

cual puede medirse la altura alcanzada por el agua en los mencionados tubos.

Por último, en el cuerpo de la presa y a la cota 595 se han dejado dos tubos (uno de ellos se señala en el perfil de la figura 1.^a) cerrados aguas arriba por medio de compuertas y aguas abajo con bridas ciegas; de este modo, en el próximo estiaje, y antes de comenzar el hormigonado de la base del cimiento de la

presa, puede desaguar el pequeño embalse creado por la ataguía y dejar en seco la galería de cota más baja para su inspección.

Dejamos para un segundo artículo el examen de los medios auxiliares e instalaciones que se han empleado en la ejecución de estas obras, para completar la esquemática reseña que de las mismas hacemos.

Manuel ECHANOVE
Ingeniero de Caminos

Tracción eléctrica

La línea aérea y las tomas de corriente del Metropolitano Alfonso XIII, por Carlos Laffitte, ingeniero industrial, subdirector del Metropolitano Alfonso XIII.

PRIMERA PARTE

ESTUDIO DE LA LINEA AEREA

Consideraciones generales y resumen

Al proyectar el Metropolitano Alfonso XIII se adoptó la alimentación por línea aérea, al contrario de lo que hasta entonces se había hecho, puesto que el empleo del tercer carril era general entre los ferrocarriles de esta clase. Las razones en que se apoyó esta elección fueron, sin duda, el evitar las molestias y el peligro que ofrece el tercer carril tanto para el personal encargado de la conservación de la vía como a los viajeros, cuando por causa de accidente descienden a la vía, y la mayor sencillez del sistema de alimentación por línea aérea, que se suponía con fundamento había de traducirse en mejor servicio y entretenimiento más sencillo. Contribuyeron también a esta elección los informes facilitados por los ingenieros del Ferrocarril Metropolitano Nord-Sud, de París. En este ferrocarril se utilizó el sistema de distribución a tres hilos, estando constituido el hilo neutro por la vía y los positivo y negativo por un hilo aéreo y un tercer carril; es, por tanto, una instalación en la que pueden compararse los dos sistemas en igualdad de condiciones; de dicha comparación, hecha durante bastantes años de explotación, se deduce, según los ingenieros de la Compañía, una superioridad manifiesta de la línea aérea.

Posteriormente se ha utilizado también la línea aérea en el Gran Metropolitano de Barcelona y en la electrificación de varias secciones de las grandes líneas españolas, lo que demuestra que fué acertada la elección del sistema de alimentación en el caso que nos ocupa.

Una vez adoptada la línea aérea, cabía elegir para su construcción la suspensión ordinaria o transversal y la catenaria o suspensión longitudinal. Esta última es la universalmente adoptada en las líneas de ferrocarriles de superficie, y sus ventajas son bien conocidas, especialmente cuando se trata de líneas recorridas por trenes rápidos. Tratándose de una línea enteramente subterránea, donde se pueden multiplicar con poco coste los puntos de suspensión, en que la temperatura es casi constante, y de un servicio a velocidad moderada, desaparecen en gran parte, si no del todo, las ventajas de la suspensión cate-

na, y éstas fueron, sin duda, las razones de que se prescindiera de ella, adoptando la ordinaria, que es más sencilla, y cuyos resultados en el Nord-Sud habían sido, según los informes de los ingenieros de la Compañía, completamente satisfactorios.

Los resultados obtenidos en el Metropolitano Alfonso XIII son también muy satisfactorios y demuestran el acierto de los ingenieros que estudiaron este ferrocarril al adoptar las disposiciones indicadas.

