

la exacta longitud del túnel, pues habiéndose de verificar el encuentro de las galerías en las proximidades de la horizontal cumbre, todo se reducía á acortar ó alargar ésta en la misma cifra que como error de longitud se alcanzara. Las previsiones se han confirmado: si se hubieran sumado todos los errores de puntería, refracción, etc., se hubiera obtenido un error de 0,30 metros en la alineación; pues bien, no ha llegado á seis centímetros, lo cual prueba evidentemente que ha habido compensación. En cuanto á la longitud, el error ha sido de 7 metros, y en lo relativo á la rasante, de 0,21 metros, que es lo que corresponde á los 7 metros al 3 por 100 de pendiente. El error de longitud ha sido favorable á la Administración, pues ha resultado el túnel 7 metros más corto de lo que se suponía y, por lo tanto, la galería Norte ha quedado 0,21 metros más alta que la Sur en el encuentro. Mas como la altura de esa galería es sólo de 2,60 metros, cifra que es justamente el radio del intradós del revestimiento y luego habrá de excavar el espesor de éste, resulta que tendrán que quitarse en la clave 21 centímetros menos del espesor á dar, espesor que variará de 1,25 á 1,50 metros. No se ha excavado, pues, inútilmente ni un solo metro cúbico, y el único error, ó sea el de longitud, ha sido una agradable sorpresa, pues representará una economía de 70.000 pesetas sobre el presupuesto de excavación y revestimiento; la horizontal-cumbre será de 133 metros en vez de 140, y aquella longitud es tres veces mayor que la tangente de la curva vertical de unión de la rampa de 0,03 con la horizontal.

En planta el error ha sido minúsculo y menor que en la generalidad de los túneles, incluso el de Canfranc: sólo de seis centímetros. Después de calado el túnel se ha unido por una recta el centro de la bóveda en la progresión Sur 2.132 con el centro de la misma en la progresión Norte 902 y el ángulo de esa alineación con las dos del revestimiento construido en los ataques Norte y Sur resulta de sólo cuatro minutos centesimales.

El personal que ha trabajado en la perforación del túnel desde Agosto hasta el día del calamiento ha sido de unos 250 obreros repartidos en la boca Sur en seis brigadas de avance y ensanches, una de bloques, dos de machacadora y hormigonera, una de vía y otra para servicios generales, como almacén, maquinaria, talleres, transportes, etc. En la boca Sur sólo había dos brigadas de avance y la de servicios generales.

El encuentro de los dos avances Norte y Sur se logró no por voladura sino por perforación; una pareja encargada de un martillo neumático colocó un pistolete de 3,90 metros de longitud que salió justo en el centro del frente del avance Norte; unos cigarrillos pasados con el aire comprimido á través de ese agujero de 3 metros fueron todo el bautizo del túnel en el que no se ha empleado ciertamente el *champagne* que se derrochó en los túneles del Simplón y de Jötberg. El Estado sólo ha abonado como premio á los obreros el jornal del día del calamiento y en vez de la acostumbrada comida extraordinaria de estos casos se han entregado 10 pesetas de gratificación á cada obrero, siendo de notar que existen muchos que llevaban seis y siete años en esta obra y que no ha habido huelgas ni algaradas. Las obras de Tosas no ofrecen el aspecto ordinario de esta clase de trabajos, que suelen ser realizados por obreros de carácter aventurero y díscolo propio de quien acude sólo con el cebo de grandes jornales. No: aquí la organización es más patriarcal y semeja en algo á la que anteriormente existía en las orillas del Ter y del Llobregat en las numerosas fábricas de hilados que hoy van desapareciendo.

En la actualidad se está construyendo con rapidez la bóveda que se calcula pueda quedar terminada en Septiembre próximo, y la totalidad del túnel en la primavera de 1921, es decir, dos años antes de lo que se había propuesto y seguramente con gran economía para el Estado.

