparación y con diferentes clases de conservación (conservación en aire, en agua, conservación combinada, etc.), los cuales deben someterse a una especie de filtración por los líquidos agresivos, de manera que éstos los atraviesen en condiciones lo más parecidas a las que en la práctica están sometidos los hormigones. De esta manera se tratarán de aclarar los cambios que, tanto físicos como químicos, tengan lugar en el interior de los hormigones, mediante investigaciones físicas y químicas de las variaciones producidas, durante el tiempo que dure el ensayo, en la velocidad de la filtración de los líquidos y en la composición química de los líquidos filtrados, determinando, finalmente, la resistencia de los cuerpos de ensayo, a fin de fijar sus relaciones con los cambios químicos.

Las anteriores líneas directrices han sido orientadas teniendo en cuenta dos ideas fundamentales: por un lado, tratando de establecer unas condiciones de experimentación que se ajustasen a la práctica lo más posible, teniendo siempre presentes las condiciones de los hormigones en las conducciones por tuberías, en las construcciones de puertos, de presas, etc., y, por otra parte, sin perder de vista la necesidad de poder seguir en todo momento el proceso de la corrosión, tratando para ello de poder disponer de los líquidos agresivos después de haber atravesado el cuerpo de ensayo, a fin de someterlos a los ensayos químicos convenientes, incluso las determinaciones cuantitativas.

En el presente trabajo se contienen nuestras investigaciones, llevadas a cabo con el objeto de elaborar un método que responda a las anteriores exigencias

y aplicándolo después al caso concreto del ataque de un cemento portland normal por el agua destilada.

Debemos hacer constar que en estas investigaciones prescindimos en absoluto de las conclusiones obtenidas por anteriores investigadores.

II. MÉTODO DE TRABAJO

1. Preparación de los cuerpos de ensayo

Teniendo en cuenta que las propiedades de un hormigón, especialmente las resistencias, tanto físicas como químicas, dependen principalmente de las condiciones de preparación del mismo, hemos tomado en consideración, para la preparación de los cuerpos de ensayo sobre los que vamos a estudiar el método, los siguientes cinco puntos:

1. Clase y propiedades del aglomerante;
2. Composición granulométrica del árido;
3. Factor árido/cemento;
4. Factor agua/cemento;
5. Condiciones mecánicas de preparación.

Variando estos cinco puntos se pueden establecer numerosas combinaciones en las condiciones de preparación de los cuerpos de ensayo, que luego han de someterse a la investigación. Cada modo de preparación conducirá a un tipo de hormigón, que podrá ser perfectamente caracterizado por sus propiedades, pues éstas estarán, sin duda, en relación con aquél.

Un estudio sistemático en este sentido, o sea tomando en consideración todas estas posibilidades de variación, es indispensable para tratar de resolver científicamente y de un modo completo problema tan complicado como es la acción del agua del mar sobre los hormigones. Sin este estudio sistemático es imposible tratar de resolver el problema, y ésta es, según nuestra creencia, otra de las causas del por qué no se haya adelantado hasta ahora gran cosa en su solución.

Como ya hemos dicho, en este trabajo nos limitaremos únicamente al estudio de la acción del agua destilada sobre el hormigón de cemento portland normal, a fin de establecer un método que pueda, más adelante, aplicarse a otros líquidos y especialmente al agua del mar.

Al tratar de preparar los cuerpos sobre los que se van a efectuar los ensayos, deben tenerse en cuenta algunas consideraciones: El hormigón preparado no debe ser, ni demasiado poroso, de manera que el agua pase a su través con tal velocidad, que haga imposible un fructífero balance químico de la corrosión, ni tampoco debe ser tan compacto que se haga completamente impermeable. La obtención de cuerpos con una permeabilidad conveniente la consideramos, por lo tanto, de suma importancia, y en este sentido hemos dirigido nuestros primeros esfuerzos.

