

ANCLAJE DE UNA FUENTE FLOTANTE EN MACAO

Jesús Fierro Bardají

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Director General Adjunto, GHESA Ingeniería y Tecnología, S.A.

Profesor en la ETSICCP de Madrid

RESUMEN

El artículo describe parte del cálculo de los cables de anclaje de una fuente de 120m de longitud situada a flote en el depósito de Cacilhas situado en la ciudad de Macao. La fuente consiste en una plataforma de 120x1,50m que aloja la fuente, otra de 10x10 que aloja un géiser de 75m de altura y varias plataformas pequeñas que alojan juegos de agua. Todas ellas flotan mediante un sistema de flotadores cúbicos de goma que se abrochan entre sí. El conjunto está reforzado por una estructura de celosía. El lago tiene nivel variable y está sujeto a tifones. Los cables principales de anclaje están soportados por flotadores, tienen una longitud de 760m y están parcialmente inmovilizados en dirección transversal por otros cables de 600m de longitud. Para el cálculo fue preciso escribir un programa de ordenador capaz de calcular los cables bajo cargas concentradas ligadas a puntos fijos del cable. Se incluye la formulación, ejemplos de control de precisión y el proceso de cálculo y ajuste de cables sujetos a condiciones de carga y deformación.

ABSTRACT

This article describes part of the analysis performed to design the anchor system of a 400ft long fountain that floats on the Cacilhas reservoir in the city of Macao. The fountain consists of a platform 400'x5' that supports the fountain, another 33'x33' platform that supports a 250' high geyser and several small platforms that support other water effects. The platforms have a system of cubic rubber floats buttoned to each other and are reinforced by a latticed steel structure. The water level is variable and the area is subject to typhons. The main cables are 2,500ft long, supported by floats and partially fixed in the transverse direction by other cables with a length of 2,000ft. A computer program capable of considering concentrated loads attached to particular points of the cable had to be written to perform the analysis. The article describes the program formulation, including some accuracy tests, and summarizes the process of the analysis of cables subject to given load and displacement conditions.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Macao cuenta desde diciembre de 1995 con un nuevo aeropuerto. Con motivo de su inauguración el gobierno programó un conjunto de actos conmemorativos, entre ellos una serie de espectáculos agua-luz-sonido que sirvieron de estreno de una fuente cibernética que flota, anclada a tierra, en el depósito de agua de Cacilhas situado en la propia ciudad y contiguo al mar. Este de-

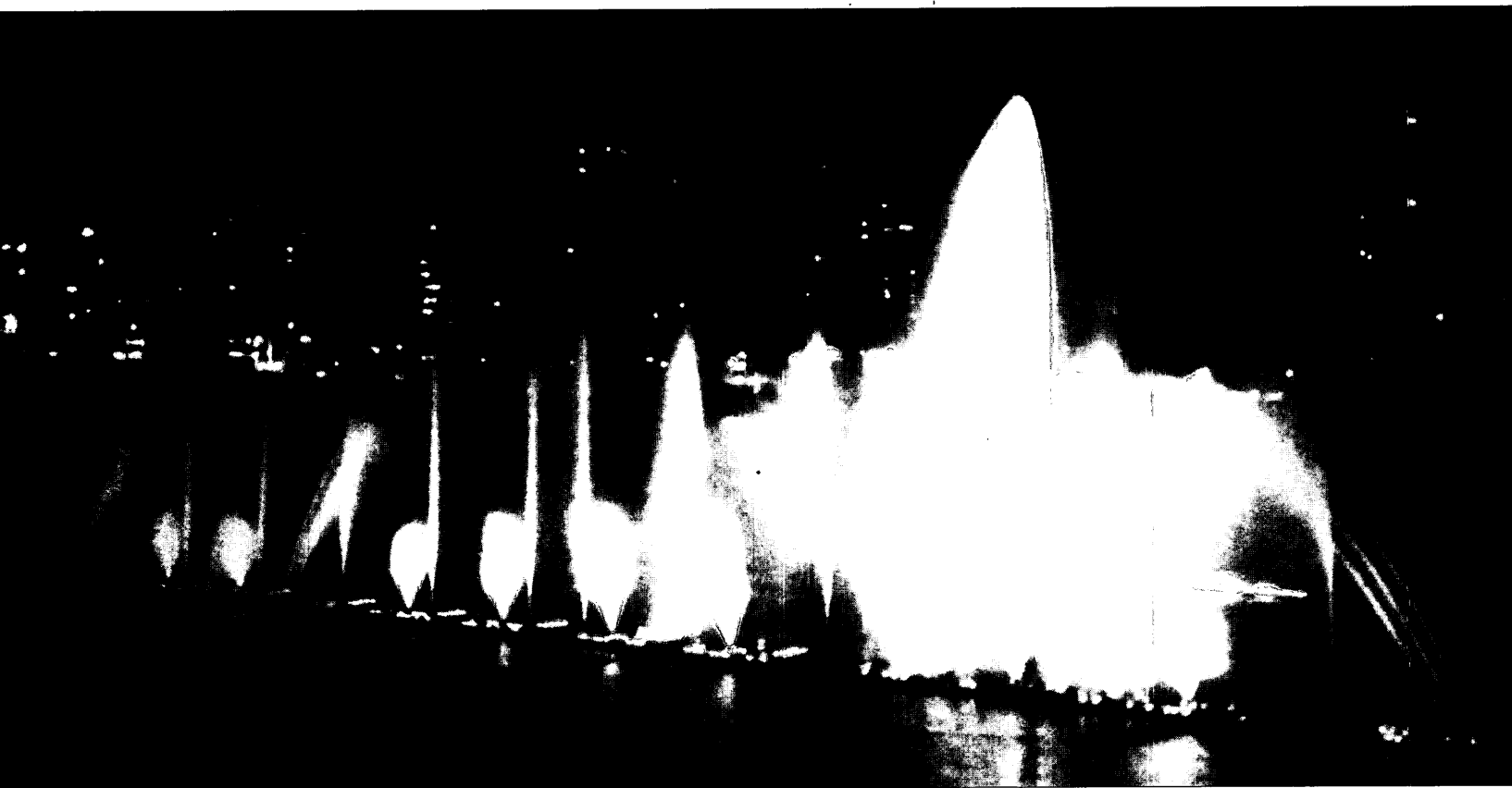
pósito se emplea para abastecimiento de agua y tiene nivel variable desde un calado mínimo de 3m hasta un máximo de 5,40m. Su forma es aproximadamente rectangular, de 800x600m².

El contrato de suministro está fechado el 25-7-95 y la inauguración fue la noche del 7-12-1995¹ con asistencia, entre otros, del Presidente de Portugal, Mario Soares.

Este artículo se refiere principalmente al sistema de anclaje de los elementos flotantes.

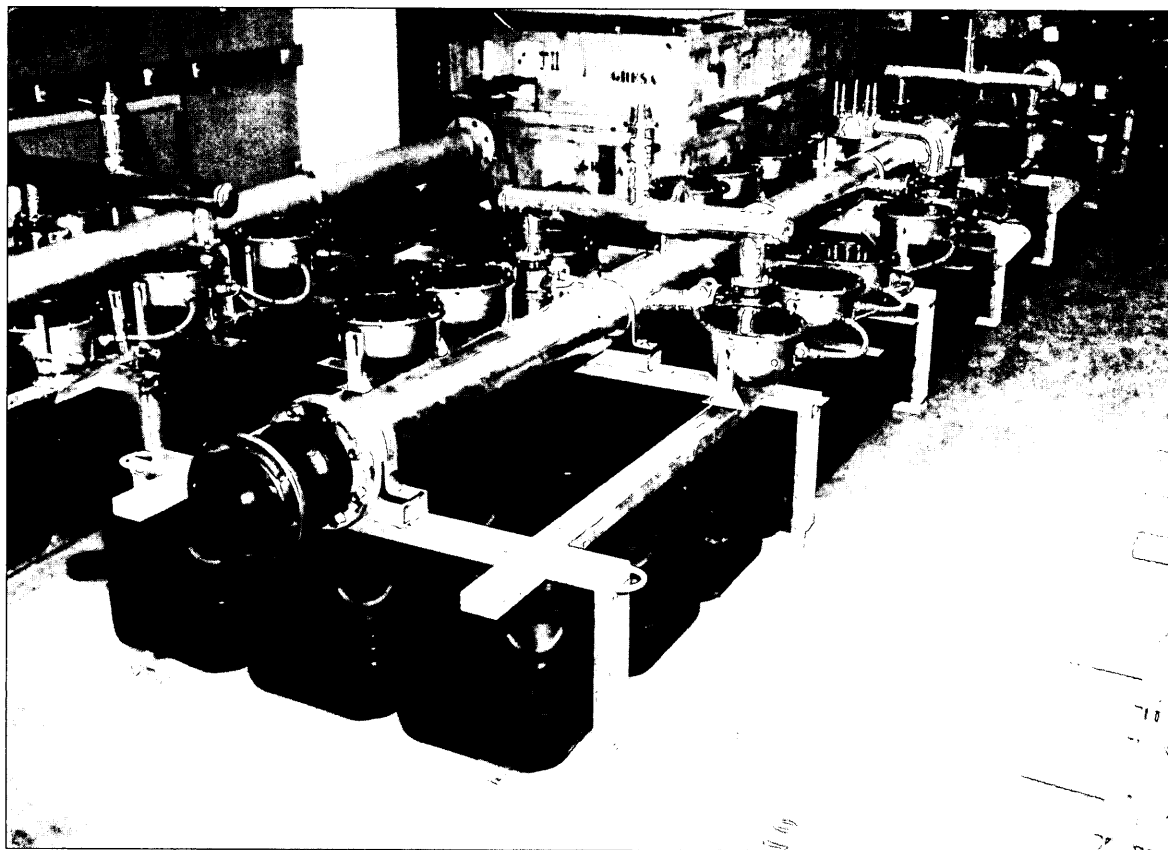
Se admiten
comentarios a este
artículo, que deberán
ser remitidos a la
Redacción de la ROP
antes del 30 de
junio de 1996.