Al hacerse cargo el que suscribe este artículo de la Jefatura de la Explotación del Metropolitano—lo que sucedió en los principios de la misma—ocurrieron algunos accidentes, tales como la rotura de los transversales de suspensión, que a veces traían como consecuencia la del hilo de trabajo y la interrupción del servicio; se observaron también desgastes excesivos del hilo de trabajo que reducían su vida en algunos vanos de un modo inadmisibles. El remedio de estos defectos fué sencillo. Se observó pronto que la rotura de transversales se presentaba en vanos reducidos y en aquellos en los que existía desnivel entre los puntos de apoyo; se reforzaron los transversales en estos puntos peligrosos, con lo que se hicieron muy raras las roturas de transversales. En cuanto al desgaste del hilo, se presentaba en vanos normales de doble conductor, de los cuales se prescindió por no ser indispensables, y se corrigió el desgaste. A pesar de lo expuesto, y considerando la importancia que en un servicio como el del Metropolitano tiene el evitar las interrupciones, creímos de interés investigar las causas de los fenómenos expuestos, que no encontramos explicada en los tratados ni en las revistas dedicados a la tracción eléctrica. El resultado de esta investigación lo damos en la segunda parte de este trabajo, dedicada a la teoría de la línea aérea y descripción de la del Metropolitano, en la cual demostramos que los fenómenos de referencia son debidos a los rozamientos y defectos de construcción de las tomas de corriente que en un principio se utilizaron, y se traducen en que existe una diferencia notable entre el esfuerzo que éstas desarrollan en el sentido ascendente y el necesario para hacer descender las tomas de corriente.

En dicha segunda parte se ve claramente que en los vanos en los que se produce al paso de las tomas de corriente una contraflecha, al llegar éstas al punto alto tienden a mantenerse los frotadores en una horizontal, por no ser suficiente la presión de la línea

para que descendan hasta la proximidad del apoyo en donde descenden rápidamente, siendo muy considerables las aceleraciones verticales y, por tanto, los esfuerzos sobre la línea, que al repetirse frecuentemente son causa de la rotura del transversal. Se explica de modo análogo el desgaste excesivo del hilo de trabajo, debido a insuficiencia de presión de la toma sobre la línea en la proximidad de los apoyos, originada por la misma causa. En esta parte se describen también las disposiciones adoptadas en la línea aérea del Metropolitano.

Se deduce de lo anteriormente expuesto la conveniencia de sustituir las tomas de corriente primitivamente adoptadas por otras que no ofrezcan los inconvenientes señalados, y éste es el objeto de la tercera parte, dedicada al estudio de las tomas de corriente y descripción de las utilizadas en el Metropolitano.

SEGUNDA PARTE

TEORIA DE LA LINEA AEREA DE SUSPENSION SENCILLA

En el estudio siguiente se empieza por determinar la forma de la línea en reposo, las modificaciones que sufre al aplicarse a ella un aparato de toma de corriente y la trayectoria descrita por el punto de contacto de ambas durante el movimiento del vehículo. De esta trayectoria se deducen las aceleraciones verticales de la polea o frotador de la toma; el conocimiento de éstas unido al de la masa equivalente de la polea o frotador, que más adelante se determina, permiten deducir los esfuerzos de la toma de corriente sobre la línea y estudiar de un modo racional los elementos de esta última.

Línea en reposo.—La forma de la línea puede asimilarse de ordinario, suponiendo los apoyos a nivel, a una parábola de eje vertical cuya ecuación referida a la línea de apoyos como eje de las x y a la vertical

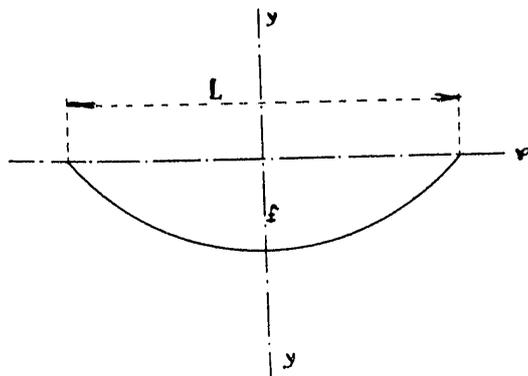


Fig. 1.^a

trazada en la mitad del vano como eje de las y (figura 1.^a), es

$$x^2 = 2q(f - y)$$

La flecha f en la mitad del vano es $f = \frac{\phi L^2}{8T} = \frac{L^2}{8q}$ siendo L el vano y $q = \frac{T}{\phi}$ la relación entre la tensión del hilo y su peso por metro, que es la subnormal de la parábola y el radio de curvatura de la misma

en el vértice y sólo depende de la tensión unitaria del hilo. Para la tensión de 7 kg por mm² adoptada en el «Metro» de Madrid, $q = 777$ m.