El cemento empleado en nuestras investigaciones lo hemos preparado partiendo de un clinker procedente de la fábrica de cementos "Adler", de Rüdersdorf, cerca de Berlín, el cual había reposado en sacos en el laboratorio cerca de un año. Se le añadió un 3 por 100 de yeso y se molió en el molino del laboratorio hasta que dejó un residuo de 12 por 100 al tamiz de 4 900 mallas. El análisis químico dió el siguiente resultado:

SiO ₂	18,86
Al ₂ O ₃	5,48
Fe ₂ O ₃	2,75
CaO	62,70
MgO	2,12
Alk ₂ O	1,37
SO ₃	1,80
Pérdida al fuego	5,25
	100,33

El cemento así preparado se guardó en latas bien cerradas hasta el momento de empleo.

En lugar de emplear una arena con un tamaño único en sus granos, como suele hacerse en los ensayos normales de resistencia, y a fin de disponer de un agregado conveniente, o sea con una composición granulométrica debida, extremo muy importante por influir grandemente en la porosidad del hormigón, hemos partido de la arena normal alemana, la cual molíamos en porciones de 10 kilogramos de cada vez y siempre en las mismas condiciones y en el mismo molino, a fin de obtener siempre mezclas de la misma composición granulométrica. De esta manera preparamos tres clases de arena, o sea moliéndola cinco, diez y quince minutos. El análisis granulométrico de estas tres arenas dió el siguiente resultado:

Mallas/cm ²	Arena, 5 m	Arena, 10 m	Arena, 15 m
10 000	6,5	13,0	20,0
4 900	9,8	17,8	28,5
2 500	13,8	24,3	38,8
900	21,6	34,8	53,0
400	35,9	54,0	75,3
225	49,9	62,0	81,9
81	85,6	94,3	100,0

Para los ensayos preliminares se amasó el cemento de Rüdersdorf con cada una de las tres arenas descritas, en las proporciones 1:3, 1:5 y 1:8, empleando siempre un 10 por 100 de agua con relación a la mezcla seca.

Los factores correspondientes a estos morteros son los siguientes:

Factor cemento/arena	Factor agua/cemento
1 : 3	0,4
1 : 5	0,6
1 : 8	0,9

Para la preparación del mortero pesamos alrededor de 2 a 2,5 kilogramos de sustancia seca (arena y cemento), según las proporciones arriba expuestas. Para lograr una mezcla íntima la metemos, todavía seca, en una lata cilíndrica y la sacudimos en todas direcciones, haciéndola girar al mismo tiempo. Echamos después la mezcla en una espaciosa cápsula de porcelana, añadimos la correspondiente cantidad de agua y la mezclamos durante un minuto con una cuchara. El mortero así obtenido se termina de amasar empleando el mezclador mecánico ordinario para la preparación del mortero para los ensayos reglamentarios de cementos.

Tratando de lograr siempre la máxima concordancia en los resultados, a fin de que éstos fuesen en todo momento capaces de ser reproducidos, hemos puesto la máxima atención en la preparación de los cuerpos

de ensayo. Desde el primer momento nos decidimos por la forma cilíndrica, por ser mucho más cómoda para efectuar luego las instalaciones de filtración. Como molde, empleamos un cilindro de acero de 120 milímetros de alto y 25 cm de diámetro exterior y una luz de 56,4 mm. El pistón para transmitir la presión tenía 50 cm de alto y se ajustaba exactamente al interior del cilindro, de manera que cuando el pistón estaba completamente dentro quedaba un espacio de 70 milímetros de alto. De esta manera el cilindro de hormigón que se obtiene mide 70 milímetros de alto por 55 milímetros de diámetro. Como soporte empleamos una plancha de hierro.