Recibido en ROP:
marzo de 1996



*Fuente
funcionando.*





Módulo de plataforma de 10 m de largo. En primer plano se aprecian los flotadores y la junta flexible en la tubería principal.

Un módulo de plataforma listo para pruebas de flotación en taller.

DESCRIPCIÓN DE LA FUENTE

El conjunto instalado consta de:

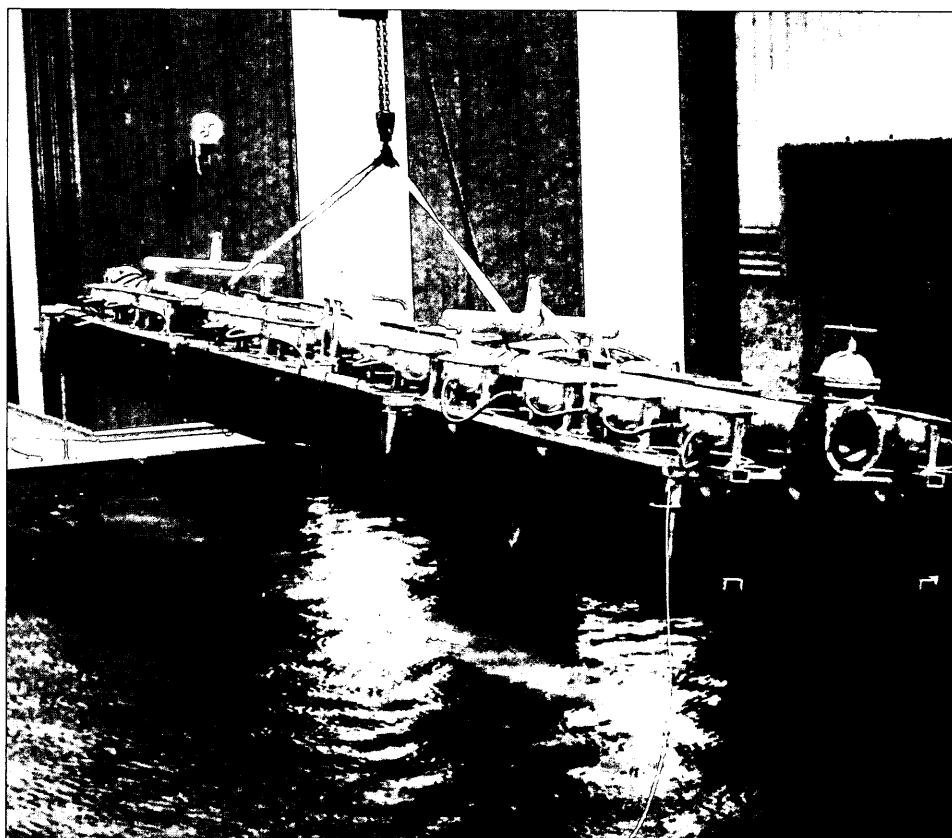
- ▼ Una fuente lineal de 120m de longitud
- ▼ Un géiser de 75m de altura
- ▼ Diversos juegos de agua
- ▼ El sistema de control situado en tierra

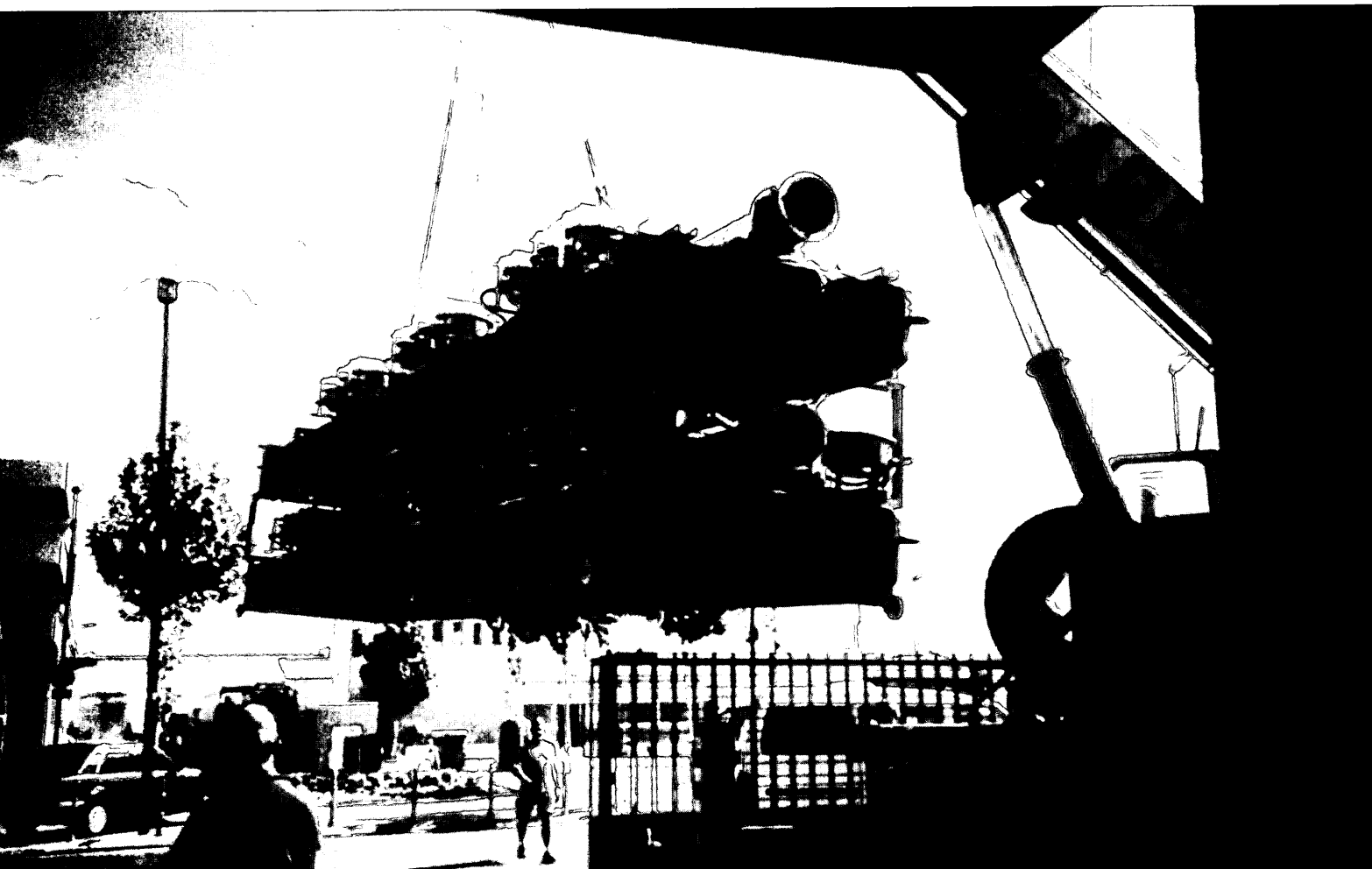
Los cables de potencia y control están sumergidos y soportados a intervalos por flotadores. Todos los elementos se fabricaron y se probaron en los talleres de GHESA en Torrejón de Ardoz y se expidieron en contenedores en seis envíos sucesivos.²

CONDICIONES DEL EMPLAZAMIENTO

La zona de emplazamiento está sujeta a tifones. El cliente suministró información relativa al viento y oleaje de proyecto. El viento de proyecto está definido mediante la fórmula

$$v(\text{m/seg})=33(h/10)^{0.20}+17$$





Dos módulos superpuestos listos para entrar en el contenedor.

