

Un puente colgado de 1 066 m de luz y un arco de 510 m

De regreso de mi viaje de ampliación de estudios a los Estados Unidos de América, en los siete días de travesía New-York-Gibraltar me he ocupado de

los al año, requería un nuevo enlace de la isla con el continente.

En septiembre de 1927 se empezó la construcción

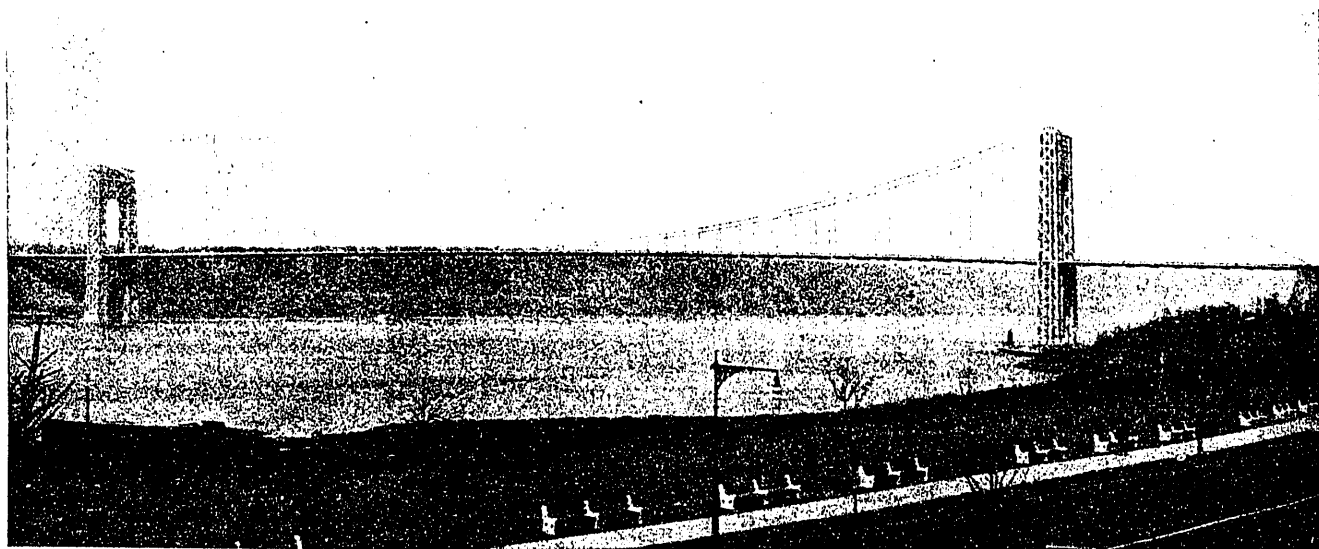


Fig. 1. Puente de George Wáshington, de 1 066 metros de luz. Vista general desde Riverside Drive

ordenar las notas tomadas durante mi estancia en la tierra de los rascacielos. Vuelvo satisfecho de las atenciones que para mí han tenido los ingenieros norteamericanos, quienes me dieron toda clase de facilidades y datos de cuantas obras visité y estudios que me interesaban, acompañándome en mis visitas, sin que para ello fuese obstáculo la temperatura de 13° bajo cero, que algunos días hubimos de sufrir.

Entre todas las obras se destacan, por sus dimensiones colosales, los dos nuevos puentes de George Wáshington y Kill-van-Kull, recientemente inaugurados, dos *records* en la construcción de puentes, que superan, con una gran diferencia, la luz de los anteriormente construidos.

La isla de Manhattan, centro de los negocios de la ciudad de Nueva York, está bordeada por el Hudson, en el lado Oeste, y el East River, del lado Este, uniéndose al Sur de la isla, formando la bahía de Nueva York. Sobre el East River, de 500 metros de ancho, están los famosos puentes de Brooklyn, Manhattan, Williamsburg y Queensboro, cuyas luces respectivas son 485, 448, 488 y 300 m. El ancho del Hudson, que excede de un kilómetro, y la intensa navegación de grandes trasatlánticos que amarran en los muelles que cada Compañía de navegación tiene construídos en el río, constituían un problema para la construcción de puentes a este lado de la isla. Hasta ahora sólo se hacía el paso de vehículos sobre el Hudson por medio de "ferry-boats". En 1927 se inauguró el "Holland Tunnel", bajo el Hudson, de 3 kilómetros de longitud, con dos tubos para dos líneas de automóviles cada uno y un paso de peatones. El aumento de tráfico, que excede de los 20 millones de vehícu-

los al año, requería un nuevo enlace de la isla con el continente.

En septiembre de 1927 se empezó la construcción



Fig. 2. Torre del lado de Nueva York

siendo el de mayor luz del mundo (1 066 m), duplicando la del de Detroit (564 m), que hasta ahora era el mayor de los construídos de su tipo.

Las siguientes cifras darán una idea de esta gigantesca obra:

Luz del tramo central	1 066,8 m
Longitud entre anclajes	1 450,8 »
Ancho del tablero	36,5 »
Altura de las torres sobre el nivel medio del río	193,5 »
Altura de la calzada sobre el nivel del río	76,2 »
Peso de los cables	28 500 ton
Total de acero en la estructura	74 000 »
Acero de las torres	40 000 »
Hormigón en cimentaciones y anclajes	350 000 m ³

En la construcción de los cables se han empleado 171 200 kilómetros de hilo de acero de 5 mm de diámetro; cerca de la mitad de la distancia de la Tierra a la Luna.