Para la preparación de los cuerpos de ensayo operamos de la siguiente manera: Pesamos con un exceso de un 10 por 100 la cantidad de mortero, preparado como hemos indicado, necesaria para llenar el molde cilíndrico; esta cantidad varía en su peso según las proporciones de la mezcla y oscila entre 370 y 420 gramos para las mezclas ensayadas. Después llenamos el molde cilíndrico, distribuyendo el mortero lo más uniformemente posible dentro del mismo; colocamos el pistón, que se aprieta primero con la mano haciéndolo girar a fin de asegurarse de que está perfectamente vertical, y, finalmente, se prensa hasta lograr que la presión deseada, que en nuestros ensayos osciló entre 200 y 1 200 kg/cm², permanezca constante durante dos minutos; de esta manera entra el pistón en el molde, quedando fuera poco menos de 1 cm; se retira de la prensa y se vuelve, para, otra vez, por presión, introducir el pistón del todo de manera que el mortero sobrante salga por el otro extremo; este sobrante se separa cuidadosamente con un cuchillo, dejando la superficie lo más igualada posible; por último, y valiéndose de nuevo de la prensa, se extrae el cilindro de hormigón del molde y se coloca en un armario saturado con vapor de agua a una temperatura de 18 a 20°, donde se deja durante veinticuatro horas, procediendo después según se dirá más adelante.

Entre los distintos modos de preparación ensayados, por ejemplo, con morteros fluidos, utilizando el aparato de martillos en lugar de la prensa, etc., es el descrito más arriba el que dió mejores resultados en los que se refiere a constancia de las propiedades resultantes; sin embargo, y como veremos más adelante, las diferencias observadas entre cuerpos preparados exactamente bajo las mismas condiciones, son en algunos casos mayores de lo que sería de desear.

A fin de precisar las condiciones de preparación más convenientes para obtener cuerpos de ensayo con las características apropiadas para luego efectuar las investigaciones físicas y químicas, preparamos una serie de cuerpos con las tres arenas y factores cemento/arena y agua/cemento arriba descritos, y, por fin, variando la presión de preparación, después de un día de conservación, se determinó en ellos el peso, la resistencia a la compresión y las porosidades para el aire

y para el agua, estas últimas con los aparatos que se describen a continuación.

2. Normas seguidas para la medida del paso del aire y del agua a través de los cuerpos de ensayo

La porosidad para el aire de un cilindro de hormigón, o sea el volumen de aire que, bajo determinadas condiciones, atraviesa dicho cilindro durante un minuto, lo calculamos midiendo el tiempo que tardan en

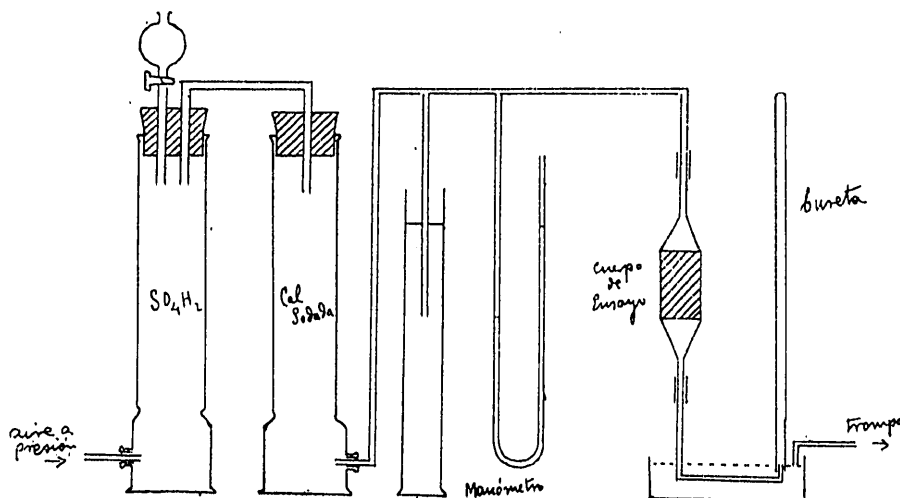


Fig. 1.

pasar a su través 50 c. c. de aire. El aparato que empleamos en esta determinación está representado en la figura 1.

La corriente de aire, procedente de una trompa de agua, se hace pasar por dos torres desecadoras; la primera con bolas con ácido sulfúrico y la otra con cloruro de calcio y cal sodada, a fin de obtener el aire seco y libre de anhídrido carbónico. Un regulador de presión (la observación de la figura hace innecesaria toda explicación del mismo) la mantiene constante y en el valor deseado durante toda la operación. Por fin, el aire pasa a través del cuerpo de ensayo y se recoge en una probeta de gases de 50 c. c. de capacidad, midiendo con un reloj de segundos el tiempo que tarda en llenarse. Como era de esperar, este tiempo es inversamente proporcional a la presión a que actúa el aire sobre el cuerpo de ensayo. Nosotros efectuamos siempre las medidas que más adelante se expoundrán, a 10 centímetros cúbicos de agua de presión y temperatura del laboratorio.