Línea en servicio.—Supongamos (fig. 2.^a) que en un punto c de abscisa X de un vano de apoyos invariables y al mismo nivel se aplica una toma de corriente; ésta cederá en el punto c y afectará la forma de dos parábolas de eje vertical que se cortan en este punto. Para determinar la deformación de la línea al aplicar a ella la fuerza P , observemos que la falta de rigidez de los apoyos del hilo en el sentido

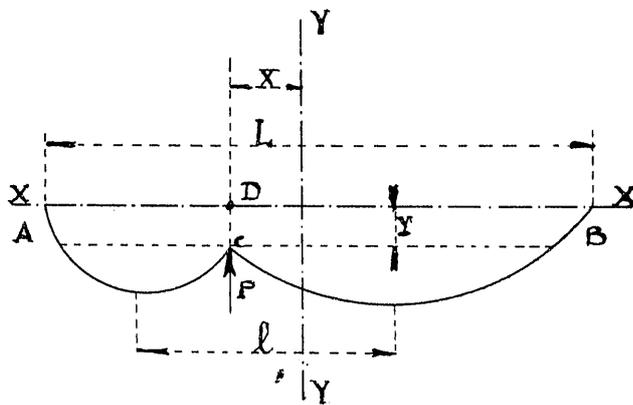


Fig. 2.^a

horizontal hace que la tensión de éste permanezca constante. En estas condiciones se demuestra fácilmente que el desplazamiento vertical del hilo de trabajo en el punto de aplicación de P , que es el que define la flexibilidad de la línea en dicho punto, viene dado por la relación

$$d = \frac{M}{T}$$

en la que M es el momento flector a que daría lugar el esfuerzo P en la sección CD de una viga recta AB de luz L .

La flexibilidad de la línea vendrá, por tanto, determinada por la ecuación

$$d = \frac{P}{LT} \left(\frac{L^2}{4} - X^2 \right)$$

La flexibilidad es nula en los apoyos ($X = \frac{L}{2}$) y máxima en el centro e igual a $\frac{PL}{4T}$.

Para determinar la trayectoria del frotador de la toma de corriente observemos que para la abscisa X la ordenada de la trayectoria es $\bar{Y} = y - d$, en la que d viene dado por la relación anterior. La ecuación de dicha trayectoria es:

$$X^2 = 2Q(F - Y) \tag{1}$$

en la que:

$$Q = \frac{T}{\phi - \frac{2P}{L}} \quad y \quad F = \frac{\phi - \frac{2P}{L}}{T} \frac{L^2}{8}$$

Si llamamos l a la longitud de hilo de trabajo de peso ϕ , tendremos:

$$Q = q \frac{L}{L - 2l} \tag{2} \quad y \quad F = f \frac{L - 2l}{L} \tag{3}$$

correspondiente a $l = 2L$, puesto que en este punto E la presión de la línea sobre la toma será suficiente para determinar el descenso de ésta. La trayectoria del frotador es la línea mixta BED , que forma en E un ángulo al que corresponde una aceleración vertical y, por tanto, un esfuerzo infinito, que explican perfectamente los fenómenos observados. Es claro que el ángulo vivo representado en el punto E no se produce en la realidad, pues a ello se opone la rigidez del hilo y el tener los frotadores una cierta longitud de apoyo en la línea, a lo que hay que agregar en el caso presente la circunstancia de ser cuatro los frotadores. Todo ello conduce a que los esfuerzos, aunque importantes, sean limitados. Para formarnos una idea de su valor, supongamos que entre los puntos E y D el movimiento es uniformemente acelerado, con lo que determinaremos un límite inferior del valor de la aceleración y del esfuerzo correspondiente. Empecemos por determinar la posición del punto E . La abscisa X de este punto viene dada por la ecuación [1]:

$$X^2 + 2Q(Y - F) = 0$$

en la que

$$Q = q \frac{L}{L - 2l} = -\frac{9}{3} \quad \text{y} \quad F = f \frac{L - 2l}{L} = 3f$$