El tablero está proyectado en dos pisos: el superior, para ocho líneas de automóviles, y el inferior, para cuatro vías de tranvías y metropolitano. En la actualidad sólo está construido el pavimento en dos fajas laterales para dos líneas de vehículos en cada dirección.

El tablero está colgado de cuatro cables distribuidos en dos grupos distanciados 32,31 m. La separación entre dos cables del mismo lado es 2,28 m entre centros. Cada cable, de 91 cm de diámetro, está constituido por 26 474 hilos de alambre de acero galvanizado, de 5 mm de diámetro, agrupados en 61 paquetes de 434. La resistencia de estos cables es de 16 200 kg por cm², 5 000 más que la de los empleados en el puente de Brooklyn.

Anteriormente a la construcción de los cables se procedió al tendido de una pasadera a cada lado del puente, paralela inferiormente a la posición que

Estos cables se colocaron en una gabarra que los iba extendiendo sobre el lecho del río, entre las dos márgenes, y de aquí fueron elevados a las torres. Una vez colocados, se tendió el piso de las pasaderas.



Fig. 3. Otra vista de la misma torre

formado por viguetas de acero cubiertas con tabloncillos de madera. Cinco pasaderas transversales, distribuidas a lo largo de los cables, servían para comunicar y arriostrar las anteriores.

Para el tendido de los hilos de alambre que forman los cables del puente se dispusieron unos cables sin fin sobre las pasaderas, que pasan por poleas situadas sobre los anclajes. Estos son portadores de dos poleas, dispuestas de forma que, cuando una pasa por un anclaje, la otra se encuentra en el opuesto. El cable elemental, arrollado en carretes situados en los anclajes, se pasa por la garganta de una de estas poleas, fijando el extremo libre al anclaje; así la polea móvil, en su recorrido, iba tendiendo dos hilos al mismo tiempo, a la vez que la marcha en sentido opuesto tiende otros dos. Como se disponía de cuatro pares de poleas móviles en cuatro cables sin fin, dieciséis hilos eran tendidos al mismo tiempo. En los anclajes estos hilos pasan por la garganta de una pieza de acero



Fig. 4. Disposición del tablero

habían de ocupar cada uno de los dos grupos de cables. Estas pasaderas fueron sustentadas por dos grupos de nueve cables, que más tarde se utilizaron en las péndolas que sustentan las viguetas del piso.

en forma de herradura que, por medio de pasadores, se fija a dos barras empotradas en el macizo de hormigón.

Así se repitió la operación hasta el tendido de los

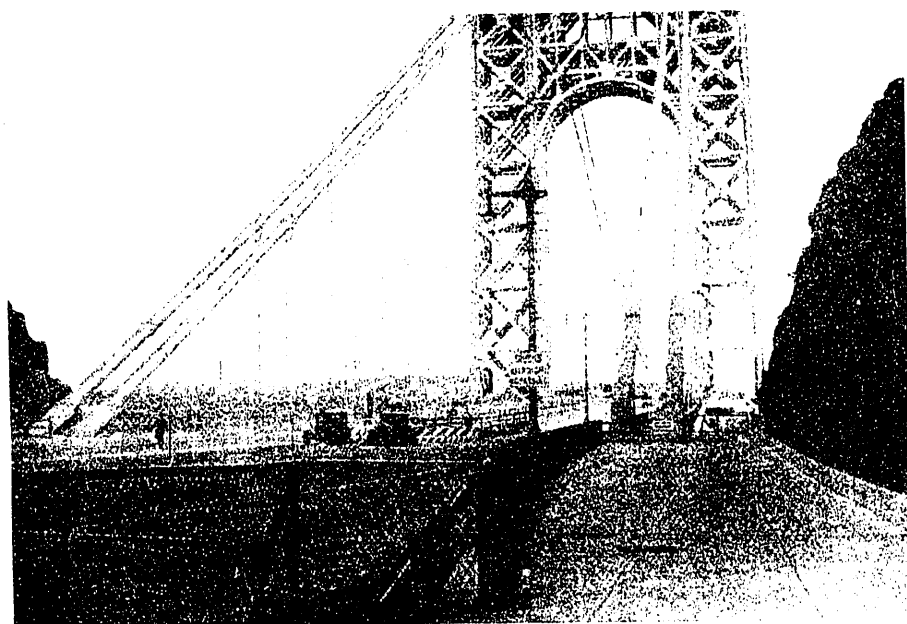


Fig. 5. Torre de apoyo en Nueva Jersey

434 hilos que componen cada uno de los 61 grupos que forman el cable sustentador. Entonces se interrumpían las operaciones para proceder a corregir los errores de longitud y colocar bandas de acero, a determinadas distancias, para fijar los hilos.

Una vez formados los 61 grupos de hilos y colocados en su posición definitiva, eran comprimidos por seis gatos hidráulicos de 20 toneladas, dispuestos en un marco de acero hexagonal, transportable a lo largo de los cables, repitiéndose la operación con doce gatos hidráulicos de 50 toneladas, dispuestos en forma análoga. A continuación se colocaban bandas de acero que los fijaban en su forma definitiva. Estas operaciones se hicieron de noche, cuando la temperatura del cable era más uniforme, con objeto de evitar diferencias de longitud en los hilos.

Finalmente, para proteger los cables se les cubrió con un arrollamiento de alambre de acero, sobre el que se aplica una capa de pintura. Este revestimiento no se hizo hasta después de terminado el tablero, después de producirse el alargamiento por el peso de éste.

