

MUELLES DE HORMIGON ARMADO DE CUANTIA DE HIERRO REDUCIDA

Por ANTONIO DURAN,

Ingeniero de Caminos.

Consideramos de especial interés el presente artículo por el hecho de ser la reseña de una obra construida, que constituye, además, una solución muy adecuada a las circunstancias, y porque una vez descrita ésta con claridad y sencillez, y expuesto igualmente el método de cálculo adoptado, hace el autor una serie de consideraciones sobre el tipo de obra que completa el valor informativo del trabajo, que puede ser de gran utilidad para muchos compañeros.

Por si pudiera interesarle a alguien, vamos a dar cuenta del tipo de muelle ejecutado en Puerto de Santa María, para reconstruir un trozo, contiguo al Cargadero de la Sal, que se derrumbó al deslizarse con motivo de una pleamar viva que, desbordando por encima de la coronación, empapó el terraplén del trasdós, y al bajar la marea, el retraso en el descenso del nivel de agua que empapaba el mismo produjo un incremento en sus empujes, que unidos a la esbeltez del muro produjeron su deslizamiento y rotura en la forma que se indica en las figuras 1.^a y 2.^a de este artículo.

En el ángulo superior derecho de la figura 2.^a, se ve un trozo de la estructura metálica del Cargadero de la Sal, contiguo al trozo averiado del muelle que, como puede apreciarse en dicha fotografía y en la figura 3.^a, *Plano de situación*, constituía la línea de atraque de los barcos que utilizaban dicho cargadero.

En estas condiciones y con objeto de evitar la paralización del embarque de sal, era necesario estudiar una solución que se pudiera ejecutar sin impedir el acceso de los barcos al cargadero, y sobre todo que su construcción no pusiera en peligro la seguridad, tanto del cargadero como del almacén contiguo, por lo cual hubo que renunciar a la solución clásica de muro de bloques, ya que el dragado de la zanja de cimentación de este tipo de muelle podría ocasionar la caída de ambos.

Después de varios tanteos, optamos por la solución que vamos a exponer, consistente, como puede apreciarse en la figura 4.^a, en un tablestacado atirantado, de hormigón armado, formado por *yuxtaposición* de pilotes moldeados *in situ*, cuyas cabezas, en una altura de un metro sobre la B. M. V. E., se encepán con una viga corrida horizontal, de hormigón armado, y un metro de canto, en la cual se anclan por su cara interior vertical los tirantes que sostienen el tablestacado, y por su cara superior horizontal, en el

mismo punto que éstos, unos pies derechos también armados, en los que se empotran losas de hormigón armado de 0,20 m. de espesor, constituyendo entre ambos el paramento del muelle desde la B. M. V. E. hasta la coronación, que está constituida por una viga longitudinal que arriostra entre sí los pies derechos resistentes del mismo.

El examen de la figura 4.^a aclarará suficientemente cualquier duda, pudiendo apreciarse en la misma que la separación entre pies derechos verticales, y por tanto entre tirantes, es de 2,60 m., y que el esfuerzo de tracción de éstos lo referimos a un muro de anclaje paralelo al cantil del muelle de 1,25 m. de ancho y 2,50 de altura.

En la figura 5.^a se indican con todo detalle la sección y armadura de un pilote del tablestacado, de las vigas horizontales de arriostramiento, pies derechos y losas del paramento, entre éstos.

Más adelante expondremos el método seguido para el cálculo de este muelle.

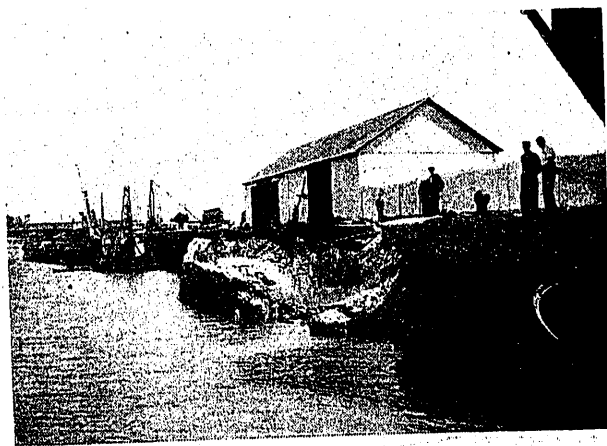


Fig. 1.^a — Vista del muelle derruido.