Se tiene, por tanto, para

$$Y = EE' = -0,013$$

$$X^2 - \frac{2}{3} q(3f - f) = 0$$

siendo $q = 777$ y $f = 0,013$, se obtiene $X = 3,67$. La aceleración del movimiento del frotador entre E y D se deduce de

$$Y = \frac{j t^2}{2} = \frac{j}{2} \left(\frac{DE'}{V} \right)^2$$

de donde

$$j = \frac{2V^2 Y}{\left(\frac{L}{2} - X \right)^2}$$

Para $V = 13,9$ se obtiene:

$$j = 7,3 \text{ m} \times 1''^2$$

Esta aceleración es considerable y el esfuerzo de inercia correspondiente es del orden de $\frac{50}{9,81} \times 7,3 = 37$ kg; es decir, bastante importante. Ahora bien, el esfuerzo total del frotador sobre la línea es de $37 + 18 = 55$ kg, y la curva DE se ha determinado para un esfuerzo de 18 kg; se ve, por tanto, que la forma de esta curva es distinta de la supuesta, y desde luego debe bajar más bruscamente de modo que el límite inferior del valor de la aceleración y del esfuerzo es muy superior al calculado; verdad que hemos supuesto, en cambio, los apoyos invariables, y en la práctica permiten, en general, algún desplazamiento vertical; agotado éste en algunos casos, lo expuesto explica claramente, a nuestro juicio, los esfuerzos anormales que se producen en algunos

puntos y que ocasionan la rotura de los transversales de apoyo de la línea.

La teoría anterior indica que el peligro de estas roturas es mayor en vanos reducidos y en aquellos en los que haya disminuido la tensión del hilo o—lo que es igual—aumentado su flecha, porque la aceleración es proporcional a ésta. También se demuestra fácilmente que se producen aceleraciones y, por tanto, esfuerzos anormales cuando existen desniveles de importancia entre los apoyos, que aumentan el recorrido vertical de la toma de corriente y equivalen además, en cierto modo, a una reducción del vano contiguo al apoyo inferior. La experiencia ha confirmado estas deducciones, pues todas las roturas se han producido en vanos comprendidos en los casos indicados, y esta circunstancia permitió reducir rápidamente el número de los accidentes acudiendo al refuerzo de los transversales en los que era de temer, por las circunstancias explicadas, la rotura. El remedio consistió en sustituir el alambre de acero de 6 mm, utilizado en un principio, por un cable de 19 hilos de 1,5 mm de diámetro cada uno y de una resistencia total a la rotura de 3 300 kg. Se eliminó así completamente el peligro de rotura brusca del cable; ésta se producía a veces, sin embargo, paulatinamente, pero daba tiempo a sustituir el cable antes de que el número de hilos rotos pusiera en peligro su resistencia.

El estudio anterior nos indica que las aceleraciones y esfuerzos anormales entre la línea y el frotador de la toma de corriente obedecen a la diferencia del esfuerzo descendente y ascendente de la misma. Los esfuerzos anormales de referencia se traducen unas veces, como se ha dicho, en roturas de los transversales, debido a ser excesivos los esfuerzos de la toma de corriente sobre la línea; otras veces, por el contrario, la presión de la toma es insuficiente para una buena captación de la corriente. Este fenómeno se presentó en los vanos normales provistos de doble hilo, en los que se inició un rápido desgaste en la proximidad de los puntos de suspensión. Dicho desgaste se explica de modo análogo al fenómeno anterior, por ser debido a la misma causa; en este caso la insuficiencia del esfuerzo ascendente de la toma de corriente hace que la captación de ésta se efectúe en malas condiciones en los puntos altos de la línea, o sea cerca de los apoyos. A fin de evitar la destrucción del hilo de trabajo en los vanos de doble hilo, se suprimieron éstos donde no eran indispensables y se redujo su luz donde lo eran, desapareciendo en seguida el desgaste anormal.

La teoría expuesta demostró la conveniencia de estudiar nuevas tomas de corriente que no presentaran los defectos señalados, estudio que reproducimos en detalle en el capítulo siguiente, dedicado a las tomas de corriente. En cuanto a la línea, no se deduce de ella la conveniencia de introducir en su construcción modificaciones esenciales, por lo que seguimos adoptando una disposición general enteramente análoga a la proyectada en un principio, que ha sido sancionada por la práctica, limitándonos a modificaciones de detalle que nos ha sugerido la experiencia de la explotación.