Una vez terminados los cables, las pasaderas se colgaron de éstos utilizándose los que las sustentaban en las péndolas que sostienen las viguetas del piso. La figura 6 indica la disposición de unión de las péndolas a los cables.

Las viguetas, de 36,5 m de longitud, están separadas 18,5 m y unidas por ocho largueros. Sobre éstos se apoyan las viguetillas que soportan las placas de hormigón armado del piso.

La construcción del tablero se hizo por medio de grúas que avanzaban desde las torres hacia el centro, que elevaban los elementos del piso, de gabarras ancladas en el río, al mismo tiempo que se construían los tramos laterales.

Las torres, cada una de las cuales recibe de los cables una compresión de 112 500 toneladas, están formadas por 16 columnas de acero al silicio, distribuidas en dos grupos de ocho columnas, unidas por barras de arriostramiento. Los dos grupos de columnas, formando los pies de la torre, están unidos por cerchas en arco bajo el tablero y en la parte su-

perior. Cuarenta mil toneladas de acero se emplearon en la construcción de las torres.

Estas están cimentadas sobre plataformas de hormigón, una bajo cada pie de la torre, que serán revestidas con paramento de granito.

La cimentación de la torre del lado de Nueva York no presenta ninguna dificultad, no necesitando agotamiento por estar sobre el nivel del río. La torre del lado de Nueva Jersey se cimentó bajo el nivel del agua, por medio de un recinto de tablestacas metálicas.

El anclaje del lado de Nueva York forma un bloque de hormigón de $88 \times 61 \times 40$ m, que será revestido con paramento de granito. Del lado de Nueva Jersey los cables van anclados en un pozo practicado en la roca

de la margen, relleno de hormigón.

El presupuesto de la primera fase de la construcción es de 60 millones de dólares, a amortizar con los derechos de peaje. El presupuesto de la obra, completamente terminada, asciende a 75 millones de dólares; se calcula que serán amortizados en el año 1954.

Este *record* pronto será superado si se constru-



Fig. 6. Unión de una péndola con el cable

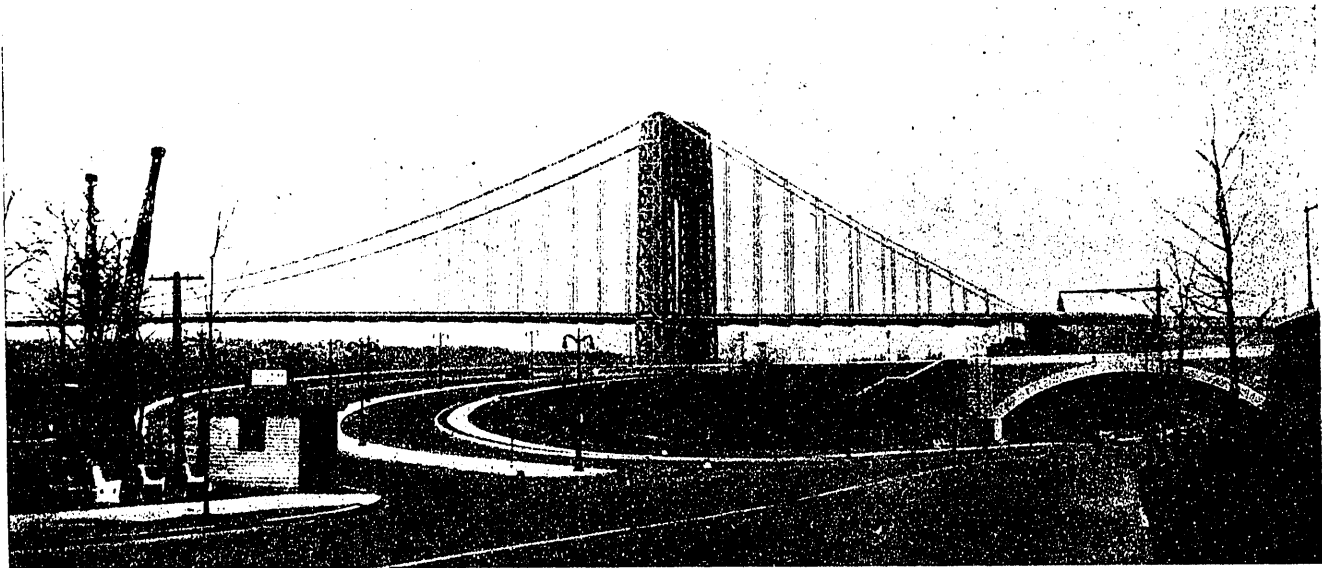


Fig. 7. Acceso al puente desde Riverside Drive

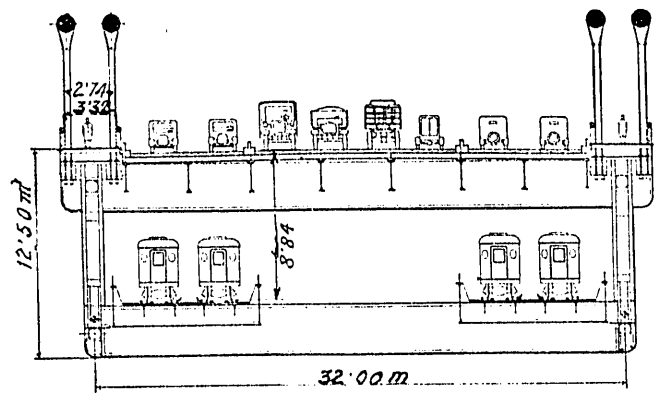


Fig. 8. Sección transversal del puente

Puente de Kill-van-Kull

El puente de Kill-van-Kull enlaza Bayonne (New-Jersey) con Port-Richmond (New-York), estableciendo unión entre Bayonne y State Island, que forma parte de New-York City. La navegación intensa del canal de Kill-van-Kull, enlazando las bahías de Newark y New-York, ha obligado a construir un puente de dimensiones extraordinarias, superando en más de 200 m la luz del mayor anteriormente construido del mismo tipo: el puente de Hell Gate, y siendo superior en unos metros al de Sidney, construido al mismo tiempo en Australia.