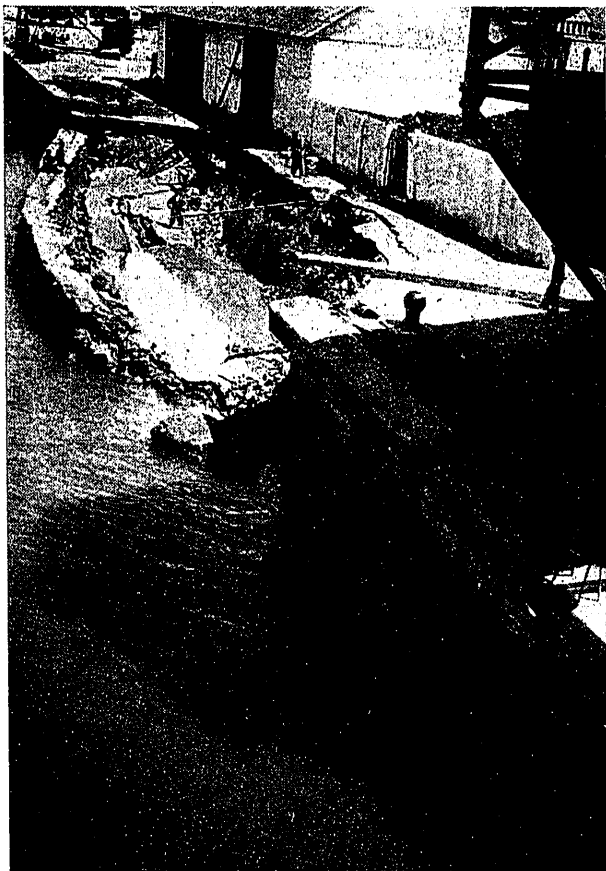
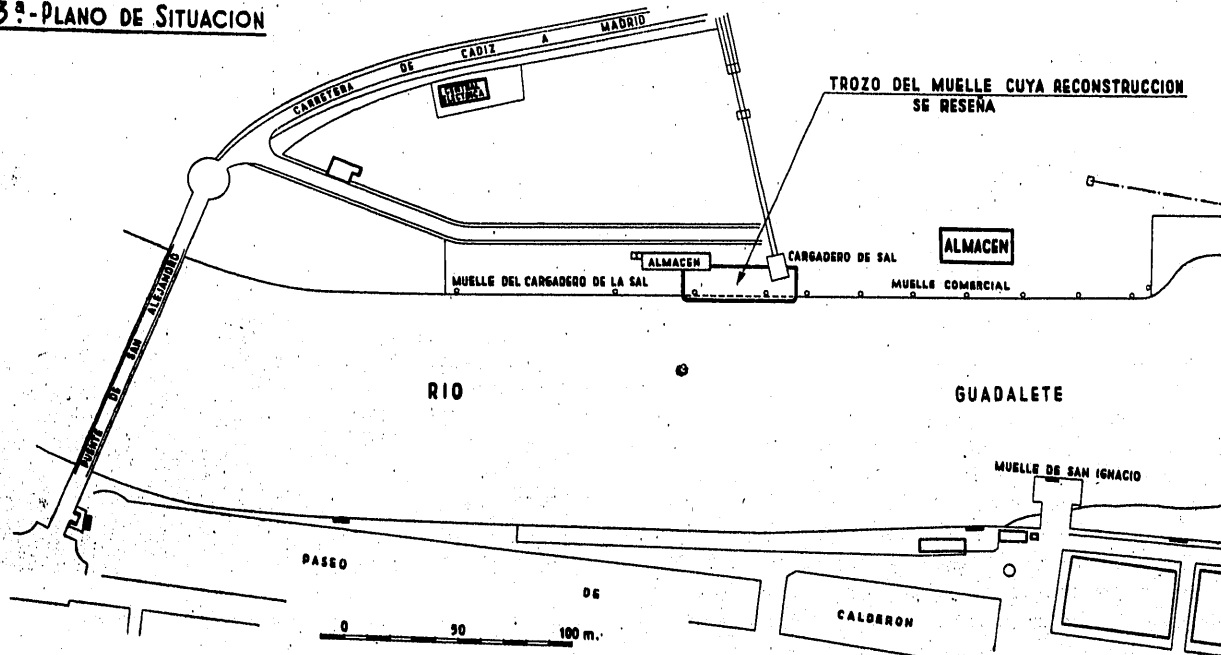


Fig. 2.^a — Vista del muelle derruido.