Diffícilmente podrían presentarse en la carrera del Ingeniero obras más difíciles y comprometidas que las del túnel de Tosas. No sólo por la índole propia del trabajo, sino por la naturaleza del terreno y por la inclemencia del clima, que llega á temperaturas de -25° C., siempre ha constituido un problema de arriesgada solución. Cuando se entraba en el túnel con poquísima luz, moviéndose dos trenes en ambos sentidos funcionando los compresores y ventiladores en medio de un ruido atronador que apenas permitía se oyesen las conversaciones, tropezando casi continuamente con un dédalo de entibaciones que por sí mismo asustaba más aún que todo lo que se defendía y sufriendo las más veces las caricias de una lluvia glacial, el ánimo quedaba completamente aniquilado y la idea de salir de aquel infierno cuanto antes era la única que se presentaba á la imaginación.

Hoy todo ha cambiado; las obras adelantan con rapidez y la organización ha mejorado en términos tales que el obrero bien pagado, cuidado y atendido en sus necesidades, no sólo no piensa holgar en Tosas, sino que es el mejor amigo y compañero del Ingeniero. Por ello entiendo que esta enseñanza práctica es importantísima; los Ingenieros de Caminos deben construir los ferrocarriles directamente á las órdenes del Estado, pues cuando éste atiende á las necesidades de las obras satisfaciendo sus créditos éstas avanzan y se construyen más y mejor que cuando se entregan á un contratista ó concesionario.

Y como, para terminar, y torciendo el lema que pone Bour en el prólogo de su libro de *Mecánica racional*, yo puedo decir con relación á Tosas: *Nulla pars mei*, quedo con libertad para estimar como merece el éxito de esta labor que pertenece al Ingeniero don Ramón Martínez de Velasco. Acertadamente le han secundado los Ingenieros D. Fernando Moreno y D. Luis Caballero de Rodas, así como el malogrado Ayudante D. Alvaro Marco, recientemente fallecido, modelo de subalternos, honradísimo, activo é inteligente, y los Sres. D. César Colis y D. Miguel Lapuerta, Ayudante el primero y Sobrestante el segundo, que tuvieron la suerte de estar en el túnel cuando se consiguió romper la barrera que separaba la Cerdaña del valle de Ribas y que tanto tiempo había constituido un problema de difícil solución para estos ferrocarriles transpirenaicos ya hoy resuelto afortunadamente.

JOSÉ M. FUSTER.

Esta Revista felicita entusiastamente al Sr. Fuster y á todo el personal que cita en su interesante artículo, por el feliz éxito alcanzado y los trabajos desarrollados en tan importante obra.

NOTA

SOBRE LA CORROSIÓN DE LOS TUBOS DE LOS
CONDENSADORES DE SUPERFICIE ALIMENTADOS
POR AGUA DE MAR

POR

G. COSTESEQUE

Director de la fábrica del Cap Pinède de la Compañía de Electricidad de Marsella.

Todos los que explotan centrales eléctricas instaladas al borde del mar y que utilizan el agua de éste para circulación por los condensadores de superficie, han tropezado con graves inconvenientes causados por la corrosión de los tubos de los condensadores. El autor de la nota que damos á continuación, director de la fábrica del Cap Pinède de la Compañía de electricidad de Marsella, señala todos los accidentes que se han producido en esta lábrica por el hecho de la corrosión de los tubos bajo la acción del agua del mar y expone los medios que se emplearon para remediar el mal y los resultados obtenidos.

La presente nota no tiene por fin la discusión de las razones ni el mecanismo de la corrosión de los tubos de condensadores

por el agua del mar, sino solamente hacer el historial de los condensadores de superficie de la fábrica central del Cap Pinède, en Marsella, indicando los medios que para cada uno de ellos han permitido contener las corrosiones molestas, con la esperanza de poder ser de utilidad para todos aquellos que tienen que sufrir estos inconvenientes.

La fábrica del Cap Pinède comprende siete turboalternadores, cuatro de 1.800 kilovatios y tres de 6.000.