Descripción de la línea aérea del Metropolitano

La disposición empleada en las primeras líneas, que se ha conservado, consiste en el empleo de hilos

transversales de suspensión, sujetos de un lado al túnel y de otro a unos soportes centrales, que sirven también de apoyo a los alimentadores, constituidos por cables desnudos de cobre o aluminio. La distancia entre apoyos se limitó a 18 m en alineación recta, a fin de que la flecha no excediera de 5 cm; en las curvas se determina con la condición de que la separación máxima entre la línea aérea y el eje de la vía no llegue a 0,10 m, que es la amplitud del zig-zag en recta.

El hilo de trabajo es ranurado y de la calidad empleada en tracción; su sección es en la mayoría de las líneas la normal americana 4/0, cuya superficie es de 107 mm²; en las últimas líneas construídas se ha reforzado la sección del hilo de trabajo, adoptándola de unos 150 mm² (sección normal americana de 300 000 «circular mils»), a fin de hacer aún mayor la resistencia mecánica y la duración del hilo; esta sección es la mayor que se ha utilizado hasta ahora para hilo de trabajo.

El soporte central está constituido en las primeras

sigue: los equipos de vía al mismo tiempo que clavan ésta (lo cual se efectúa con herramientas de aire comprimido) abren los taladros de los soportes centrales y colocan los soportes; viene después la nivelación de la vía, y una vez efectuada se colocan los soportes laterales, constituidos también por pernos de expansión, pero en los cuales la altura de amarre no puede graduarse como en los centrales. El equipo de la línea aérea procede entonces al tendido de los alimentadores y a la colocación de los transversales, previamente preparados, que van provistos de garras de sujeción, de dos tensores aislados, uno en cada extremo, y de un soporte central, aislado también, que lleva la grifa de fijación del hilo (fig. 4.^a), con lo que se obtiene el doble aislamiento de la línea. Sólo queda entonces el tendido y tensado del hilo, que se efectúa como de ordinario.

Para la ejecución de los trabajos existen unas instrucciones detalladas en las que se determina los materiales que deben utilizarse en cada caso, así como el modo de emplearlos, a fin de que el perso-