Los cuerpos de ensayo no pueden colocarse directamente en el aparato anteriormente descrito, pues el aire se escaparía por los lados. Se hace, por lo tanto, necesario recubrir la superficie lateral de los cilindros con una sustancia impermeable al aire y al agua.

Desde el punto de vista experimental esta adaptación ofreció algunas dificultades; por otra parte, si el empleo de lacres, barnices, piceína, goma laca, etc., daba buen resultado para la impermeabilización de la superficie lateral de los cilindros, en cuanto al paso del aire, tan pronto se les sometía al paso del agua resultaban atacados estos medios impermeabilizantes por las aguas alcalinas producidas en la corrosión del cemento, lo que conducía a una pérdida del ensayo al cabo de cierto tiempo. La única sustancia empleada con éxito fué la parafina, que, aunque presenta el inconveniente

de que no permanece adherida a la superficie del hormigón, queda fácilmente subsanado empleando tubos de goma que la sujeten.

Después de varios ensayos hemos adoptado con buen resultado el siguiente procedimiento:

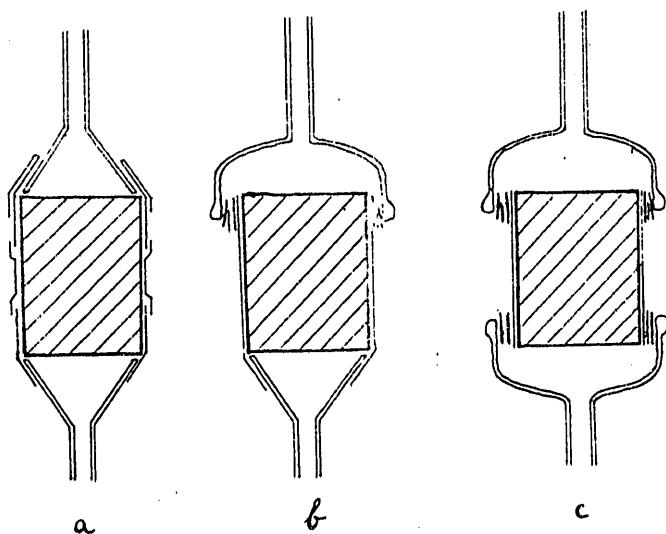


Fig. 2.

Sobre la superficie de hormigón, del cilindro objeto del ensayo, se extiende, con un pincel, una delgada capa de parafina fundida, procurando que quede lo más uniforme posible. Utilizando dos trozos de tubo de goma de unos 5 cm de diámetro y 5 cm de largo (nosotros utilizábamos neumáticos de bicicleta, tipo