El arco central, de acero, mide una luz de 510 metros, estando formado por dos cerchas parabólicas de 81 m de flecha, separadas 22,55 m, enlazadas por barras de arriostramiento dispuestas en K. Del arco cuelga el tablero, proyectado para siete líneas de

ye el que se proyecta, de 1 380 m, a la entrada del puerto de Nueva York.

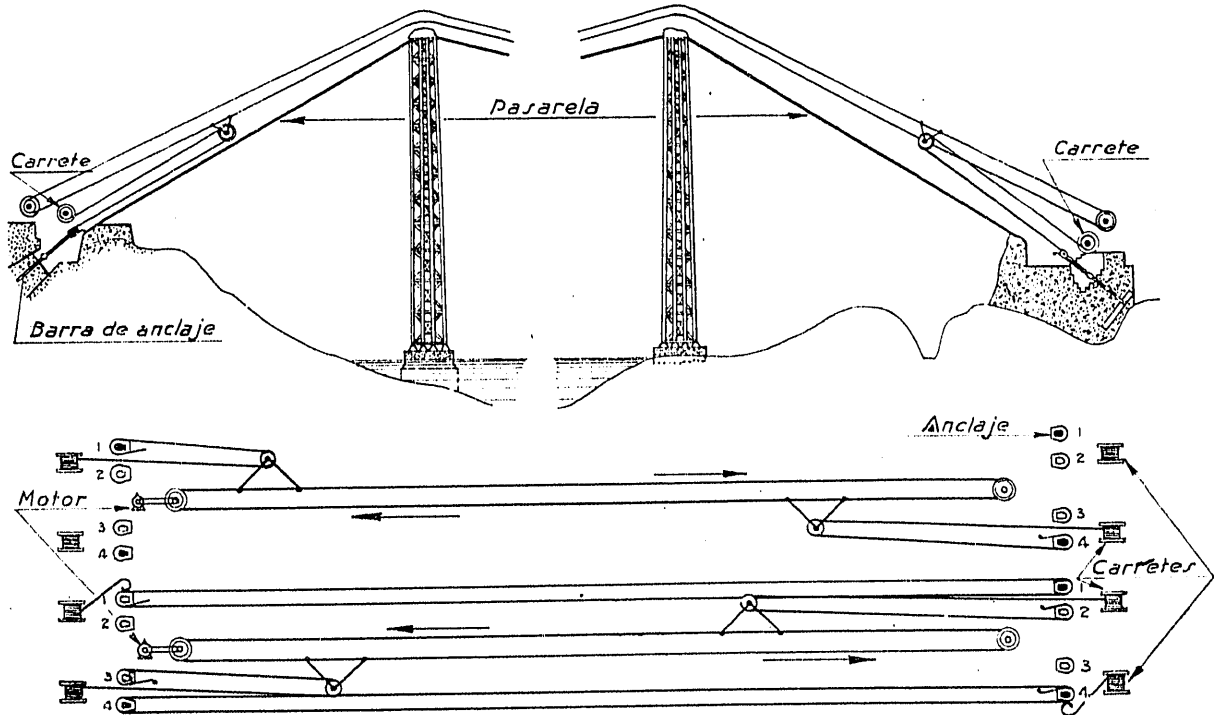
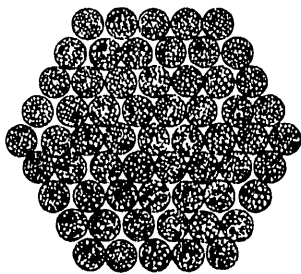


Fig. 9. Puente de George Wáshington. Disposición de montaje de los cables

vehículos y dos andenes para el paso de peatones, prolongado por un viaducto de acceso del lado de Port-Richmond, de 613 m de longitud, y otro, de

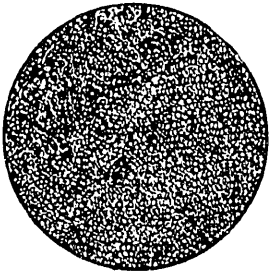
mado o pilares aislados, según la altura de estos apoyos, que varía de 6 a 34 m.

En la actualidad, la calzada tiene un ancho de 12

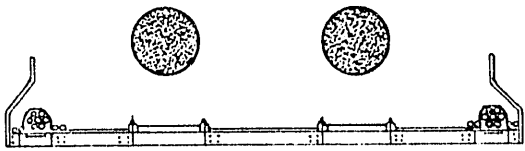


DISPOSICIÓN DE LOS CABLES
EN EL MONTAJE

61 cables de 434 hilos cada uno



SECCIÓN DEFINITIVA DEL CABLE



DETALLES DEL MONTAJE DE LOS CABLES

Fig. 10. Puente de George Washington

639, del lado de Bayonne, siendo la longitud total de la obra de 1 762 m.

metros, para cuatro líneas de vehículos, estando dispuesto el tablero para ensancharla a 19 m, para tres