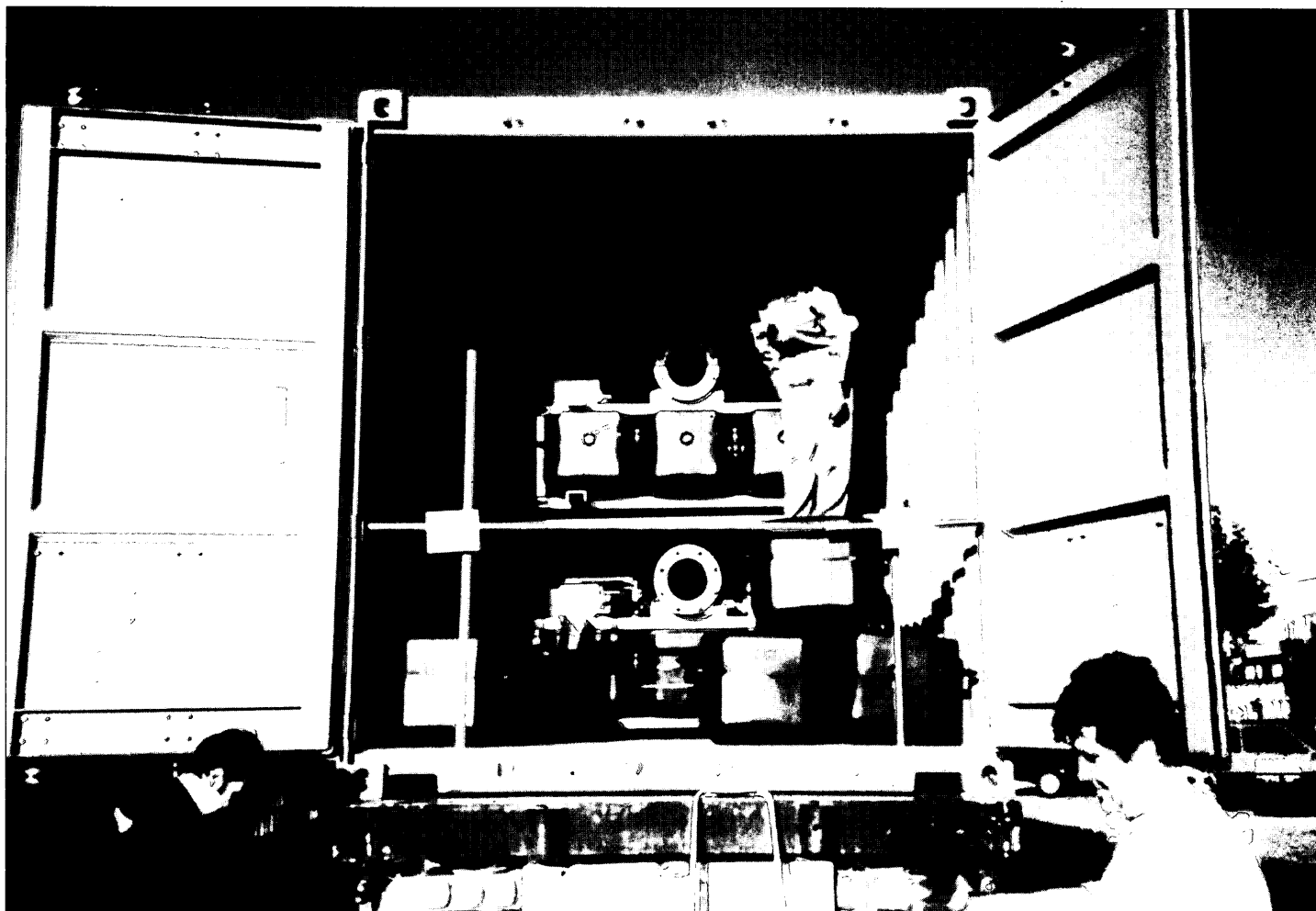
siendo h la altura en metros a la que se calcula la presión³. Esta es la velocidad de racha por lo que el cálculo estático realizado, por imposibilidad de hacer uno dinámico, es muy conservador dada la inercia de la fuente y la resistencia opuesta al movimiento por el agua. Las presiones y coeficientes de forma se calculan de manera semejante a la de las normas españolas. La altura de ola considerada fue 1,50m.

Macao está situada en una zona de alta sismicidad, en el borde de la placa euroasiática, lo que obliga a considerar acciones sísmicas severas. Las ondas sísmicas se clasifican, en primera aproximación, en ondas P, de presión, y ondas S, de cortante. Habitualmente las segundas son las que ocasionan la parte principal de las sacudidas⁴. De las ondas que pueden afectar a la fuente las S apenas se propagan en el agua, por su baja viscosidad, y las P sólo serían graves si el epicentro estuviera en el fondo del propio depósito. De producirse tal terremoto, los daños en la ciudad serían

tan grandes que los daños en la fuente quedarían en segundo término. Esta circunstancia, unida a la baja probabilidad de ocurrencia de un terremoto con epicentro en una zona tan poco extensa, ha permitido no tener en cuenta estas acciones.

Tampoco se consideró que el tamaño del depósito hiciera temer terremotos inducidos por la masa de agua como ha sucedido en algunos embalses.

Gran parte del depósito está rodeado de una pantalla de tablestacas en cuyo trasdós hay un relleno de calidad irregular y baja. Dado el uso del depósito para agua de abastecimiento se trató de limitar las acciones que pudieran producir contaminación o turbidez en el agua. Esto movió a renunciar al anclaje a bloques de lastre situados en el fondo. La compañía responsable del control del agua del depósito obligó a realizar todos los trabajos sin afectar al tablestacado perimetral. Esto implicó, entre otras cosas, la necesidad de anclar los cables a mástiles contruidos en tierra.⁵



*Vista de un
contenedor sobre
camión.*

SISTEMA DE FLOTACIÓN

Se estudiaron varios sistemas de flotación compatibles con el cuidado del agua y con el plazo de ejecución, improrrogable por su coincidencia con la inauguración del aeropuerto. La solución adoptada consistió en cubos de goma abrochados entre sí y reforzados con una estructura metálica.

La plataforma flotante que soporta la fuente tiene $120 \times 1,5 \times 0,4 \text{ m}^3$. La esbeltez geométrica resultante es 80 para deformaciones horizontales y 300 para las verticales. Dada la dificultad de proyectar una construcción de cierta rigidez hubo que optar por una de gran flexibilidad lo que exigió dotar a ciertos elementos funcionalmente continuos de uniones flexibles. Descompuesta la fuente en módulos de unos 10m de longitud (por limitación de los contenedores) se decidió dotarlos de una estructura moderadamente rígida y concentrar la flexibilidad en las uniones entre ellos.

El conjunto mostró un excelente comportamiento a flote durante las pruebas en fábrica, en las maniobras de suspensión, traslado y lanzamiento y durante el montaje.⁶

El mismo sistema de flotación se aplicó a las plataformas que soportan los demás componentes del conjunto: plataforma del géiser, bombas y otras plataformas diseminadas en el depósito. Estas otras plataformas son considerablemente más compactas que la de la fuente lineal y no plantearon problemas nuevos.

SISTEMA DE ANCLAJE

Para inmovilizar en el lago el conjunto de plataformas se proyectó un sistema de anclaje compatible con la variación del nivel de agua en el depósito, el viento y el oleaje. Este sistema debía producir reacciones bajas en los elementos de anclaje situados en las orillas y limitar los desplaza-

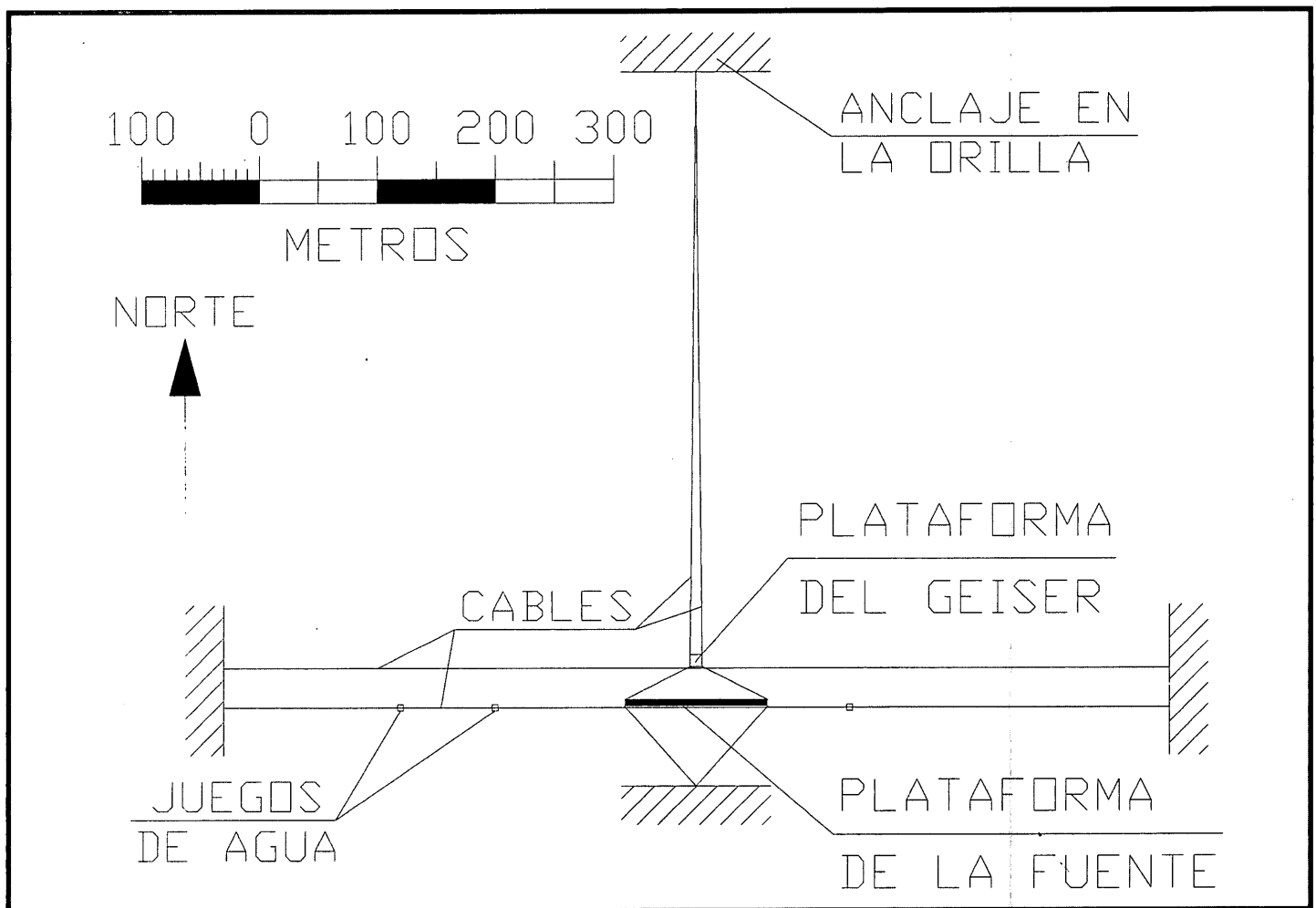


Figura 1.

mientos para permitir la integridad de las juntas flexibles de la tubería longitudinal de aportación y distribución de agua a las toberas y evitar la tracción o el arrancamiento de los cables de control y de suministro de energía. Este sistema consistió en (Fig.1).