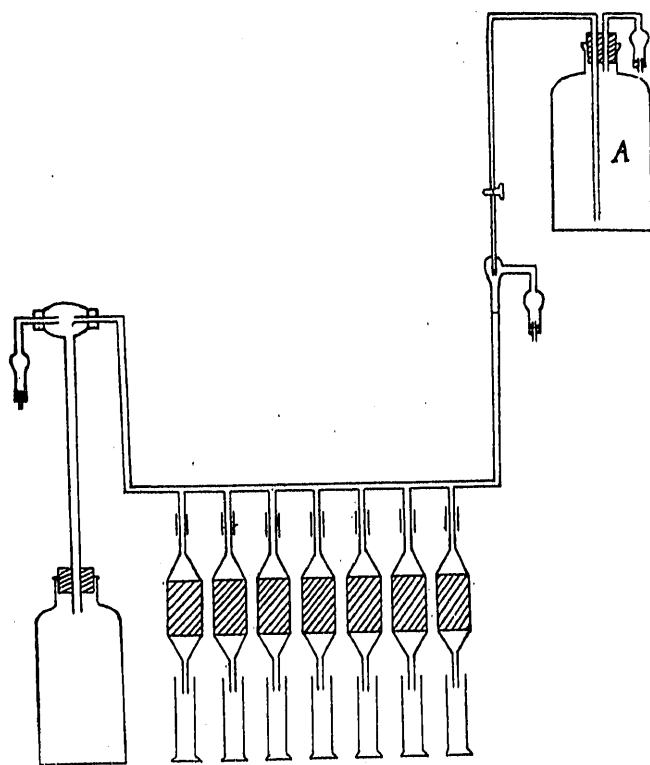


Fig. 3

balón, de 24×2), se adaptan a las bases del cilindro dos embudos de vidrio, como se indica en la figura 2 a. Para impedir que se suelte, debido a la presión, la parafina que queda al aire en la parte media del cilindro se recubre con un trozo de tubo de goma de unos

4 cm de largo, el cual se pega a los anteriores con solución de goma. De esta manera queda el cilindro completamente recubierto con goma, siendo, por tanto, impermeable para el aire y el agua.

En vez de los embudos corrientes se pueden adoptar las disposiciones que se indican en las figuras 2b y 2c, cuyos embudos especiales abrazan el cilindro de hormigón previamente recubierto de parafina y tubo de goma. Esta disposición, también empleada por nosotros, ofrece análogamente gran seguridad.

Los dibujos de la figura 2 corresponden a la mitad del tamaño natural.

El aparato para la determinación del paso del agua a través de los cilindros de hormigón, así como para la obtención del agua de filtración, que después sometemos al análisis químico, se representa de modo esquemático en la figura 3.

El agua o líquido agresivo contenido en el frasco-depósito A se conduce mediante varios tubos en T a los diferentes cuerpos de ensayo, acondicionados, co-



Foto 1.

mo ya hemos dicho más arriba; al final de esta conducción, se prolonga con un tubo hasta lograr la altura de la presión a que se desee hacer la experiencia. Nosotros hemos trabajado siempre con una presión de 70 centímetros de agua. Debajo de los cuerpos de ensayo se colocan matraces graduados, a fin de recoger y medir de tiempo en tiempo los líquidos filtrados.

La velocidad del líquido agresivo procedente del frasco A se regula por medio de una llave de paso, teniendo en cuenta la porosidad de los cuerpos de ensayo. Todo el sistema que contiene el líquido agresivo debe de estar cerrado con tubos de cal sodada, a fin de evitar el contacto del líquido con el anhídrido carbónico del aire.

El aparato acabado de describir se puede simplificar sustituyendo el frasco A por otro basado en el principio del frasco de Mariotte, suprimiendo entonces la llave de paso y el tubo de salida y regulador de presión, evitando así la enojosa regulación de la veloci-

dad del líquido. Esta modificación, que también hemos empleado, presenta el pequeño inconveniente de no permitir la observación directa del líquido absorbido por los cuerpos de ensayo.

En la fotografía 1 se reproduce el aparato descrito durante las investigaciones efectuadas.

En la fotografía 2 se ven los cuerpos de ensayo, preparados según los tres tipos que ya hemos descrito.

Con objeto de informarnos sobre las condiciones de preparación de los cuerpos de ensayo sobre los cuales íbamos a efectuar las experiencias, cuyos resultados expondremos más adelante, se llevaron a cabo numerosos ensayos preliminares, cuya exposición en este lugar no juzgamos necesaria, pero que nos mostraron la gran dificultad que existe para lograr cuerpos de ensayo iguales, o sea con la misma porosidad, a pesar del gran cuidado que poníamos en su preparación.

Pensando en esta dificultad tratamos de efectuar los estudios referentes a los cambios químicos sobre cuerpos de una gran porosidad, de manera que se pudiese regular exteriormente la velocidad del líquido que filtra por medio de una llave o de un tubo capilar.