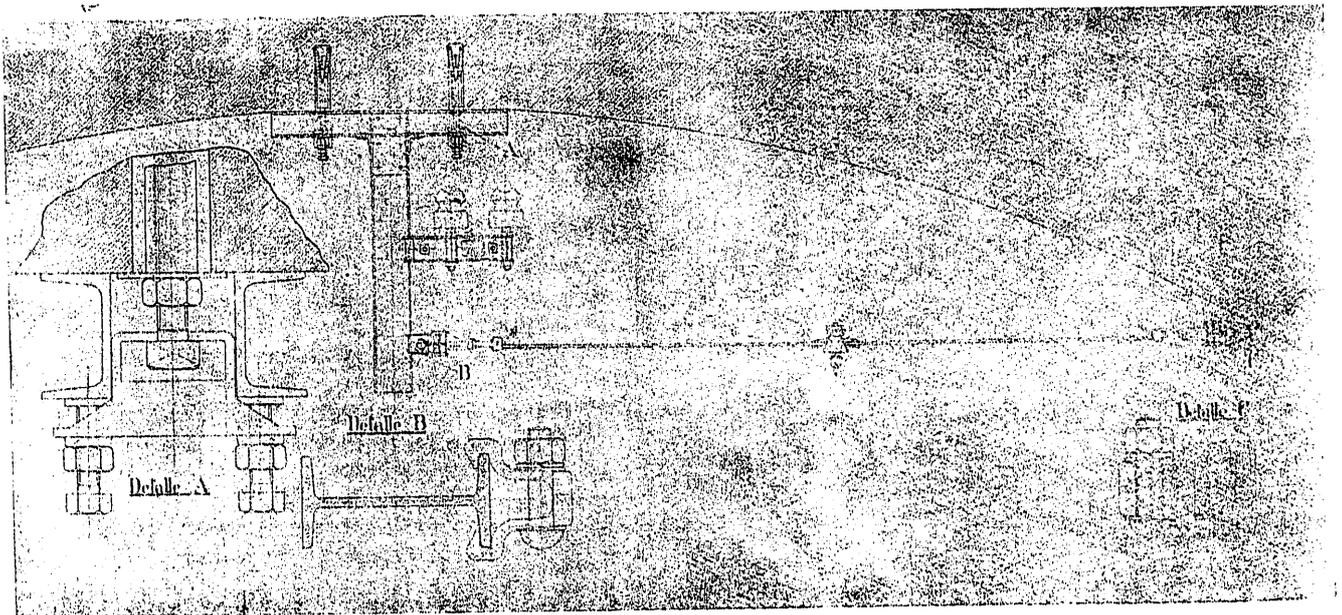


Fig. 4.^a Suspensión del hilo de trabajo

líneas por dos 'T' de 60 mm, provistas de tornapuntas y de un travesaño, sobre el que se apoyan los alimentadores; después hemos adoptado un soporte central en doble 'T' de 12, cuya anchura de alas es igual a la de la 'T' de 6. Los alimentadores se apoyan en una cruceta o en soportes sujetos a las alas de la doble 'T' (fig. 4.^a). De este modo es más fácil la instalación de los alimentadores, que antes quedaban encerrados entre las dos 'T', y se aumenta además la longitud de los hilos transversales y, por tanto, la flexibilidad de la suspensión.

La fijación de los soportes se efectuó al principio por empotramiento en la fábrica; posteriormente hemos adoptado la fijación por medio de pernos de expansión (*expansion bolts*), que ofrecen la ventaja de que su instalación es rápida, pues hechos los taladros con barrenas de aire comprimido se colocan en seguida y están dispuestos inmediatamente a soportar esfuerzos, sin tener que esperar, como ocurría antes, al fraguado de la mezcla empleada en el empotramiento.

La construcción de la línea se efectúa ahora como

nal esté siempre perfectamente orientado y no tenga que recurrir a su iniciativa. En las instrucciones se determina la separación de ménsulas en recta y curvas de distinto radio, los anclajes de hilo y de ménsulas, etc.

Conservación de la línea.—Para mantener en buenas condiciones la línea de trabajo es precisa una conservación esmerada, para la cual se han redactado unas instrucciones detalladas sobre las operaciones periódicas de conservación. Estas son de tres clases, que se designan con las letras A, B y C. La A es la visita diaria de la línea, que consiste en un recorrido de toda la línea efectuado por el encargado de la misma o agente autorizado en un vehículo dispuesto para observar el funcionamiento de la toma de corriente. La B, llamada revisión, es semanal para cada trozo de línea y durante ella se efectúa la comprobación de la altura de la línea y del zig-zag del hilo en los puntos que la visita indica como dudosos, así como la medida de la flecha de los vanos del hilo de trabajo y de los transversales de suspensión cuya tensión parezca excesiva o insuficiente, y

se corrigen los defectos que se noten. En la revisión *B* se examina también el estado del hilo de trabajo, de los transversales, piezas de suspensión, empalme y anclaje, y se corrigen los defectos observados.

La revisión general *C* se efectúa dos días al mes, y es semestral para toda la línea, siendo las operaciones análogas a las de la revisión *B*, con la diferencia que se extienden sistemáticamente a todos los vanos y puntos de suspensión, comprobándose la altura, el zig-zag, la sección del hilo, etc. Durante esta operación se comprueba el aislamiento de la línea: primero la de las piezas de suspensión, conectando una lámpara entre el transversal y tierra con la línea en tensión; luego los tensores aislados, conectando la lámpara entre el hilo de trabajo con tensión y el transversal. Se sustituyen las piezas defectuosas y se limpian, pintan y engrasan las demás.

Las operaciones de conservación se facilitan con el empleo de torres automotoras con motor de gasolina, que permiten transportar rápidamente el personal y los materiales empleados. A fin de estimular al personal de recorrido en su labor de revisión, tan importante para evitar averías, se le da una prima al transcurrir tres meses sin avería alguna, prima que va aumentando hasta llegar a un año, si continúa el servicio normal de la línea aérea, y permanece constante mientras continúa dicha normalidad, anulándose si se produce alguna avería en servicio.