Cables E-O de unos 760m de longitud
Cables N-S de unos 600m de longitud

Para evitar las elevadas tracciones resultantes del peso de los cables se dispusieron flotadores. En estas condiciones el trabajo de los cables se desarrolla sin influencia del peso propio y, básicamente, dentro un plano horizontal.

Los cables de anclaje no causan efectos significativos en relación con el oleaje. El posible oleaje en el depósito tiene origen local y su calado, aún el mínimo, no hace temer roturas de ola que producirían elevadas presiones de arrastre. Tampoco hay corrientes. Las uniones flexibles entre tramos

se dimensionaron para permitir a la fuente moverse con el oleaje con esfuerzos mínimos. La resistencia requerida en los tramos para su suspensión, carga y lanzamiento resultó suficiente para soportar los movimientos inducidos por el oleaje de manera tan holgada que no se creyó necesario realizar cálculos muy precisos. Tampoco las variaciones del nivel del agua en el depósito (2,4m) resultaron tener influencia suficiente en el comportamiento del sistema de cables para requerir precauciones ni cálculos adicionales.

CÁLCULOS FUNICULARES

El sistema cables-fuente sujeto a cargas horizontales plantea un sistema de ecuaciones de difícil manejo. Los tanteos permitían anticipar desplazamientos horizontales, del orden de 10m. Esto desaconsejaba aceptar ciertas simplificaciones que sólo se emplearon en dichos tanteos

Hubo que resolver otra dificultad adicional. La teoría ordinaria de los funiculares trata las cargas como vectores deslizantes mientras que, con grandes deformaciones, es preciso considerar las cargas asociadas a puntos determinados del cable, no a los ejes coordenados de referencia. Así una cierta carga se supondrá actuando en el centro del arco descrito por el cable, punto que, en el caso de deformadas asimétricas, no coincide con el centro de la luz. Asimismo un cálculo con diferentes estados de carga requiere un cálculo preciso de alargamientos del cable.

La modelización del cable en forma de cadena de arcos de catenaria se consideró inabordable desde el punto de vista numérico. Por otra parte, cuando se consideran sólo cargas concentradas, como en el caso presente, el funicular es poligonal y la discretización en forma de cadena de segmentos rectos resulta exacta.

Estas circunstancias decidieron al autor a escribir un programa de ordenador adecuado al problema al que se dio alguna flexibilidad que facilita-

ra el cálculo reiterado dado que había que hacer muchos tanteos. En este programa, el cable se modeliza mediante un conjunto de n segmentos rectos articulados entre sí (en este proyecto se utilizaron 76 tramos por cable) en cuyos nudos se suponen actuando las cargas.⁷

Las ecuaciones de equilibrio y compatibilidad de deformaciones son las siguientes:

$n-1$ ecuaciones de equilibrio en los nudos intermedios

$$\text{tga}_i - \text{tga}_{i-1} = P_i / H \quad (i = 2, 3, \dots, n)$$

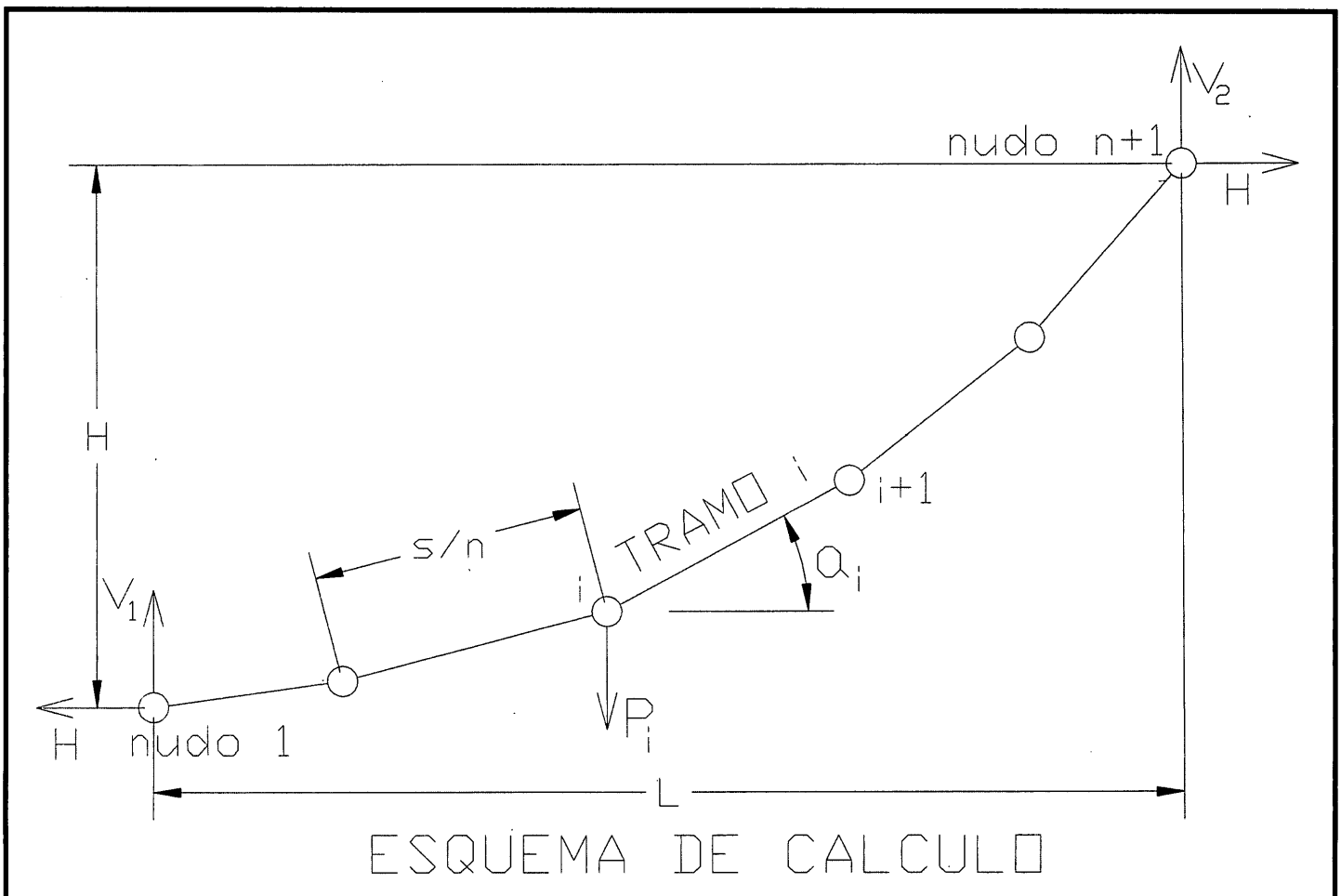
2 ecuaciones de cierre del funicular. (fig 2)

$$(s/n) \sum \cos a_i = L$$

$$(s/n) \sum \sin a_i = Y$$

En total, $n+1$ ecuaciones para otras tantas incógnitas: las n pendientes a_i de los segmentos del polígono funicular y la componente horizontal H

Figura 2.



de la tracción del cable, constante en todo él. El ajuste del cable a las condiciones establecidas: longitud del cable, valor de la reacción, valores de los corrimientos, etc. se realiza iterativamente partiendo de un valor inicial de H calculado por el propio programa. Las iteraciones se realizan mediante incrementos en las variables decididos a sentimiento mediante consideraciones habituales en el método de relajación.⁸

El sistema de iteraciones es elemental. En cuanto se han realizado las primeras se tiene idea de cuánto varían los resultados al variar unitariamente los datos. Se modifica la variable que influye más en el resultado peor ajustado tras lo que se modifican las demás variables hasta dejar el conjunto de resultados sujetos a control mejor ajustado de lo que estaba a los valores predeterminados (no importa demasiado cuánto mejor) y se repite el ciclo mientras la precisión del algoritmo lo hace útil.⁹

Antes de su uso se realizaron pruebas de precisión comparando los resultados del programa con los de la teoría¹⁰. Se incluye como ejemplo el cálculo de dos cables, uno simétrico y otro asimétrico que permiten comparar los resultados obtenidos por el programa con los del cálculo teórico.