Construcción.

Adoptada la solución expuesta, se procedió inmediatamente a la extracción del muro derruido y y

FIG. 3.^a — PLANO DE SITUACION



dragado del terraplén hasta la cota — 3 m., ejecutándose a continuación un tablestacado provisional de madera, paralelo al definitivo, y por fuera del mismo, en la forma que se indica en las figuras 6.^a y 7.^a. Este tablestacado estaba constituido por una serie de pilotes de madera hincados en el fondo y apoyados en ellos, y por dentro, fajinas que constituían la pantalla propiamente dicha, detrás de la cual se terraplenó hasta la altura de la B. M. V. E.

En esta forma los barcos podían fondear paralelos al muelle antiguo, arrimándose al tablestacado provisional lo suficiente para utilizar el cargadero que se ve en la figura 6.^a.

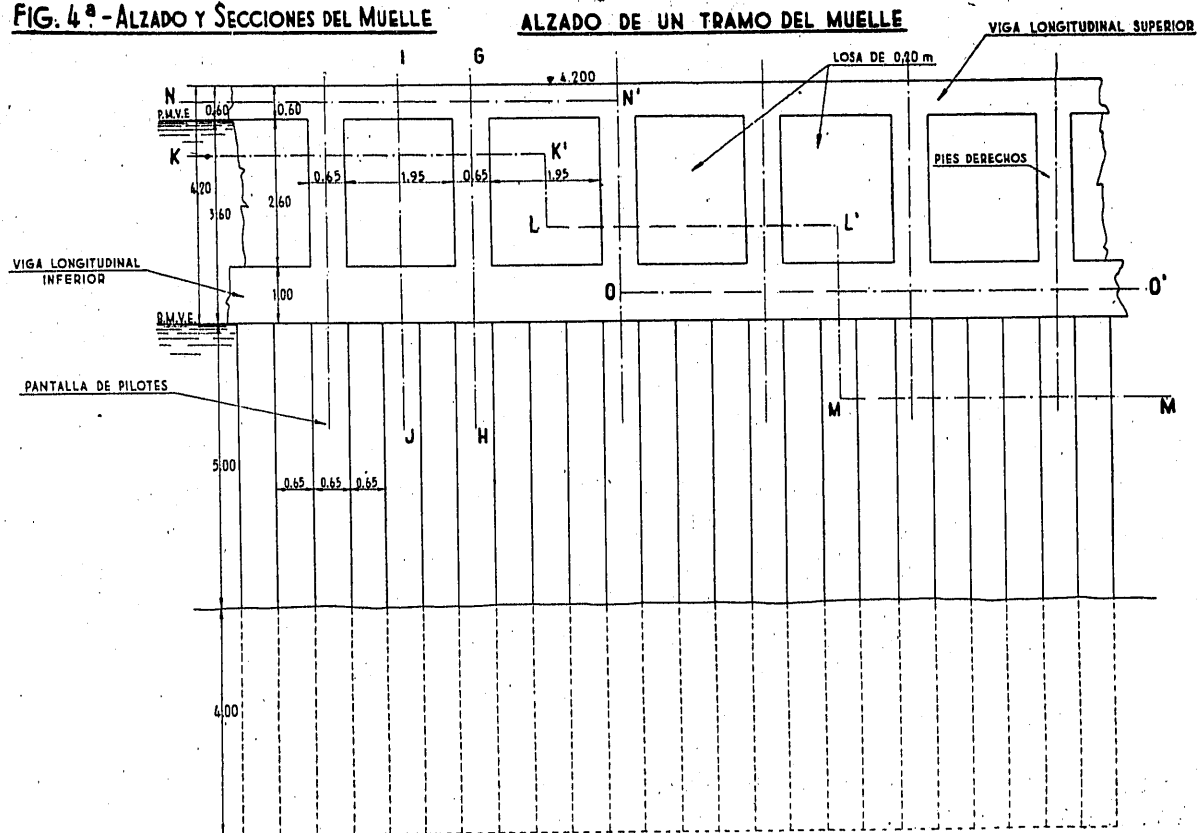
Ejecutado el tablestacado provisional se procedió a la construcción de la pantalla definitiva de pilotes *in situ*, montando la plataforma que se ve en la figura 8.^a, en la que se aprecia claramente el trípode para el manejo de los tubos y del trépano de perforación, así como el cabestrante que acciona ambos. En el ángulo izquierdo aparece la popa de un barco que está utilizando el cargadero, sin dificultad alguna, mientras se ejecutan los trabajos.