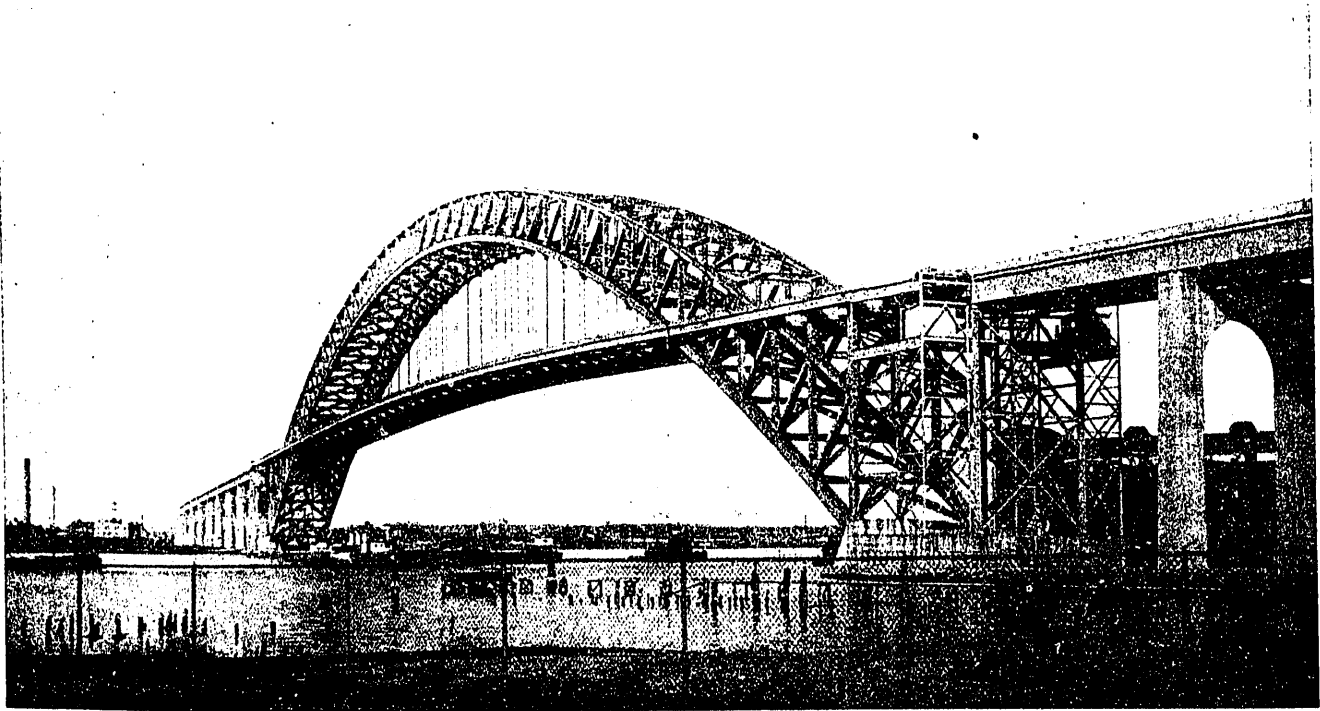


Fig. 11. Puente de Kill-van-Kull, de 510 metros de luz

Los viaductos de acceso están constituidos por tramos rectos metálicos, independientes, de luz máxima de 38 m, apoyados sobre pórticos de hormigón ar-

líneas más de automóviles o dos líneas de ferrocarril metropolitano. Actualmente lleva en voladizo un andén para peatones de 1,80 m de ancho, con un espa-

cio debajo para conducciones eléctricas, estando dispuesta la estructura para colocar otro al lado opuesto.

Tres clases de aceros se utilizaron en la estructura: acero al manganeso, silicio y carbono. En la cabeza inferior se empleó acero al manganeso. En la supe-

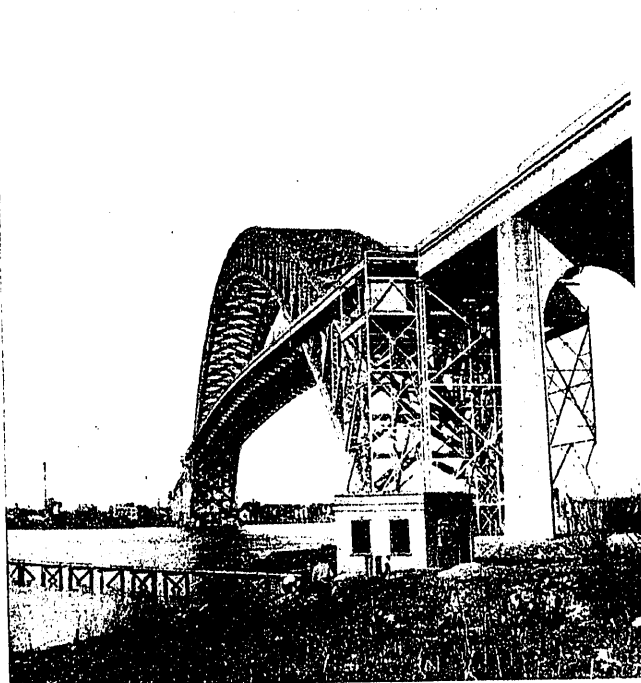


Fig. 12. Otra vista del mismo puente

rior, que durante el montaje había de trabajar a tracción, se empleó acero al silicio, excepto en los tres paneles extremos, con una carga de rotura de $6\,500\text{ kg/cm}^2$. Este acero también se utilizó en las viguetas del piso y tramos rectos de los viaductos de acceso.

bono, 1 900 para acero al silicio y 2 300 para acero al manganeso. Estas cifras se redujeron para compresión según el coeficiente de pandeo. Durante el montaje se permitió un aumento de un 20 por 100 en estas cargas unitarias.