Las disposiciones indicadas han resultado muy eficaces hasta el punto que las averías, en la línea aérea son verdaderamente excepcionales, transcurriendo

generalmente muchos meses y a veces hasta un año sin que se presenten en toda la red, a pesar de ser muy duro el trabajo de nuestra línea aérea, por la frecuencia de los trenes, la potencia de los motores y la tensión adoptada, que es, como hemos dicho, de 600 voltios, lo cual determina intensidades máximas de arranque del orden de 1 400 amperios por tren de cuatro unidades.

Organización de socorro.—Por raras que sean las averías, es preciso estar preparado para corregirlas y reanudar rápidamente el servicio. Cuando se produce una avería de alguna importancia, queda la línea sin corriente y detenidos los trenes; de modo que no puede acudir por la línea con los elementos de socorro y se necesita disponer de elementos reparados por la línea o llevarlos por la superficie.

Entre los primeros (de la línea) se dispone en todas las estaciones de escaleras que, unidas a la herramienta portátil del personal de guardia, cuya obligación es dirigirse por el medio más rápido al lugar de la avería, permiten reparar, a veces sin interrupción del servicio, pequeñas averías o efectuar un arreglo provisional de otras de mayor importancia. En los puntos en que se dispone de sitio existen además unas torres fáciles de encarrilar, que son de utilidad si la avería se encuentra próxima a dichos puntos. Entre los segundos (de superficie) tenemos una camioneta-automóvil provista de herramental completo y de una torre desmontable que se arma rápidamente y nos ha sido de gran utilidad en algunos casos.

Con lo expuesto damos por terminado nuestro estudio sobre la línea aérea del Metropolitano Alfonso XIII, y dejamos para un próximo artículo el de las tomas de corriente de dicho ferrocarril.

Notas de un viaje a Norteamérica

No da un mes de estancia en Norteamérica tiempo para poder formar juicio exacto de su enorme organización de trabajo; no han de ser los que emitamos, por esta causa, dejada aparte nuestra incompetencia para ello, definitivos, sino que en las siguientes líneas encontrará el lector únicamente una serie de observaciones sueltas sobre distintos problemas de ingeniería y especialmente sobre los modernos firmes de las modernísimas carreteras de aquel país, objeto principal de nuestro viaje.

Aspecto ingenieril de conjunto.—La primera impresión para el ingeniero español, europeo, si se quiere, es abrumadora: el conjunto de la organización americana de trabajo es realmente colosal para nuestros hábitos. Fábricas enormes, puerto colosal, movimiento más colosal aún; unido a esto, hoteles para descansar, de treinta pisos, donde le trasladan a uno a su celda de aquella colosal colmena en ascensores expresos que acaban por ayudar a que nuestra pobre inteligencia se encuentre en pleno vértigo a las pocas horas de pisar tierra americana.

La primera dificultad con que se tropieza es poder aislarse de este vértigo y tranquilamente analizar todo aquello con calma para ir de aquel artefacto colosal entresacando lo bueno y lo malo, lo absurdo y lo racional. Cuando logra uno *pararse*, la primera im-

presión es de desilusión. Es América todavía país algo de ensueño; no se va a Nueva York como a París o a Londres, y claro está que al afortunado que lo logra le *sienta muy bien* contar de aquello mil fantasías que aumentan la leyenda que la *réclame* americana, en la cual son maestros, ha formado en torno de su cultura y su organización. Tiene esta última una característica especial significadísima: es la especialización exagerada, que evidentemente repercute en un aumento de producción, pero que redundante, evidentemente también, al convertir al hombre en un tornillo de aquella máquina colosal, en perjuicio de la cultura general de las clases elevadas que, únicamente en su mayoría, claro está, se han preocupado de fomentar su inteligencia en la rama *determinadísima* a que están asignados en el mecanismo de la producción.

La abundancia de medios económicos, el poco valor del dinero, hacen que muchas soluciones no sean ingenieriles, en el sentido ingenieril de la solución económica, que nunca debe perderse de vista, y que se ve completamente anulada por la solución rápida que en muchos casos es la única que se persigue. Nos asombrábamos en Washington de la cimentación de un firme de hormigón sobre arcilla, exponiendo tímidamente nuestro temor de movimiento