En la figura 9.^a se recoge una fase de la ejecución de los pilotes de pantalla.

La forma en planta de este muelle es la dibujada en la figura 10, señalándose de puntos los tirantes del tablestacado y el muro de anclaje de los mismos. El paramento exterior o cantil del nuevo muelle está en el plano vertical, tangente a las defensas de hormigón del muelle comercial contiguo.

Terminada la pantalla de pilotes se procedió a la ejecución de la viga longitudinal de arriostramiento de los mismos, aprovechando unas bajamares vivas. En las figuras 11 y 12 se ve la viga hormigonada y las armaduras de los pies derechos verticales que re-

FIG. 4ª - ALZADO Y SECCIONES DEL MUELLE



SECCION G-H DE LA PANTALLA DEL MUELLE POR UN PIE DERECHO Y TIRANTE DE LA SUPERESTRUCTURA

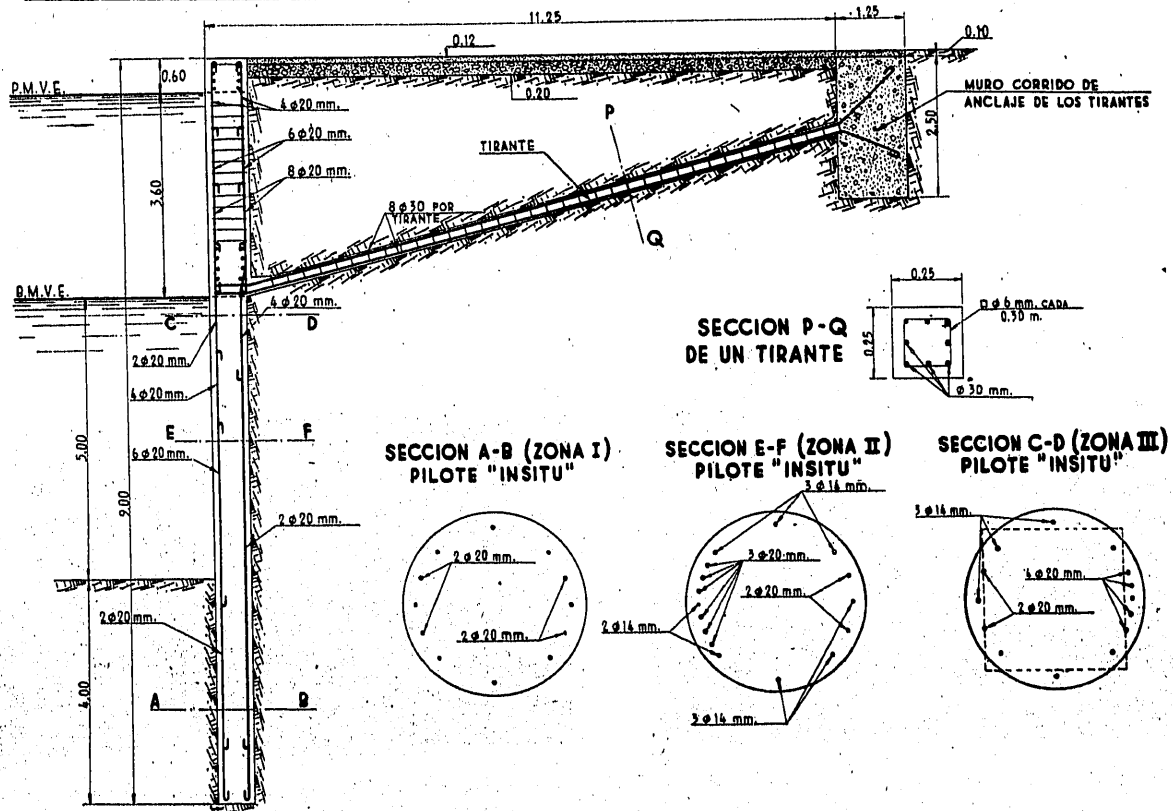
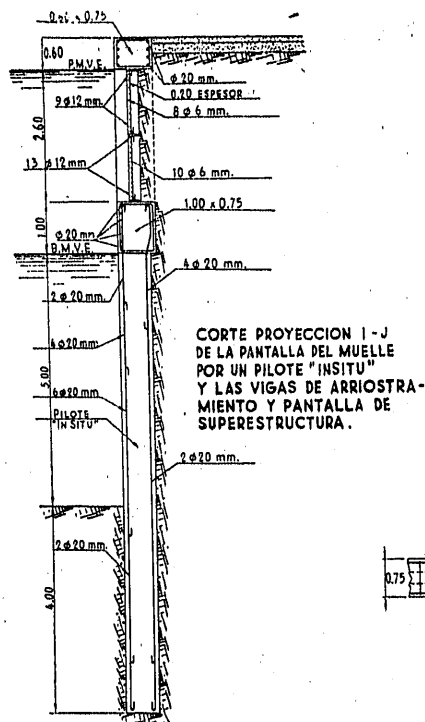
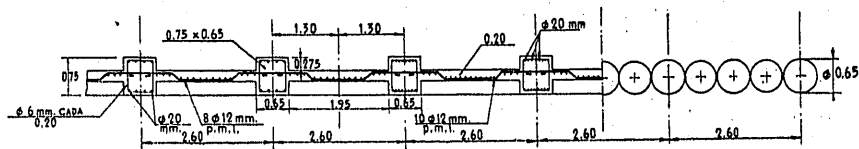