Los primeros instalados fueron, al final de 1906, los dos grupos de 1.800 kilovatios, actualmente clasificados con los números 3 y 4; á continuación, y puestos en funcionamiento, poco después los otros dos grupos de 1.800, números 1 y 2, y después, sucesivamente, los grupos de 6.000, números 5, 6 y 7.

Los métodos de protección empleados actualmente para los condensadores de cada uno de estos grupos son diferentes, porque la práctica ha demostrado que adoptando para una nueva máquina una disposición que había dado buen resultado en las puérras ya en servicio, no se aseguraba de modo alguno el éxito y cada vez ha sido preciso llevar á cabo modificaciones á veces radicales, para contener por fin las corrosiones.

Estas corrosiones exigían no solamente frecuentes cambios de los tubos, sino que también tenían por consecuencia graves degradaciones de las turbinas y ocasionaban perturbaciones molestas para el servicio, como más adelante se precisará.

Del modo que es preciso variar los medios de defensa, al pasar de un condensador á otro, aparecerá con mayor claridad haciendo separadamente el historial de cada caso.

I. **Historial de las disposiciones tomadas.**—1.º *Grupos 3 y 4.*—Estos grupos, que fueron los primeros puestos en funcionamiento, tienen condensadores de 350 metros cuadrados de superficie refrigerante; los tubos son de latón con el 70 por 100 de cobre, según creemos, y estañados. Se mantienen en las placas tubulares por prensaestopas.

Al ponerse en funcionamiento no existía en ellos ninguna disposición de protección contra las corrosiones.

La primera perforación se observó al cabo de cuatro mil horas de funcionamiento. A continuación se hizo sentir cada vez más la acción del agua de mar, sucediéndose las perforaciones cada vez con más frecuencia, haciéndose absolutamente necesario la adaptación de un sistema cualquiera de protección.

La disposición adoptada consiste en siete placas de cinc fijas sobre cada una de las placas tubulares, ó sea en total catorce placas rectangulares de $300 \times 150 \times 25$ milímetros, cuya superficie activa total es de 10.800 centímetros cuadrados (aproximadamente 31 centímetros cuadrados por metro cuadrado de superficie condensadora).

Esta protección fué eficaz; desde su instalación únicamente se han perforado unos veinte tubos anualmente.

2.º *Grupos 1 y 2.*—Los condensadores de estos grupos son idénticos á los de los precedentes. Las perforaciones observadas en los dos primeros años hicieron que se colocase iguales placas en sus condensadores antes de ponerlos en funcionamiento. El resultado fué excelente.

En la actualidad llevan, respectivamente, catorce mil y diecinueve mil horas de funcionamiento.

El primero no ha tenido jamás un tubo perforado.

El segundo ha tenido una decena solamente.

3.º *Grupo 5.*—Este grupo de 6.000 kilovatios tiene en su condensador tubos de industria francesa, contienen un 66 por 100 de cobre, según nos han dicho, y están estañados. Los tubos se mantienen por prensaestopas. Su superficie total es de 1.200 metros cuadrados. El ejemplo de los grupos precedentes indujo á instalar,

antes de ser puestos en funcionamiento, una protección constituida en la siguiente forma:

Por el lado de la entrada: dos placas circulares de cinc de 600 milímetros de diámetro y 20 de espesor.

Por el lado de la salida: dos placas de cinc elípticas, de milímetros 940×450 y 20 de espesor igualmente.

Estas placas están fijas en las puertas de visita instaladas sobre los envolventes.

Después de dos mil trescientas cincuenta horas de funcionamiento se produjeron algunas perforaciones.

Se añadió entonces nuevas placas de cinc para aumentar la superficie total del cinc: por el lado de la entrada, dos placas circulares de 470 milímetros de diámetro, y por el lado de salida, dos placas circulares de 350 milímetros de diámetro y todas de 20 milímetros de espesor como las primeras.

La superficie de cinc se elevó en esta forma á 32.492 centímetros cuadrados, ó sea 27 centímetros cuadrados por metro cuadrado de superficie condensadora, y las perforaciones se redujeron inmediatamente en una gran proporción; posteriormente solamente se han observado una veintena de tubos perforados anualmente.