Con la cooperación del Bureau of Standard, de Washington, se hicieron dos series de ensayos de resistencia, una en columnas de dimensiones mitad de las que se habían de emplear en la obra, y otra de las mismas dimensiones de las empleadas en la estructura.

El arco se proyectó para una variación de temperatura de -17 a $+43^\circ\text{C}$, considerando como normal la de 13° .

Los apoyos están cimentados en las márgenes sobre bloques de hormigón, de $33 \times 41\text{ m}$ de base. El vertido de este hormigón se efectuó en seco, mediante un recinto de tablestacas metálicas. La instalación de hormigonado se montó sobre una gabarra anclada en la margen.

El tramo central está proyectado en arco de dos articulaciones para la carga permanente y sobrecargas, y como arco de tres articulaciones para resistir al peso propio durante el montaje.

El espesor en la clave es de 11,40 m, y 20,60 m en los arranques.

Las cerchas están divididas por los montantes en 40 paneles. La sección de la cabeza inferior varía de $3\,756\text{ cm}^2$ a $6\,324\text{ cm}^2$, pesando la barra mayor 88 toneladas. La cabeza superior varía de 1 754 a 2 718 centímetros cuadrados de sección.

Es especialmente interesante esta obra por la precisión con que se hicieron las operaciones del montaje y la rapidez con que se efectuaron los trabajos.

El montaje del arco se hizo en voladizo, apoyando la parte construida en castilletes cuando ésta excedía de una cierta longitud. Estos castilletes eran desmontados y utilizados en los nuevos puntos de apoyo una vez que la cabeza inferior del arco se apo-

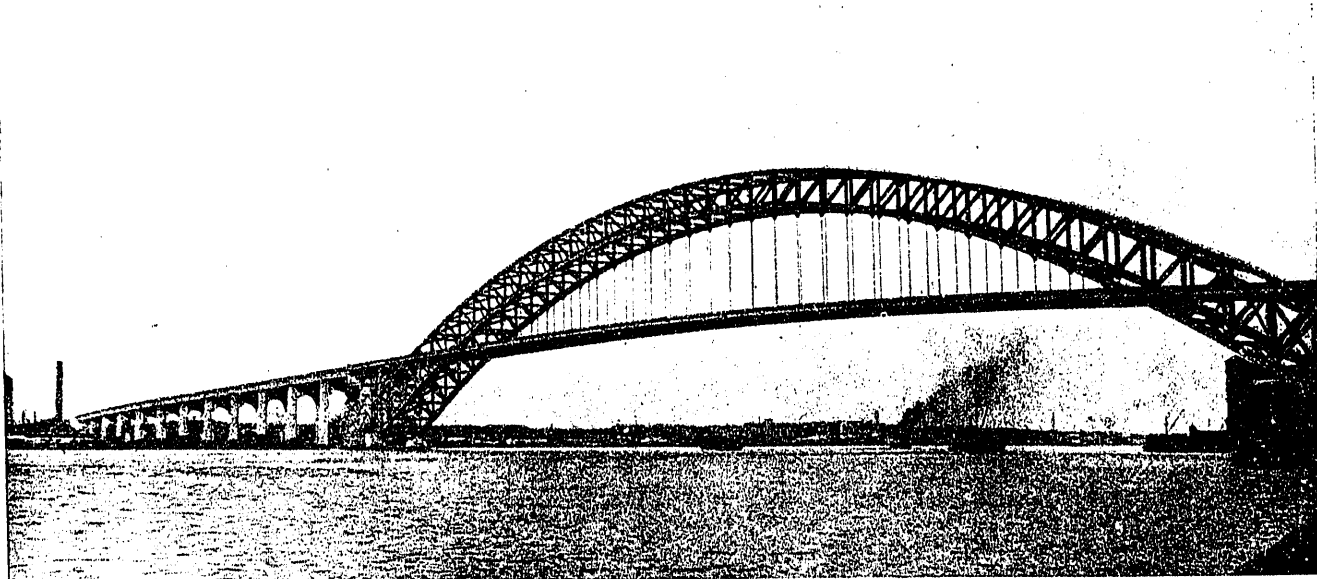


Fig. 13. Puente de Kill-van-Kull

Los tres paneles extremos de la cabeza superior y parte del arriostramiento se han construido de acero al carbono, con una carga de rotura de $4\,600\text{ kg/cm}^2$.

En el proyecto se admitieron como cargas unitarias: para tensión, $1\,400\text{ kg/cm}^2$ para acero al car-

ya en el inmediato; así, cada brazo del arco en construcción no se apoyaba en más de dos castilletes. Estos se colocaron bajo los montantes 1, 2, 4 y 7, del lado sur, y en los 1, 2, 4, 7, 11 y 16, del lado norte, estando formados por las mismas vigas metálicas

que luego se habían de utilizar en el puente, especialmente por viguetas del piso. La cimentación de estos castilletes se hizo por cajones metálicos y hormigón armado.