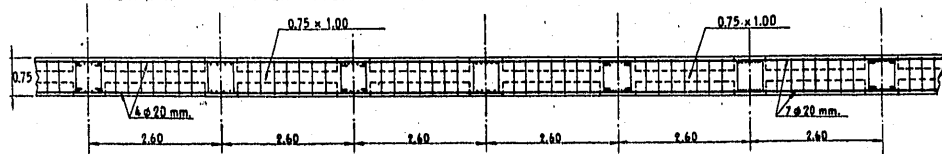
FIG. 5ª- SECCIONES TIPO



SECCION K-K'-L'-M-M' DE LA SUPERESTRUCTURA Y PILOTES "IN SITU"



SECCION N-N'-O-O' DE LAS VIGAS SUPERIOR E INFERIOR DE ARRIOSTRAMIENTO



sisten los empujes del paramento del muelle desde la B. M. V. E. a la coronación.

Terminado el muelle en su totalidad, fué extraída la pantalla provisional de madera y dragada la zona contigua al muelle a — 5 m., quedando en disposición de prestar servicio, como se ve en las figuras 13 y 14.

Considero de justicia hacer constar la eficaz colaboración en el proyecto de mi querido compañero Raúl Celestino y la magnífica labor desarrollada por la Empresa "Sondeos, Inyecciones y Pilotes", constructora de esta obra, y por su personal técnico, que trabajó con todo entusiasmo en la realización de la

misma, demostrando una gran competencia y preparación para este tipo de trabajos.

Cálculo de este tipo de muelles.

Vamos a desarrollar, en líneas generales, el cálculo del muelle que consideramos para un calado de 5 metros en B. M. V. E. y una carrera de marea de 3,60 m., y la coronación a 0,60 m. sobre la P. M. V. E.

Hemos supuesto lo mismo que en el muelle comercial contiguo, una sobrecarga de 3 Tn./m.² y las



Fig. 6.ª — Construcción del tablestacado provisional de madera.



Fig. 7.ª — Vista del tablestacado provisional.

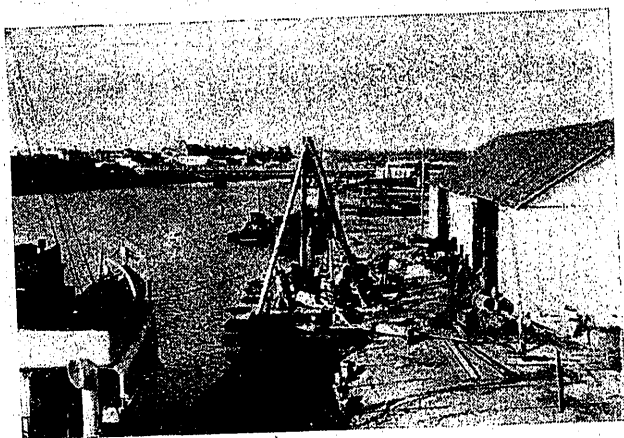


Fig. 8.ª — Ejecución de la pantalla de pilotes *in situ*.