4.º *Grupo 6.*—El condensador de este grupo es idéntico al precedente como dimensiones y como método de montaje de los tubos. Estos son de igual origen y de la misma composición que los del grupo 5. Por esto se colocó desde el principio la protección que finalmente había dado buen resultado para garantizar el condensador del grupo 5, ó sea por el lado de entrada cuatro placas circulares de cinc, de 20 milímetros de espesor, de las que dos de 600 milímetros de diámetro, y por el lado de salida cuatro placas de cinc de 20 milímetros de espesor, de las que dos circulares de 350 milímetros de diámetro y dos elípticas de $940 + 450$ milímetros.

Este condensador lleva en la actualidad veinte un mil horas de funcionamiento y no ha tenido hasta ahora más que una decena de tubos perforados.

5.º *Grupo 7.*—El condensador de este grupo, análogo á los dos de los grupos precedentes y de igual superficie (1.200 metros cuadrados), tenía sus tubos mandrilados en las placas tubulares, en vez de los prensaestopas empleados en los otros condensadores. Estos tubos eran de industria alemana, de latón, con el 70 por 100 de cobre, y estañados.

Por el constructor se instaló una disposición de protección.

Consistía en placas de aluminio fijas sobre las placas tubulares. Estas placas estaban unidas dos á dos, de una placa tubular á la otra, por conexiones en cable aislado que pasaba por el interior de los tubos.

Tenían las dimensiones siguientes:

6 placas de	280	$\times$	120	$\times$	40	milímetros.
12 »	400	$\times$	200	$\times$	35	»
3 »	420	$\times$	125	$\times$	35	»
3 »	520	$\times$	125	$\times$	35	»
4 »	520	$\times$	180	$\times$	35	»

ó sea en total 28 placas que presentan una superficie activa de 37.770 centímetros cuadrados (31,4 centímetros cuadrados por metro cuadrado).

Esta protección (evidentemente inspirada al proveedor por los buenos resultados obtenidos en otra parte) fué completamente ineficaz.

Después de cuatrocientas horas de funcionamiento solamente, se apreciaron perforaciones.

Las placas de aluminio se reemplazaron por otras de cinc dispuestas sobre las puertas de visita como en los condensadores de los grupos 5 y 6. Las dimensiones de estas placas eran:

Por el lado de entrada: cuatro placas circulares, de las que dos de 600 milímetros de diámetro y dos de 500, las cuatro con un espesor de 20 milímetros.

Por el lado de la salida: cuatro placas circulares de 500 milímetros de diámetro y 20 de espesor.

La superficie total de cinc era en esta forma de 34.854 centímetros cuadrados (ó sea 29 centímetros por metro cuadrado).

A pesar de este cambio continuaron las corrosiones con tal rapidez, que después de mil horas de funcionamiento quedó el grupo inutilizado por causa de las perturbaciones producidas en su marcha por el agua de mar mezclada en gran cantidad con el agua de alimentación (más adelante diremos cuáles fueron las consecuencias nefastas de esta introducción del agua de mar).

Un Ingeniero especialista, delegado por el constructor del condensador, atribuyó estas numerosas perforaciones á la acción de las corrientes eléctricas vagabundas.

Hizo aislar eléctricamente el condensador, interponiendo juntas aisladoras en todas las bridas y sus pernos, á continuación hizo instalar un sistema de cables de sección muy grande destinados á desviar estas corrientes.

En fin, hizo poner placas de cinc sobre las placas tubulares, sobre los soportes de las placas de aluminio primitivas.

La protección quedó entonces constituida de la manera siguiente:

Por el lado de entrada: trece placas rectangulares de milímetros $300 \times 150 \times 20$ y dos placas circulares de 500 milímetros de diámetro y 20 de espesor.

Por el lado de la salida: dieciséis placas rectangulares de milímetros $300 \times 150 \times 20$.