Para dejar libre el canal de navegación se hizo el cierre en el panel 14, en lugar del 20, que correspon-

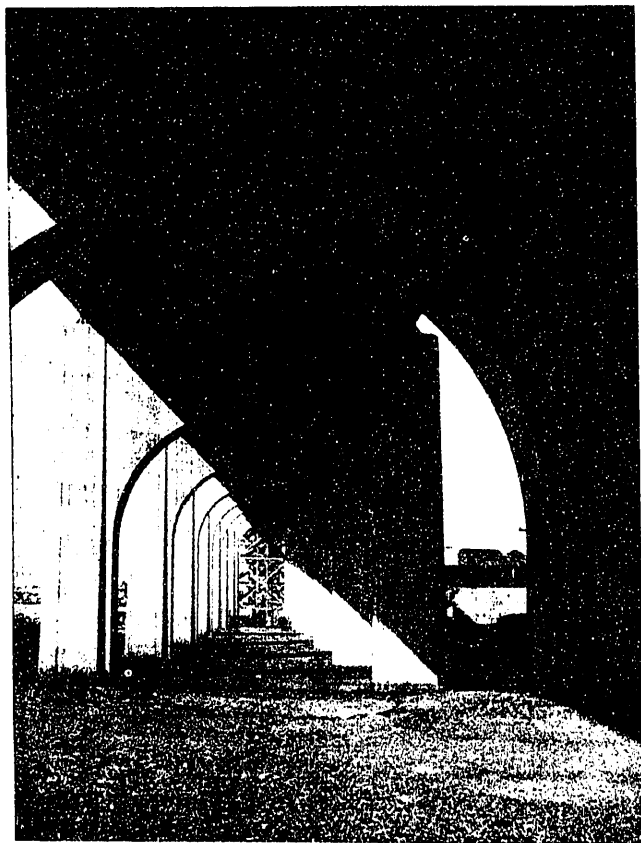


Fig. 14. Puente de Kill-van-Kull.-Apoyos de los tramos de acceso

de a la clave, evitando así colocar los castilletes de apoyo donde pudiesen ser un obstáculo para la navegación.

El montaje se empezó del lado de Port-Richmond, montándose el primer panel por medio de una grúa flotante y una grúa *derrick* montada en el arranque del arco. La barra que forma la cabeza inferior del

Para transmitir las cargas de un castillete al contiguo se dispusieron gatos hidráulicos de 3 500 toneladas en cada dos castilletes.

Durante el montaje del arco muchas barras habían de trabajar en condiciones muy distintas de las definitivas. La cabeza superior, que trabaja a compresión durante el montaje, en la parte que queda en voladizo y en algunos paneles contiguos al castillete de apoyo sufre esfuerzos de tracción, que en algunos momentos excede de las cargas normales de trabajo. También en algunos montantes y diagonales son superiores las cargas de trabajo durante el montaje. Por estas razones hubo que reforzar algunos elementos durante el montaje, disponiendo en las proximidades del último castillete de apoyo unos tirantes que, partiendo de la prolongación del montante, alcanzaban a los tres paneles contiguos de uno y otro lado del montante, regulándose la tensión de estos tirantes por medio de gatos hidráulicos de 5 000 toneladas, situados bajo el montante.

Para el cierre del arco se dispuso una articulación en la cabeza inferior, en el nudo correspondiente al montante 14, calculada para el empuje del arco en ese punto en el momento del cierre. Los dos brazos del arco, después del montaje, quedan en ese punto a una distancia de 30 cm. Bajando los gatos colocados en los castilletes se efectuó el cierre de la cabeza inferior. Para evitar cualquier error de alineación en el montaje se dispuso sobre la cabeza inferior del arco una guía de acero sobre forma de V, en el brazo norte, que encajaba en una cavidad practicada en igual forma en el brazo sur. El movimiento relativo de los dos brazos era controlado por un observador en el punto de cierre, que transmitía órdenes por teléfono a los operarios encargados de bajar los gatos en los castilletes. Una escala de madera colocada en el eje de la cabeza inferior, deslizándose sobre otra escala colocada en el otro brazo, servía para indicar si el cierre se efectuaba en la posición debida.

Estas operaciones se hicieron con gran precisión, no habiendo necesidad de corregir errores de alineación sensibles. A continuación se colocaron las cubrejuntas necesarias para dar a la sección en ese punto el momento de inercia correspondiente.

Una vez efectuado el cierre de la cabeza inferior, sólo queda colocar la barra correspondiente de la ca-

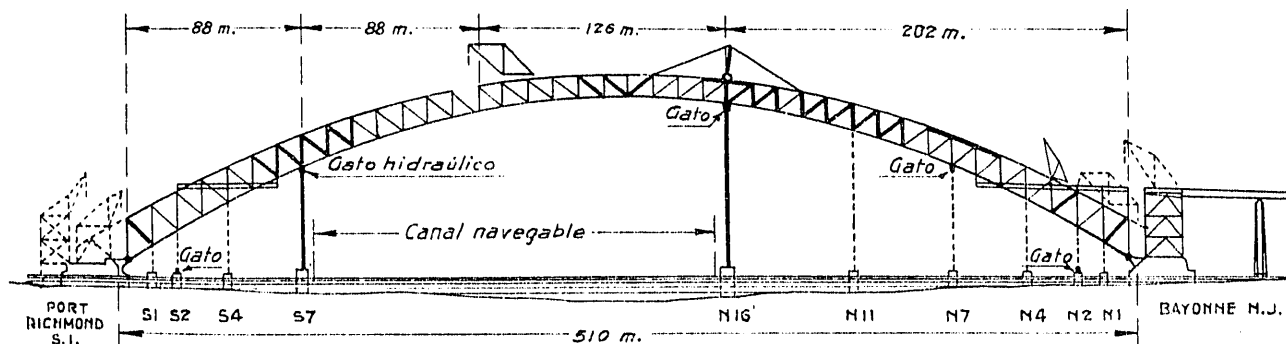


Fig. 15. Esquema de la disposición de montaje

primer panel se apoyó en la articulación y el primer castillete, siguiendo así el montaje en tanto lo permite la altura de la grúa flotante, continuando luego con la grúa *derrick*, que avanza sobre carriles montados sobre la cabeza superior de la parte construida del arco.

beza superior. Para ello se aplicó en uno de los castilletes de apoyo, por medio de gatos hidráulicos, una fuerza tal, que en el arco terminado correspondiese en la barra que se había de colocar una compresión cero.