siguientes características del terraplén, de acuerdo con los resultados de los sondeos ejecutados:

$$\begin{aligned} \text{Sobre el agua} \dots \left\{ \begin{array}{l} \Delta_1 = 1,80 \text{ Tn./m.}^3 \dots \lambda_a = 0,488 \\ \varphi_1 = 35^\circ \dots \lambda_p = 6,642 \end{array} \right. \\ \text{Bajo el agua} \dots \left\{ \begin{array}{l} \Delta_2 = 1,10 \text{ Tn./m.}^3 \dots \lambda'_a = 0,298 \\ \varphi_2 = 35^\circ \dots \lambda'_p = 4,059 \end{array} \right. \end{aligned}$$

Admitiremos un retraso de la marea de 1 m. y ésta en B. M. V. E., que es la posición más desfavorable.

La sobrecarga de 3 Tn./m.² equivale a una altura de terraplén:

$$n_1 = \frac{3,00}{1,80} = 1,67.$$

Por tanto, el valor de h espesor de la capa de terreno será:

$$h = 3,20 + n_1 = 4,87.$$

Las presiones máximas que nos permiten dibujar la ley de variación de éstas, las obtendremos de los valores de h y λ_a ; en efecto:

$$g_a = \lambda_a \times h = 0,488 \times (3,20 + 1,67) = 2,38 \text{ Tn.}$$

En la capa de terreno sumergido la altura de terreno equivalente a la sobrecarga será:

$$n_2 = h \times \frac{1,80}{1,10} = 7,97 \text{ m.,}$$

por tanto:

$$h' = 6,00 + 7,97 = 13,97 \text{ m.,}$$

de cuyo valor obtendremos:

$$g'_a = \lambda'_a \times h' = 0,298 \times 13,97 = 4,16 \text{ Tn.}$$

Con objeto de no alargar demasiado éste artículo,

puede verse el procedimiento seguido en el *Manual Larsen*, edición 1938, sobre el cual desarrollamos todos estos cálculos. Por tanto, y siendo $\varphi > 25^\circ$, tendremos:

$$\text{Profundidad del apoyo teórico: } x = \frac{1}{10} h' = 1,397 \text{ m.}$$

(por debajo del fondo).

El valor de a , distancia que fija el punto donde se igualan el empuje activo y el pasivo, se obtiene fácilmente por semejanza de triángulos y vale:

$$a = \frac{g'_a + 1}{2\lambda'_p - \lambda'_a} = \frac{4,16 + 1,00}{7,52} = 0,66.$$

Conocidos estos valores se dibuja fácilmente la ley de presiones, total suma de los empujes del terraplén más las cargas hidrostáticas debidas a la diferencia de nivel entre el trasdós y el intradós del muelle. Sobre estas leyes de presiones hemos estudiado



Fig. 9.ª — Ejecución de un pilote.



REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS

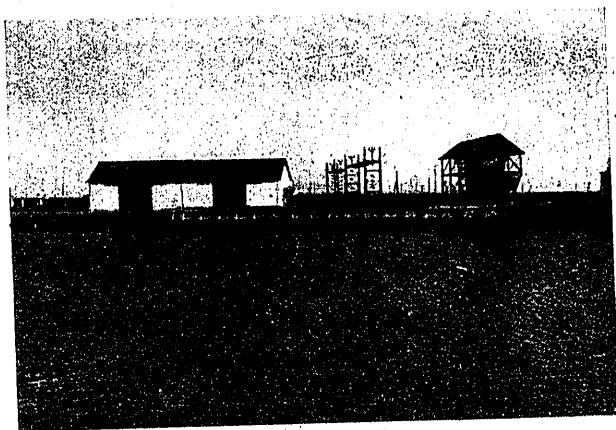


Fig. 13. — Vista del muelle reconstruido y cargadero de la sal.