Cable simétrico

$L = 200\text{m}$; $s = 200,08331$; $p = 24\text{kg/m}$;
 $\Omega = 30\text{cm}^2$; $E = 1.800.000\text{kg/cm}^2$

Fórmulas: $f = 2,500\text{m}$; $\Delta s = 0,17796\text{m}$;
 $T = T' = 48,070\text{t}$

Programa: $f = 2,492\text{m}$; $\Delta s = 0,17810\text{m}$;
 $T = T' = 48,107\text{t}$

$L = 200\text{m}$; $s = 200,58217$; $p = 240\text{kg/m}$;
 $\Omega = 30\text{cm}^2$; $E = 1.800.000\text{kg/cm}^2$

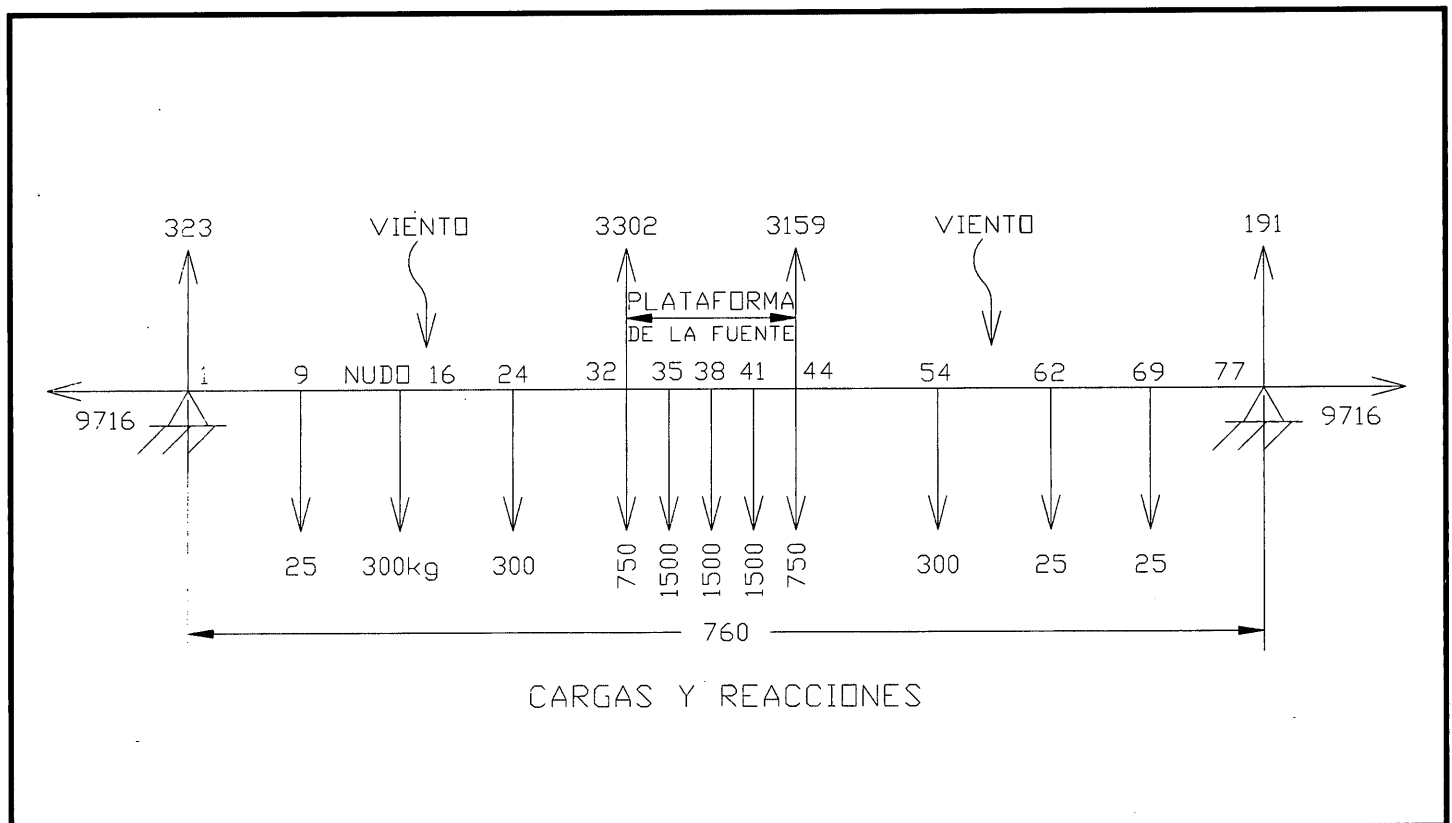
Fórmulas: $f = 6,615\text{m}$; $\Delta s = 0,676828\text{m}$;
 $T = T' = 183,271\text{t}$

Programa: $f = 6,608\text{m}$; $\Delta s = 0,676768\text{m}$;
 $T = 183,222\text{t}$; $T' = 183,225\text{t}$

donde L es la luz, s la longitud geométrica del cable¹¹, p el peso del cable, Ω el área de la sección transversal, E el módulo de elasticidad, Δs el alargamiento elástico y T la tracción en el extremo.

La corrección del cálculo para diferentes estados de carga se logra cuando la longitud del cable

Figura 3.





indeformado es, en todos ellos, la misma. En el caso anterior se obtiene

$$\begin{aligned} 200,08331 - 0,17796 &= 199,90521 \text{ en vacío} \\ 200,58217 - 0,676828 &= 199,90534 \text{ en carga} \end{aligned}$$

Cable asimétrico

Los siguientes resultados corresponden a un cable con apoyos separados horizontalmente 90m y verticalmente 14,012m y las características siguientes:

$$p = 1\text{kg/m}; \Omega = 1\text{cm}^2; E = 1.900.000\text{kg/cm}^2$$

Los resultados obtenidos fueron

$$\begin{aligned} \text{Fórmulas: } H_1 &= H_2 = 100\text{t}; \Delta s = 0,00519\text{m}; \\ \text{Long. inicial} &= 94,1122; f_{\text{máx}} = 10,414\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Programa: } H_1 &= H_2 = 99,94\text{t}; \Delta s = 0,00519\text{m}; \\ \text{Long. inicial} &= 94,1108; f_{\text{máx}} = 10,294\text{m} \end{aligned}$$

El programa de cálculo concluyó las iteraciones en simple precisión cuando la longitud horizontal era 89,996m (en vez de 90m) y el desnivel entre apoyos 14,0131 (en vez de 14,012).

APLICACIÓN A LOS CABLES DE ANCLAJE DE LA FUENTE

Como se deduce del croquis de disposición de la Fig.1, el comportamiento de la plataforma de la

Módulo con bomba sumergible.

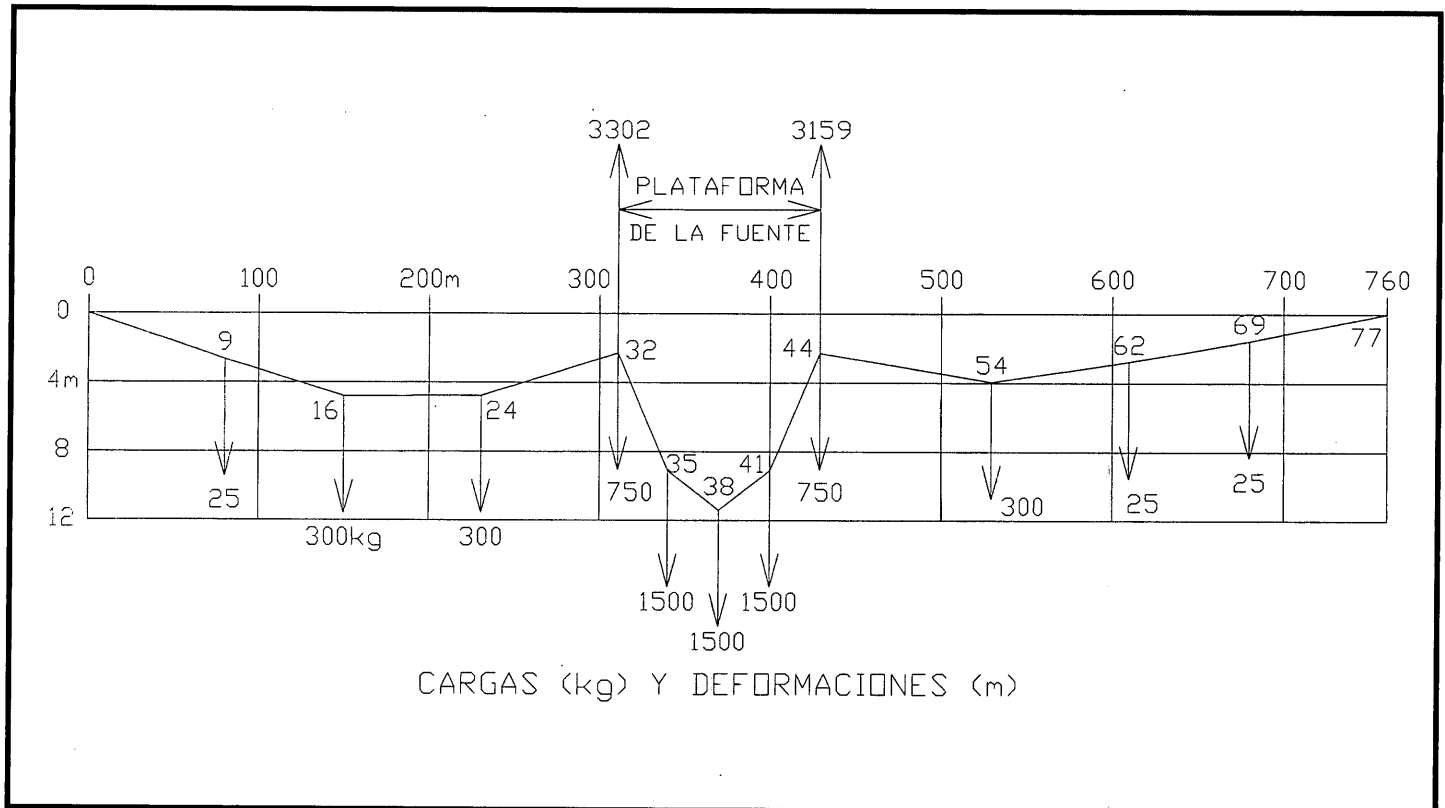


Figura 4.

fuelle es diferente para viento N-S y para viento S-N, si bien la diferencia se centra, principalmente, en el valor de los desplazamientos que son mayores en el primer caso que en el segundo por la mayor longitud (mayor elongabilidad) de los cables de anclaje. Por brevedad sólo se incluyen resultados del cálculo bajo viento N-S que son los que producen los mayores movimientos.