Todas estas placas se fijaron en las placas tubulares. Su superficie total era de 33.950 centímetros cuadrados (29 centímetros cuadrados por metro cuadrado).

A pesar de todas estas modificaciones, las perforaciones continuaron con rapidez y fué preciso renunciar á utilizar el grupo para el servicio.

Se tomó entonces el partido de reemplazar la totalidad de los tubos por otros de fabricación inglesa, conteniendo un 70 de cobre, 29 de cinc y 1 de estaño.

Estos tubos no estaban estañados.

Se reinstalaron las placas de cinc sobre las puertas de visita y las disposiciones de protección contra las corrientes vagabundas.

Puesto el grupo nuevamente en funcionamiento, ha asegurado ya diez mil quinientas horas de servicio con una decena de tubos averiados solamente.

II. Protección suplementaria contra la electrólisis.—Para tratar de suprimir, ó por lo menos de aminorar en lo posible la destrucción de los tubos por electrólisis en los condensadores, donde se producían corrosiones á pesar de la existencia de cinc, ideamos hacer pasar en un momento dado una corriente de débil tensión entre las placas de cinc y los tubos.

Esto no fué precisamente una aplicación del procedimiento Cumberland, que por lo demás no lo conocíamos todavía en el momento en que procedimos á hacer esta instalación.

Nuestra instalación es completamente primitiva; hemos aislado sencillamente las placas de cinc existentes por medio de rodajas de ebonita y hemos aplicado una corriente facilitada por una batería de acumuladores entre estas placas de cinc y las placas tubulares de los condensadores.

Para determinar el valor de la corriente utilizada procedimos por tanteos. Partiendo de un valor próximo á cero, lo fuimos aumentando progresivamente. En esta forma comprobamos que los deterioros pasaban por un mínimo para valores variables según los condensadores, pero que estaban comprendidos entre los

límites: 4 V y 0,3 á 0,75 A, en los cuales nos detuvimos, tardamos más de un año en determinar estos valores.

Este procedimiento es ciertamente eficaz, porque hemos observado que cuando por una razón cualquiera su efecto se halla aniquilado (á continuación de un aislamiento de las placas de cinc, por ejemplo), las corrosiones son más numerosas.

Además de esto tomamos la precaución de enlucir frecuentemente con pintura submarina especial el interior de los envolventes de los condensadores.

Bien entendido, no nos descuidamos de limpiar periódicamente, ó mejor dicho, lo más frecuentemente posible las placas de cinc.

El interior de los tubos se limpia cuando es preciso, no con el fin de preservarlos de las corrosiones, sino únicamente cuando se observa, según las temperaturas del agua, que la transmisión del calor se hace más difícilmente. En general, comprobamos mayor número de corrosiones á continuación de un lavado, durante los primeros días de volver á poner en funcionamiento.

III. Consecuencias de la adición de agua de mar al agua condensada.—Las perforaciones producidas por las corrosiones en los tubos de condensador permiten que se mezcle un poco de agua de mar con el agua condensada. Este agua de mar introducida en las calderas ocasiona no solamente una incrustación más rápida de las calderas, sino que principalmente da origen por descomposición de los cloruros á un ácido que, mezclado con el vapor y el agua salada arrastrada, produce la corrosión rápida de las turbinas motoras, la que, como más adelante se verá, puede tener consecuencias muy costosas.

Para evitar estas entradas de agua de mar hemos seguido muy de cerca esta cuestión. Cada dos ó tres horas, y por la vía química, se verifica si el agua condensada contiene agua de mar. Al comprobarse vestigios se hace pasar el grupo lo más pronto posible. Se busca entonces el tubo averiado y se le reemplaza por otro.

Ahora bien, en el momento en que el condensador del séptimo grupo daba lugar á las importantes entradas de agua de mar que hemos señalado, era imposible evitar que se introdujese en las calderas una cantidad relativamente grande, y aunque este grupo no había funcionado más que durante un período de tiempo aproximado á unas ochocientas horas con el haz tubular en mal estado, las consecuencias fueron muy graves para una parte del material.