El resto de la construcción no presenta ninguna particularidad que anotar.

En las oficinas del departamento de puentes de la Port of New-York Authority pude ver el modelo reducido que se utilizó para el estudio de esta estructura. A una escala de 1:192 (1:16 de pulgada por pie) se construyó el arco en latón, con sus arriostramientos, haciéndose las uniones con soldadura de plata. El modelo fue de gran utilidad para comprobación de los cálculos y estudios de las deformaciones, así como para el estudio de la acción del viento y deformación de los arriostramientos, difíciles de determinar en los cálculos, y que en una obra de estas dimensiones tiene gran importancia.

Antes de optar por este tipo de estructuras se hicieron estudios comparativos de las diversas disposiciones que se podían adoptar. Las más indicadas eran el puente colgado, el cantilever y el puente en arco. El primer tipo resultó más caro y de menor rigidez que el adoptado. El segundo arrojaba un presupuesto superior, y fue considerado menos estético que los

quedando por acabar algunos detalles de decorado y ensanche de la calzada.

El presupuesto de la obra terminada se calcula en 18 millones de dólares; amortizables con los derechos de peaje.

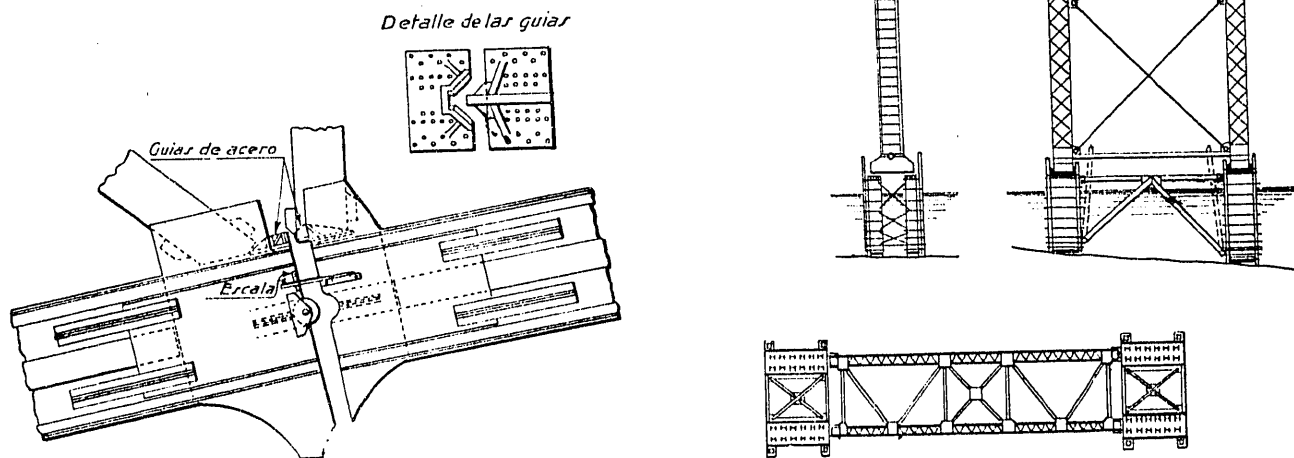


Fig. 16. Detalle de la junta de cierre del arco y croquis de uno de los castilletes de apoyo.

otros dos tipos. Como resultado de estas comparaciones, el puente en arco fue considerado el más indicado.

Los trabajos empezaron en septiembre de 1929, y en 14 de noviembre de 1931 fue abierto al tráfico. En la actualidad se están terminando los accesos.

Estos datos me fueron facilitados por los ingenieros del departamento de puentes de la Port of New-York Authority, de la que es ingeniero jefe mister O. H. Ammann, y el secretario de la American Society of Civil Engineers, a quienes me es grato expresar mi agradecimiento.

E. MIRANDA
Ingeniero de Caminos

Notas sobre el cálculo de presas de gravedad

Con este mismo título han aparecido en esta REVISTA, en los números de 15 de febrero y 1.º de marzo, dos artículos interesantísimos y muy documentados, debidos al ingeniero de Caminos Sr. Cruz López.

Queda flotando, de la lectura del primero, la idea de la existencia y posibilidad de la ya cercana aplicación práctica del llamado Método de Jakobsen, que éste expuso en la Memoria "Stresses in gravity dams by principle of least work" (*Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, septiembre 1930, pág. 1613), y van estas cuartillas a desvanecer, en parte, esa impresión optimista, sintetizando la crítica profusa que tuvo la Memoria antes

citada, por los más prestigiosos ingenieros especialistas en presas de embalse.

La teoría clásica resuelve la indeterminación de primer grado que presenta el problema de encontrar los esfuerzos en el interior de la presa, suponiendo lineal la ley de variación de las n_y (fig. 1).

Jakobsen, en vez de admitir que n_y es función lineal de x e y , intenta encontrar para n_y la expresión que haga que el trabajo elástico sea mínimo. Ante la dificultad que presenta el abordar directamente el problema, lo bordea empleando el llamado Método aproximado de Ritz.

Supone, para expresión de n_y , una función con más constantes que las necesarias, y las determina