El modelo de cálculo utilizado es el que se esquematiza en la Fig.3 en la que las cargas dirigidas hacia arriba son las transmitidas por los cables de anclaje N-S. Estas cargas se obtuvieron de tanteos previos y se ajustó el cálculo para que los movimientos en dirección N-S en los extremos de la plataforma coincidieran con los alargamientos calculados en estos cables ($\approx 2,30\text{m}$).¹²

En el listado de resultados del programa que se incluye como Anexo 1 se han marcado algunos valores que sirvieron para el ajuste de la solución a las condiciones establecidas.

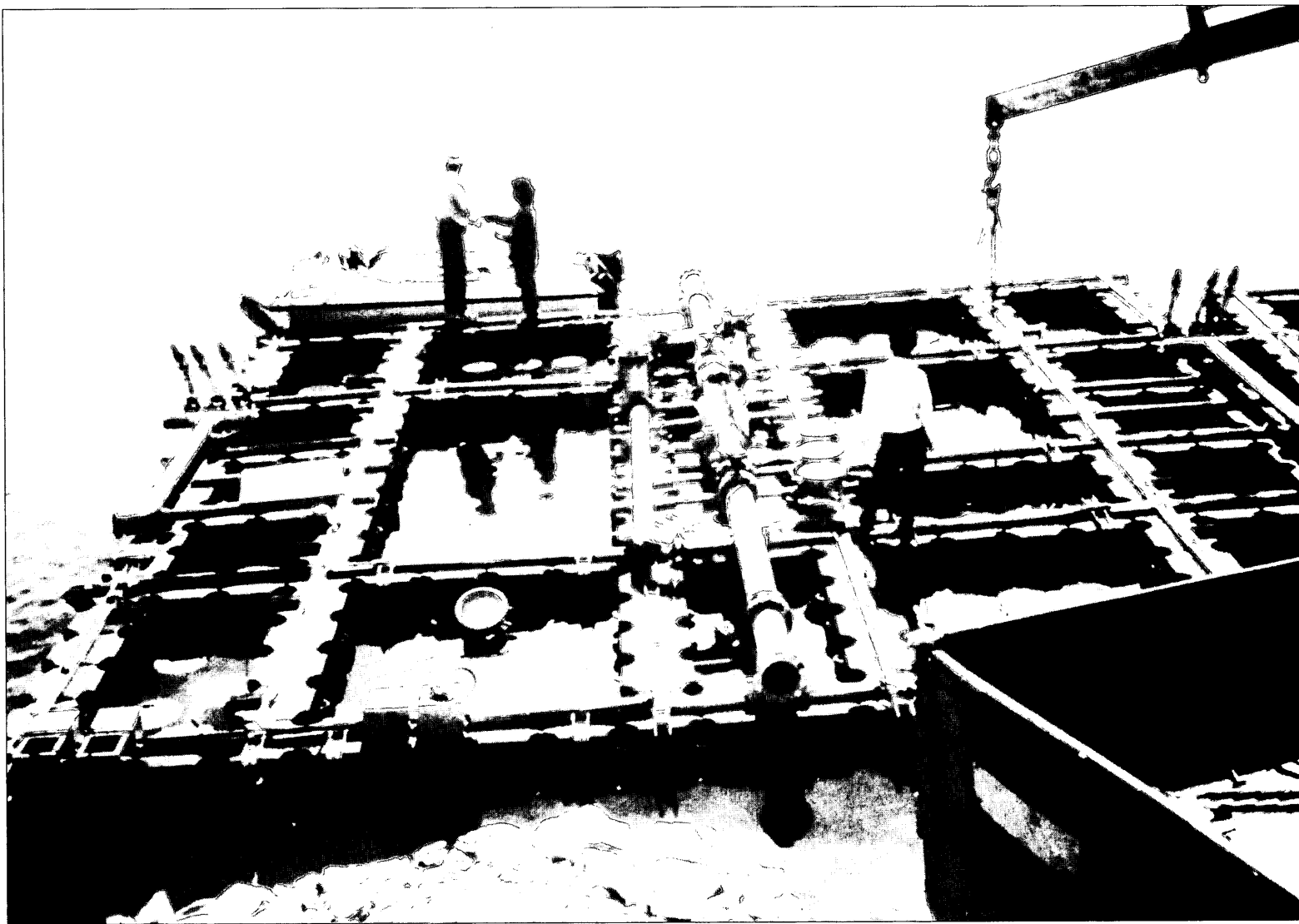
La longitud del cable indeformado (759,276m) define la tracción que debe tener en vacío para que en carga trabaje en las condiciones del cálculo. Esta tracción es:

$$T_{\text{inic}} = (0,724/760) \times 1,5\text{cm}^2 (1.900.000\text{kg/cm}^2) = 2.715\text{kg}$$

La flecha máxima se alcanza en el centro de la fuente y vale 11,403m. Este valor determina el exceso de longitud que hay que dar a los cables eléctricos para que se mantenga la conexión durante los desplazamientos de la fuente. La Fig. 4 muestra a escala realizada los desplazamientos en los nudos del modelo bajo la hipótesis anterior. (Fig. 4).

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

La intuición predice, y la experiencia confirmó, que el sistema que hay que resolver para determinar los esfuerzos y deformaciones de los cables está mal condicionado. Esto obligó a llevar las iteraciones más allá de lo habitual buscando una precisión numérica que, aunque ilusoria dado lo impreciso de las hipótesis, se juzgó necesaria para no incrementar en sentido desconocido dichas imprecisiones. Esta situación se produce siempre que se estudian cables con flechas pequeñas comparadas con la luz ya que con incrementos muy pequeños en las flechas se producen grandes variaciones en algunos resultados. La tabla siguiente contiene la variación de los movimientos



en los extremos de la fuente (nudos 32 y 44) para varios valores de las reacciones verticales de los

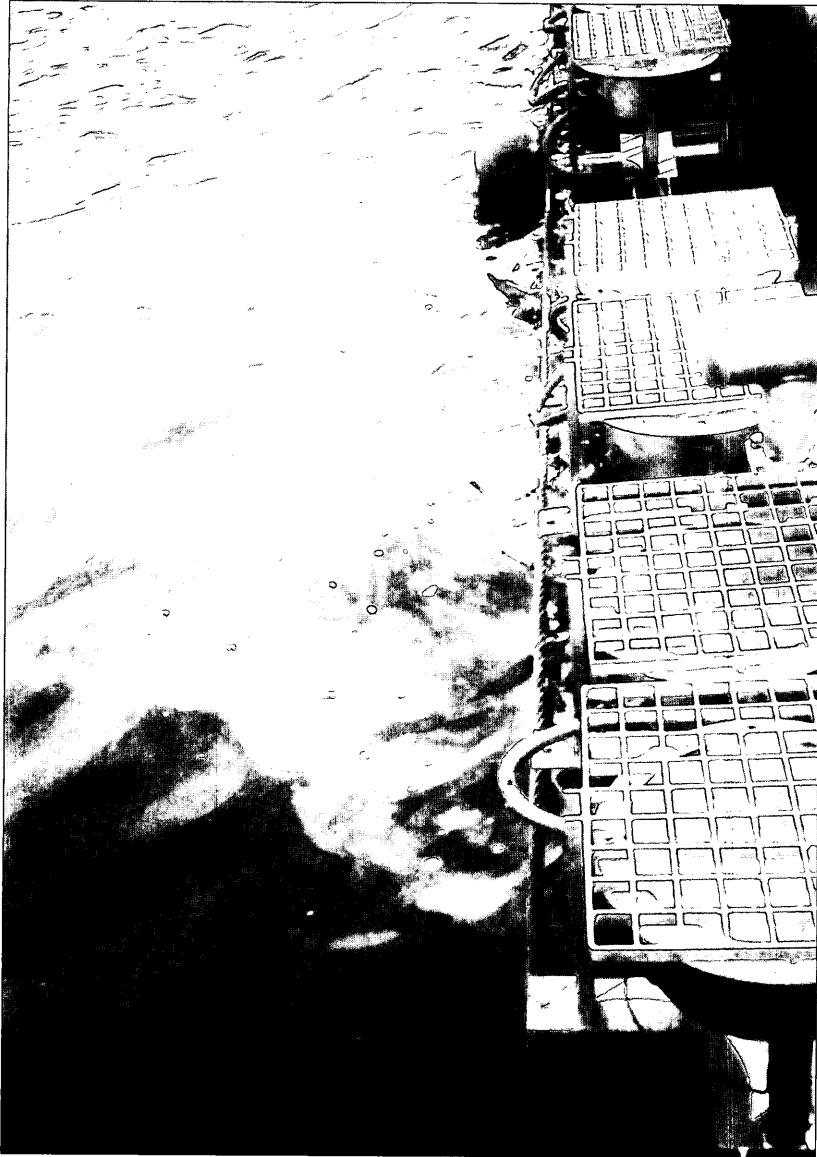
cables de anclaje N-S que actúan en dichos nudos. (Tabla 1).

Plataforma del géiser durante el montaje.

TABLA 1

VARIACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS EN LOS NUDOS 32 Y 44

$P_{32}(\text{kg})$	$P_{44}(\text{kg})$	$y_{32}(\text{m})$	$y_{44}(\text{m})$	$H(\text{kg})$	$\Delta s(\text{m})$	Observaciones
3302	3159	-2,304	-2,303	9716	0,724	Solución aceptada
3290	"	-2,537	-2,479	9706	0,721	
3315	"	-2,061	-2,122	9691	0,717	
3302	3145	-2,497	-2,570	9744	0,731	
3302	3170	-2,144	-2,084	9729	0,727	



Los cables principales de arriostramiento pasan contiguos a la plataforma.