Sin embargo, desistimos de esta modificación, en primer lugar, por no alejarnos mucho del proceso tal como se verifica en la realidad, y en segundo lugar, por haber observado que aun cuerpos que en el primer momento daban un litro por hora de agua de filtra-

ción, fácilmente llegaba a disminuir su porosidad más de lo debido. Por otra parte, nos ha parecido de gran

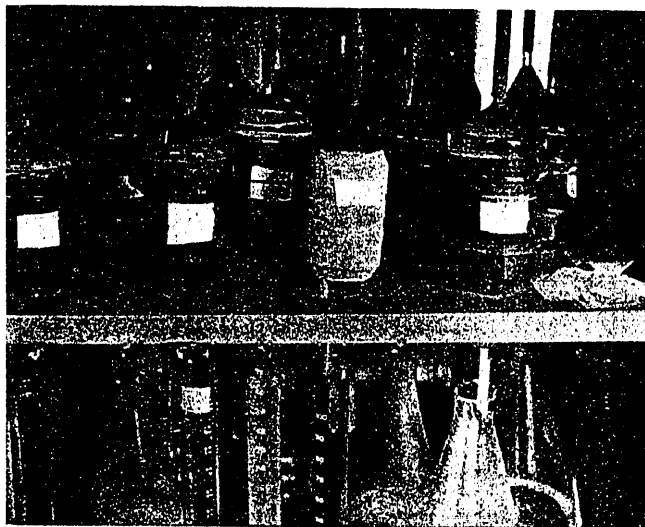


Foto 2.

interés poder observar las relaciones que puedan existir entre las concentraciones y las cantidades de los líquidos filtrados.

Isidro PARGA-PONDAL
y Siegfried BAENTSCH

Funiculares aéreos para el transporte de personas¹

III

En los dos artículos precedentes hemos escrito sobre los principios generales y las modernas tendencias en la instalación de un funicular. Hoy vamos a ocuparnos de los detalles de la construcción de las estaciones, instalación de fuerza, cabinas, castilletes y demás elementos constituyentes de una construcción de esta clase.

La instalación de la estación motriz no es indiferente, y debe ser siempre la superior, y así lo exigen los reglamentos en los países en que éstos se han publicado, que no son muchos; pero, a pesar de ello, esto no es posible, y a veces la estación motriz es la estación intermedia (cuando existe) o la estación inferior, como ocurre en los funiculares del Zugspitz y del Brévint. La razón principal de ello es la imposibilidad de elevar hasta lugares inaccesibles pesada maquinaria, que no es de fácil transporte, a pesar del uso de los funiculares auxiliares que paralelamente a la línea se suelen montar en estos casos para elevar los materiales de construcción. Por lo general, pues, la estación inferior es la más simple desde el punto de vista mecánico, pues, aparte de los pozos para el alojamiento de los contrapesos, ninguna otra instalación se necesita. La profundidad de estos pozos es, naturalmente, función de las oscilaciones de

los contrapesos, cuyo movimiento, hacia abajo o hacia arriba, corresponde en cada momento a una posición determinada de las cabinas a lo largo del trayecto. Esta profundidad suele variar entre los 7 y los 12 m.

La necesidad de guiar en sus movimientos las poleas tensoras de los cables tractores, de las cuales

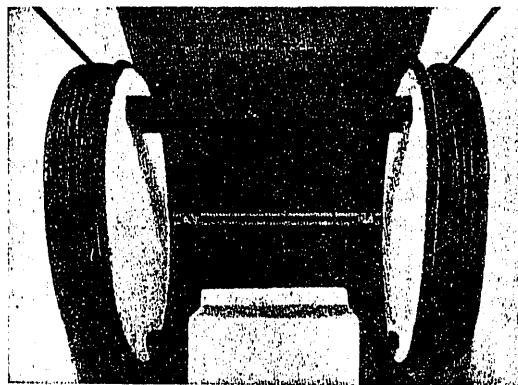


Foto A. Amarrado del cable-vía. Disposición tipo empleada por Bleichert

cuelgan sus correspondientes contrapesos, se aprovecha para marcar en las guíaderas una escala que permite observar la amplitud de los movimientos de deslizamiento de los cables citados.

En la estación superior se amarran los cables-vías

¹. Véase el número anterior, página 485.