Las calderas sufrieron poco. No se comprobó nada en los haces vaporizadores, ni en el depósito superior. En estos últimos tiempos hemos observado, sin embargo, corrosiones importantes en algunos tubos del recalentador, en lo que muy bien pudiera tener influencia el agua del mar. Se trata, por lo demás, de daños de poca importancia.

En las tuberías no hemos observado nada anormal.

En las turbinas de álabes de latón, nada anormal tampoco.

En las turbinas de álabes de acero al níquel, los efectos fueron desastrosos.

La turbina del grupo número 7 quedó fuera de servicio después de dos mil horas, aproximadamente, de funcionamiento; por medio de un reequilibrado se consiguió hacerla funcionar en condiciones defectuosas hasta cinco mil horas; pero, desde este momento, hubo que reemplazar los álabes tanto sobre los diafragmas fijos, como los colocados sobre ruedas móviles.

En las otras dos turbinas, que recibían el agua de mar en cantidades más pequeñas, puesto que esto no era casi más que durante el funcionamiento de la tercera, hubo también que reemplazar los álabes, pero después de trece mil y dieciocho mil horas de funcionamiento. Estas importantes reparaciones tuvieron el

inconveniente de inmovilizar los grupos durante grandes períodos. Además resultaron muy caras.

IV. **Conclusiones.** — De todo lo precedente, que es el resultado de constantes observaciones durante un período de diez años, ¿es posible sacar conclusiones generales é indicar un procedimiento capaz de suprimir estas corrosiones?

Hemos comprobado que dos condensadores (números 3 y 4) han funcionado durante cuatro mil horas sin protección alguna contra las corrosiones, antes de haberse observado la primera, mientras que otro condensador (número 7), provisto de tubos de igual composición que los de los grupos 3 y 4 (70-30 y estañados) y en el que se había instalado una protección muy completa, la que además había dado muy buenos resultados en otras ocasiones, dió lugar a perforaciones después de cuatrocientas horas de funcionamiento solamente.

Hemos visto que dos condensadores (números 5 y 6) provistos de tubos de igual composición (66-34 y estañados), fabricados en el mismo establecimiento, pero con un año de intervalo, y dotados de un sistema de protección idéntico, en uno se produjeron corrosiones y en el otro no.

En los condensadores (3 y 4) disminuyeron considerablemente las corrosiones cuando instalamos placas de cinc; en otro (número 7) ningún sistema de protección logró evitar las corrosiones; los tubos son, por lo tanto, de igual composición que los de los precedentes (70-30 y estañados).

En este último condensador (número 7) tuvimos que cambiar completamente el haz tubular (los nuevos tubos son de 70-29-1 y no estañados), pudiendo decirse que en la actualidad casi no existen corrosiones.

En fin, tenemos dos condensadores (números 1 y 2) provistos desde el origen de placas de cinc en los que en uno de ellos descubrimos perforaciones y en el otro no, después de un número importante de horas de funcionamiento.

Hemos presentado una serie de resultados muy distintos y también contradictorios, obtenidos en una misma fábrica, con instalaciones idénticas, en condensadores colocados, por decirlo así, uno al lado de otro y siendo el agua de refrigeración del mismo origen. No puede, por lo tanto, fijarse un modo preciso de proceder y mucho menos si se trata de aplicar un sistema de protección universal.

¿Qué conclusión podemos sacar de ello? Existe evidentemente un fenómeno electrolítico, puesto que las placas de cinc añadidas han acabado en todos los casos (añadiendo una ligera corriente) por asegurar una protección relativa, pero prácticamente suficiente. Ahora bien, la intensidad de este fenómeno de corrosión electrolítica no depende de las disposiciones de construcción del condensador, puesto que el cambio de haz permite mejorar la situación.