La importancia de estas variaciones no puede minimizarse ya que el cálculo debe mantener la concordancia de los movimientos en estos nudos con las reacciones transmitidas por los cables N-S.

COMPORTAMIENTO DINÁMICO

Como se ha indicado, no se dispuso de datos de viento que permitieran estudiar el comportamiento dinámico de la fuente. El autor, que ha dedicado algunos años a conocer, aplicar y enseñar estas cuestiones, no consideró satisfactorio limitarse al cálculo estático "equivalente" de resistencia al viento y quiso hacer algunas comprobacio-

nes adicionales. En particular, consideró deseable valorar, o al menos acotar, el riesgo de resonancia bajo impulsos periódicos: rachas y olas.

Las características dinámicas de un sistema elásticamente no lineal sumergido en un líquido es complicado¹³, pero es fácil obtener la primera frecuencia propia utilizando el método de Raleigh. El valor obtenido será razonablemente fiable si las velocidades correspondientes a la oscilación en torno a la posición de equilibrio son lo bastante lentas para que el error cometido al despreciar la resistencia opuesta por el agua sea pequeño.

En la posición inicial (fuente recta) la resistencia opuesta al movimiento transversal es prácticamente nula, lo que equivale a frecuencia asimismo nula. A medida que se van produciendo deformaciones transversales la resistencia opuesta por los cables al incremento de deformación va creciendo y con ella las frecuencias propias de vibración en torno a cada posición. Ambas alcanzan su máximo en la posición de máxima amplitud de la deformada. El sistema de flotadores y cables es prácticamente simétrico y las presiones de viento también por lo que se consideró que la participación del primer modo de vibración debía ser dominante. Esto decidió a limitar el cálculo a la determinación de la primera (menor) frecuencia propia adoptando como posición de equilibrio en torno de la cual se produce la oscilación la correspondiente a las cargas de proyecto calculadas antes.

Del listado de deformaciones con cargas P se obtiene la expresión:

$$y = 11,40 - 9,1(x / 60)^2 \quad (-60 \leq x \leq 60)$$

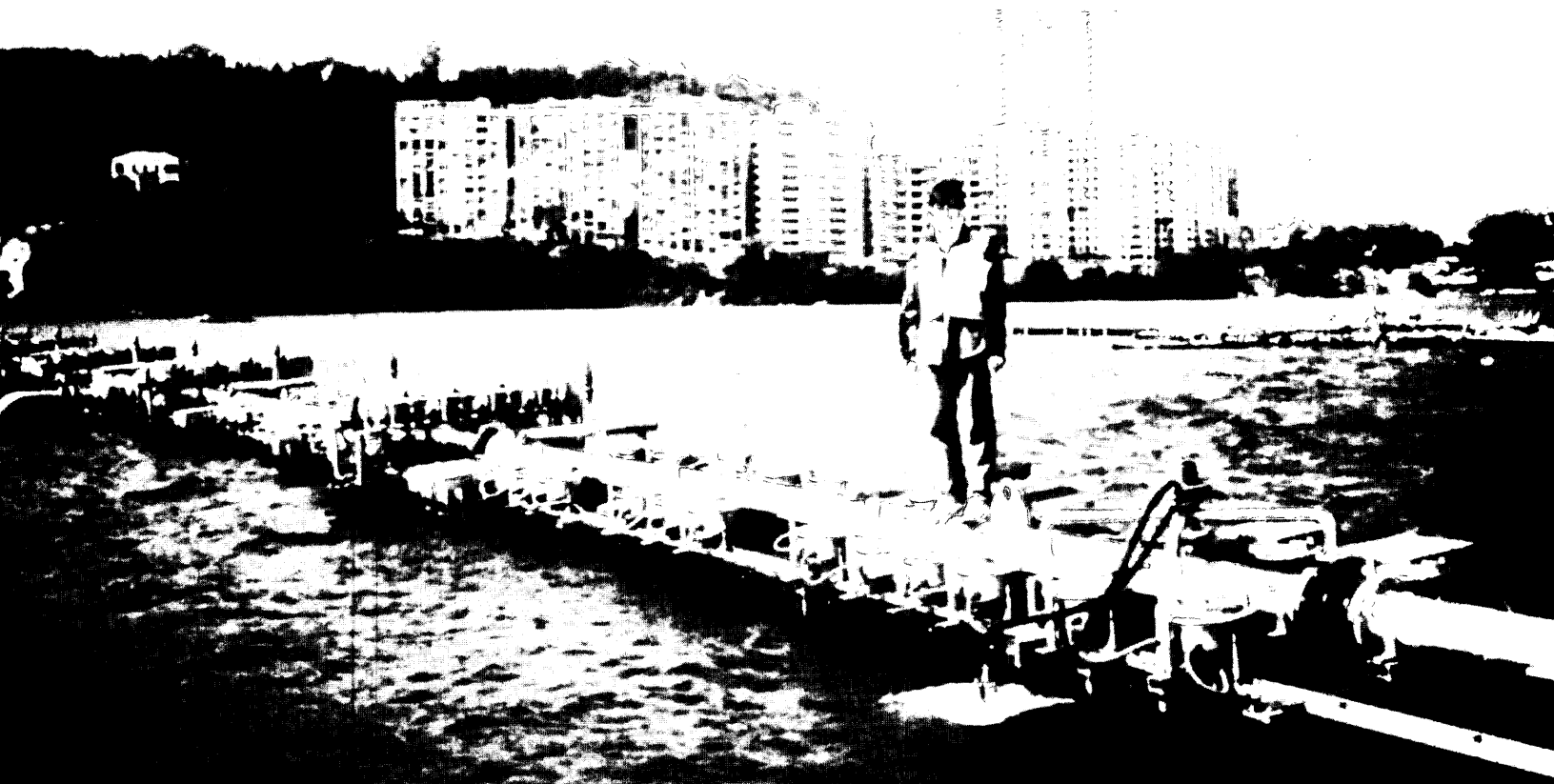
que se ajusta bien a los movimientos de la fuente tomados del listado de ordenador

La energía elástica absorbida por el cable es:

$$E_e = H(\Delta s)/2 = 9,716 \times 2,604/2 = 12,65 \text{ mt}$$

Un cálculo similar con cargas 1,1P¹⁴ permite determinar la ley de movimientos bajo esta carga aumentada en la forma $y = 11,82 - 9,5 (x / 60)^2$ $(-60 \leq x \leq 60)$ a la que corresponde una energía elástica igual a $E_e = H(\Delta s)/2 = 10,216 \times 2,739/2 = 14 \text{ mt}$ que representa un incremento de energía elástica de 1,35mt respecto al anterior.

Siendo ω la frecuencia circular de la oscilación en torno a la posición de equilibrio se puede escribir la deformada en la forma:



$$y = [11,4 - 9,1(x / 60)^2 + [0,42 - 0,4(x / 60)^2] \sin \omega t]^{15}$$

Derivando respecto al tiempo

$$v = \omega[0,42 - 0,4(x / 60)^2] \cos \omega t$$

que alcanza su máximo para $t=0$ y vale $v_{\text{máx}} = \omega[0,42 - 0,4(x / 60)^2]$ Igualando la energía potencial en la situación de máxima deformación con la cinética al paso por la posición de equilibrio se tiene:

En primer término, parte de la plataforma a flote en el lago. Detrás, la plataforma del géiser con la tobera. Entre ambas se ven los cables del enlace soportador por flotadores.

Sustituyendo $p = 0,25 \text{ t/m}$ e integrando se obtiene como frecuencia del primer modo de vibración $\omega = 3,74 \text{ rad/seg} = 0,596 \text{ Hz}$ y un periodo $T = 1,68 \text{ seg}$ demasiado corto para un oleaje y demasiado largo para viento racheado¹⁶

La máxima velocidad correspondiente a esta oscilación se alcanza en el centro de la fuente ($x = 0$) y vale $v_{\text{máx}} = 3,74 \times 0,42 = 1,57 \text{ m/seg}$. La influencia de la resistencia del agua tiende a reducir la frecuencia y la velocidad, ambas circunstancias favorables a la seguridad por lo que el cálculo anterior resulta conservador

NOTAS

-1) Cuando los plazos de ejecución son tan cortos alivia saber que la inauguración es por la noche porque da algo más de tiempo

$$\Delta E_e = \int (1/2) m v^2 dx = \frac{p}{2g} \int_{x=-60}^{x=60} v^2 dx = \frac{p \omega^2}{g} \int_{x=0}^{x=60} [0,42 - 0,4(x / 60)^2]^2 dx$$

- 2) El transporte se realizó en camión hasta Valencia, en barco hasta Hong-Kong y en gabarra hasta Macao y duró 35 días
- 3) El cálculo preferible actualmente para este tipo de acciones: tifones, tornados, etc. parte de la caída de presión por unidad de tiempo. Este dato no estuvo disponible ni tampoco los parámetros estadísticos relacionados con el fenómeno
- 4) A medida que estas ondas se propagan aparecen ondas PP, PS, etc.
- 5) El plazo ha sido tan corto que se renunció a cualquier propuesta que implicara discusiones y se aceptaron algunas soluciones que podían haberse mejorado
- 6) Durante el montaje, y antes de concluir el sistema de anclaje, se registró un tifón de severidad media pero suficiente para que muchos habitantes decidieran permanecer en sus domicilios
- 7) El programa trata el peso propio mediante cargas concentradas calculadas a partir del peso del cable y la longitud del arco. Dado que el programa se escribió para este proyecto, sólo se han incluido cargas paralelas entre sí y situadas en el plano del cable. Es posible que, en el futuro, se amplíe a cargas de dirección cualquiera
- 8) Generalmente cada cálculo particular toma pocos segundos para realizar 25 a 30 iteraciones, por lo que no compensa el trabajo requerido para plantear y resolver un sistema de ecuaciones que permitiría reducir el número de tanteos
- 9) Llega un momento en que la variación de los resultados es del orden de la tolerancia establecida en el programa para dar por terminado el proceso. A partir de esta situación carece de interés tratar de afinar los valores de las variables de entrada salvo si se reduce dicha tolerancia o se opera en doble precisión

- 10) Durante las pruebas del programa se detectó que el algoritmo utilizado producía, con cierta frecuencia, resultados oscilantes que hicieron temer que la convergencia no se alcanzara en algunos casos. Corregido el algoritmo mediante un factor de atenuación se logró soslayar el problema a costa de perder rapidez en ciertos casos
- 11) Es decir, la longitud de la poligonal descrita por el cable ya deformado por los alargamientos elásticos
- 12) El ajuste de la solución a estos corrimientos resultó ser uno de los aspectos más delicados del cálculo dada la gran sensibilidad de los resultados a pequeñas variaciones en los datos. En varios casos hubo que acotar la solución entre dos obtenidas con errores de cierre diferentes y, por tanto, con diferente fiabilidad
- 13) Hay programas que permiten estos cálculos, pero piden tantos datos que se ignoraban que se decidió prescindir de un cálculo costoso y sofisticado basado en datos casi inventados (p. ej.: la rigidez del sistema de flotadores de goma) y aplicar la fantasía al proceso de cálculo en lugar de inventar los datos y creerse los resultados, hecho inevitable después de lo que hubiera costado obtenerlos
- 14) Las reacciones en los nudos 32 y 44 tuvieron que ser calculadas de nuevo ya que no crecen linealmente con las cargas
- 15) El primer sumando es la deformada estática en torno a la cual se produce la oscilación y el segundo es la variación temporal de dicha deformada. Esto equivale a tomar dicho sumando como deformada modal
- 16) El lago carece de obstáculos que pudieran inducir remolinos de Karman que podrían cuestionar esta conclusión. ●

ANEXO 1

CÁLCULO BAJO VIENTO N-S CON CARGAS REALES

Longitud horizontal = 760 m
Longitud vertical = 0
Longitud del cable = 761.88 m
Número de partes = 76

Longitud de cada parte = 10.02474 m
Sección transversal = 1.5 cm²
Módulo de elasticidad = 1900000 kg/cm²
Peso del cable = 0

CARGAS EN LOS NUDOS (INCLUYENDO LA PARTE PROPORCIONAL DE PESO PROPIO)

N	CARGA(KG)	N	CARGA(KG)	N	CARGA(KG)	N	CARGA(KG)
9	25	16	300	24	300	32	-2552
35	1500	38	1500	41	1500	44	-2409
54	300	62	25	69	25		

REACCIONES SOBRE EL CABLE EN LOS ANCLAJES

H1 = -9716.221; V₁ = 322.8865; T₁ = 9721.584

H2 = 9716.221; V₂ = 191.1133; T₂ = 9718.1

DEFINICIÓN DE LA DIRECTRIZ

N	X(M)	Y(M)	N	X(M)	Y(M)
1	0	0	2	10.01921	-0.3329552
3	20.03841	-0.6659105	4	30.05762	-0.9988657
5	40.07682	-1.331821	6	50.09603	-1.664776
7	60.11524	-1.997731	8	70.13445	-2.330687
9	80.15365	-2.663642	10	90.17368	-2.970843
11	100.1937	-3.278044	12	110.2137	-3.585245
13	120.2338	-3.892446	14	130.2538	-4.199646
15	140.2738	-4.506847	16	150.2939	-4.814048
17	160.3186	-4.811868	18	170.3433	-4.809687
19	180.3681	-4.807507	20	190.3928	-4.805326
21	200.4175	-4.803145	22	210.4423	-4.800965
23	220.467	-4.798784	24	230.4917	-4.796604
25	240.5116	-4.485048	26	250.5315	-4.173492
27	260.5514	-3.861936	28	270.5713	-3.55038
29	280.5912	-3.238824	30	290.6111	-2.927269
31	300.631	-2.615713	32	310.6509	-2.304157 (-2,300)
33	320.4172	-4.565645	34	330.1836	-6.827133
35	339.9499	-9.08862	36	349.9449	-9.860023
37	359.9399	-10.63143	38	369.935	-11.40283
39	379.93	-10.6312	40	389.925	-9.85956
41	399.92	-9.087925	42	409.6862	-6.826221
43	419.4525	-4.564517	44	429.2188	-2.302813 (-2,300)
45	439.2422	-2.466723	46	449.2656	-2.630633
47	459.289	-2.794543	48	469.3124	-2.958453
49	479.3358	-3.122363	50	489.3592	-3.286273
51	499.3826	-3.450182	52	509.406	-3.614092
53	519.4294	-3.778002	54	529.4528	-3.941912
55	539.4764	-3.796334	56	549.5001	-3.650755
57	559.5238	-3.505176	58	569.5475	-3.359598
59	579.5712	-3.214019	60	589.5948	-3.06844
61	599.6185	-2.922862	62	609.6422	-2.777283
63	619.6655	-2.60592	64	629.6887	-2.434557
65	639.712	-2.263195	66	649.7352	-2.091832
67	659.7585	-1.920469	68	669.7817	-1.749106
69	679.805	-1.577743	70	689.8278	-1.3806
71	699.8506	-1.183457	72	709.8735	-0.986313
73	719.8963	-0.7891695	74	729.9191	-0.5920261
75	739.942	-0.3948826	76	749.9648	-0.1977391
77	759.9876	-5.955764E-04	78	0	0
	(760,000)	(0,000)			

Alargamiento del cable = 2.603996 m

Longitud inicial antes del tendido = 759.276 m

Flecha máxima = 11.40283 m

ANEXO 2

CÁLCULO BAJO VIENTO N-S CON CARGAS MAYORADAS

Longitud horizontal = 760 m
Longitud vertical = 0
Longitud del cable = 761.015 m
Número de partes = 76

Longitud de cada parte = 10.01336 m
Sección transversal = 1.5 cm²
Módulo de elasticidad = 1900000 kg/cm²
Peso del cable = 0

CARGAS EN LOS NUDOS (INCLUYENDO LA PARTE PROPORCIONAL DE PESO PROPIO)

N	CARGA(KG)	N	CARGA(KG)	N	CARGA(KG)	N	CARGA(KG)
9	27.5	16	330	24	330	32	-2802
35	1650	38	1650	41	1650	44	-2648
54	330	62	27.5	69	27.5		

REACCIONES SOBRE EL CABLE EN LOS ANCLAJES

H 1 = -14708.36; V 1 = 358.7017; T 1 = 14712.73

H 2 = 14708.36; V 2 = 213.7982; T 2 = 14709.92

DEFINICIÓN DE LA DIRECTRIZ

N	X(M)	Y(M)	N	X(M)	Y(M)
1	0	0	2	10.01038	-0.2441292
3	20.02076	-0.4882583	4	30.03114	-0.7323875
5	40.04152	-0.9765167	6	50.0519	-1.220646
7	60.06227	-1.464775	8	70.07265	-1.708904
9	80.08303	-1.953033	10	90.09385	-2.178456
11	100.1047	-2.403879	12	110.1155	-2.629302
13	120.1263	-2.854725	14	130.1371	-3.080148
15	140.1479	-3.30557	16	150.1588	-3.530993
17	160.1721	-3.531811	18	170.1855	-3.532629
19	180.1988	-3.533447	20	190.2122	-3.534265
21	200.2255	-3.535083	22	210.2389	-3.535901
23	220.2522	-3.536719	24	230.2656	-3.537537
25	240.2764	-3.31375	26	250.2873	-3.089962
27	260.2981	-2.866174	28	270.309	-2.642386
29	280.3199	-2.418598	30	290.3307	-2.194811
31	300.3416	-1.971023	32	310.3524	-1.747235
33	320.2272	-3.407664	34	330.1019	-5.068094
35	339.9766	-6.728523	36	349.9743	-7.288078
37	359.972	-7.847632	38	369.9698	-8.407187
39	379.9673	-7.845196	40	389.9649	-7.283204
41	399.9624	-6.721212	42	409.8368	-5.058435
43	419.7111	-3.395658	44	429.5854	-1.73288
45	439.5981	-1.849425	46	449.6107	-1.96597
47	459.6234	-2.082515	48	469.6361	-2.199061
49	479.6487	-2.315606	50	489.6614	-2.432151
51	499.6741	-2.548696	52	509.6867	-2.665241
53	519.6994	-2.781787	54	529.7121	-2.898332
55	539.7249	-2.790229	56	549.7376	-2.682127
57	559.7504	-2.574024	58	569.7631	-2.465922
59	579.7759	-2.357819	60	589.7886	-2.249717
61	599.8014	-2.141614	62	609.8141	-2.033511
63	619.8267	-1.906691	64	629.8393	-1.779871
65	639.8519	-1.65305	66	649.8644	-1.52623
67	659.877	-1.399409	68	669.8896	-1.272589
69	679.9022	-1.145768	70	689.9144	-1.000231
71	699.9267	-0.8546942	72	709.939	-0.7091571
73	719.9512	-0.56362	74	729.9635	-0.418083
75	739.9758	-0.2725459	76	749.988	-0.1270089
77	760.0003	1.852819E-02	78	0	0

Alargamiento del cable = 3.932766 m

Longitud inicial antes del tendido = 757.0823 m

Flecha máxima = 8.407187 m