Es preciso, por consiguiente, deducirse de ello que hay un latón y otro latón y que los tubos de composición centesimal análoga, con ó sin estañado, son más ó menos resistentes á la corrosión, lo que hace presentir el muy importante papel que desempeña la estructura interna del metal, ya indicado por E. Raymond, Ingeniero Jefe de las Mensajerías marítimas (*Engineering* del 27 Julio 1917).

Si la importancia de la estructura interna del metal resulta en esta forma responsable en gran parte de la rapidez de la corrosión, nada preciso se ha indicado todavía respecto á la elección de la naturaleza del metal y de su obtención, cosa que sería muy de desear desde el punto de vista práctico.

En espera de ello, nuestra conclusión es que en cada caso particular, aun dentro de una misma fábrica, debe seguirse el asunto muy de cerca y que cuando los distintos procedimientos

empleados no den resultado satisfactorio para suprimir las corrosiones en un haz tubular, lo mejor es cambiar los tubos para correr la suerte de tener más fortuna con los nuevos.

Los gastos que de ello resultan son siempre menores que los que trae consigo la presencia de agua de mar en el agua de alimentación.

LA ENSEÑANZA EN LA ESCUELA FEDERAL DE ZURICH ⁽¹⁾

CAPÍTULO II

Mecánica aplicada á las construcciones.

(Segundo curso.)

Sistemas hiperestáticos.

CAPÍTULO VIII

TEOREMAS FUNDAMENTALES PARA EL CÁLCULO DE SISTEMAS PLANOS, ELÁSTICOS, LLENOS Y EN CELOSÍA. SISTEMAS HIPERESTÁTICOS.

1.—Observaciones preliminares. Insuficiencia de la estática.

Estática, magnitudes superabundantes, elementos ídem. Necesidad de acudir á las deformaciones. Explicación del método con algunos ejemplos. (Método: reemplazar el sistema por otro isostáticamente sustentado). Ejemplo: Arco sustentado sobre dos rótulas con un tirante articulado; se reemplaza por otro arco sustentado por rótula y apoyo deslizante con fuerza, y el tirante por dos fuerzas iguales y opuestas.—Arco empotrado, análogo.—Estructura tubular de sección cuadrada (pórtico cerrado) sustentado sobre apoyo fijo y móvil.—Notaciones.

2.—Teorema del trabajo virtual.

a) Introducción. Definición. Trabajo virtual de una fuerza que actúa sobre un punto material cuando éste sufre un recorrido (desplazamiento) virtual. Signos del trabajo virtual. Teorema de trabajo virtual para cuerpos rígidos; aplicación al cálculo de la línea de influencia en un apoyo de una viga recta sobre sustentación fija y móvil. Teorema de la igualdad de los trabajos virtuales de las fuerzas que actúan sobre un apoyo y el de su deformación virtual.

b) Trabajo virtual de deformación de un sistema. Trabajo virtual de deformación de una pieza recta sometida á esfuerzos de tensión axiales. Ídem de una pieza simétrica cualquiera, sometida á esfuerzos cualesquiera que actúan en su plano de simetría. Aplicación á las piezas rectas.

c) Trabajo virtual de las fuerzas exteriores.

d) Aplicación de la igualdad de los trabajos al cálculo de los recorridos de los nudos de una estructura.—Ejemplos:

1.º Viga recta, en celosía triangular, simple, sustentada sobre un apoyo fijo y otro deslizante.

2.º Viga empotrada en un extremo; caso de viga recta y de estar horizontal y sometida á acciones verticales.

3.º Arco con tres rótulas.

4.º Ídem con tirante; cálculo de la tensión de éste y de las reacciones de las rótulas extremas.

e) Aplicación de la igualdad de los trabajos al cálculo de sistemas hiperestáticos. Arcada doble sobre dos apoyos fijos y otro deslizante. Pieza empotrada en un extremo y en el otro sobre un apoyo móvil. Pórtico simple.

3.—Teorema de Maxwell de la reciprocidad de las deformaciones.—Demostración del teorema.

Aplicaciones: 1.ª Cálculo del recorrido horizontal del nudo

(1) Véase el número anterior.