la posición más favorable del tirante, y después de varios tanteos llegamos a la conclusión de que es aquélla en la que el tirante se coloca a la altura de la B. M. V. E., obteniéndose en la forma indicada en la figura 15 los valores de la tensión del tirante, A_0 , de la fuerza ficticia, B_0 , en la parte hincada y del momento máximo y ley de momentos que debe resistir el tablestacado, representando esta última en la figura 16. Los valores citados obtenidos gráficamente son por metro lineal de muelle:

$$A_0 = 23,60 \text{ Tn.}$$

$$B_0 = 8,64 \text{ Tn.}$$

$$M_{\text{máx}} = 1,10 \times 15 = 26,50 \text{ m./Tn.}$$

La profundidad de hincia por la fórmula general será:

$$h = 16,0 \cdot a - 0,60 x + 1,20 \sqrt{\frac{6 B_0}{2 \lambda_p - \lambda_a}} = 3,40 \text{ m.}$$

Conocida la longitud de hincia y la ley de momentos que el mismo soporta dibujada en la figura 16, se puede proceder fácilmente al cálculo de las dimensiones y armaduras de las diferentes partes del muelle.

Cálculo de los tirantes.

Los mismos irán separados entre sí cuatro pilotes (2,60 m.), coincidiendo sus ejes con los de los pilotes respectivos.

La tensión que tiene que resistir cada tirante, teniendo en cuenta que los mismos tienen una inclinación de 15° con la horizontal, será la siguiente:

$$T = \frac{A_0 \times 2,60}{\cos 15^\circ} = \frac{23,60 \times 2,60}{0,966} = 63,5 \text{ Tn.}$$

La armadura necesaria para resistir este esfuerzo trabajando el acero a 1200 Kg./cm.^2 , será:

$$S = \frac{63,500}{1200} = 53 \text{ cm.}^2 \approx 8 \phi 30 \text{ mm.}$$

Como puede verse en las figuras correspondientes, los tirantes están constituidos por sendas barras de hormigón, armadas adecuadamente con la armadura que acabamos de calcular.

Si en el momento de la construcción hubiéramos dispuesto de cables, posiblemente habríamos sustituido los tirantes de hormigón por cables de acero galvanizados, de composición 1×61 y 60 mm. de diámetro, con carga de rotura de 140 Kg./m./m.^2 , dotados de los dispositivos convenientes para su anclaje y tensado.

Para asegurar la protección de estos cables contra la oxidación, deberán colocarse cuidadosamente engrasados y envueltos en yute impregnado en algún producto bituminoso impermeabilizante.

Muro de anclaje de los tirantes.

Siguiendo el criterio de reducir a un mínimo el consumo de hierro, y por permitirlo el terraplén, hemos adoptado para el anclaje de los tirantes un muro corrido de hormigón en masa de las características antes reseñadas, en el cual se empotran los hierros de cada tirante en la longitud necesaria para resistir por adherencia la tensión a que están sometidos.

Tanto el cálculo de esta longitud de empotramiento como el de las dimensiones del muro son elementales.

En muchos casos, y cuando las circunstancias técnicas y económicas así lo requieran, habrá que sustituir el muro de anclaje que acabamos de reseñar por cualquiera de los tipos conocidos, tales como placas de hormigón armado o fundición, pilotes inclinados, etc.

Con lo expuesto creemos dejar suficientemente aclarada la forma de llevar a cabo el cálculo de este tipo de muelles.

Como información, y con vistas a simplificar el trabajo de algún compañero en la comparación de varias soluciones de muelle, al estudiar un proyecto, considero conveniente reseñar a continuación tres perfi-

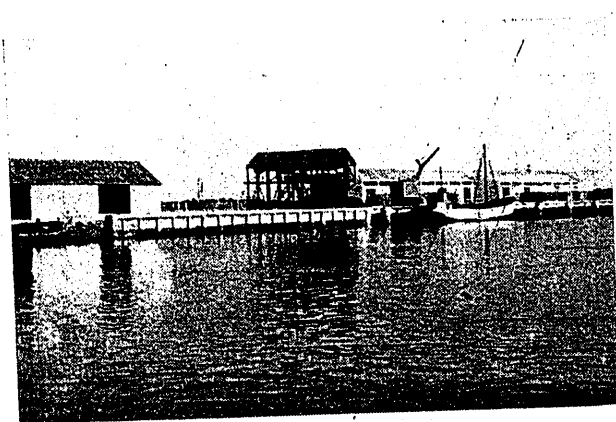
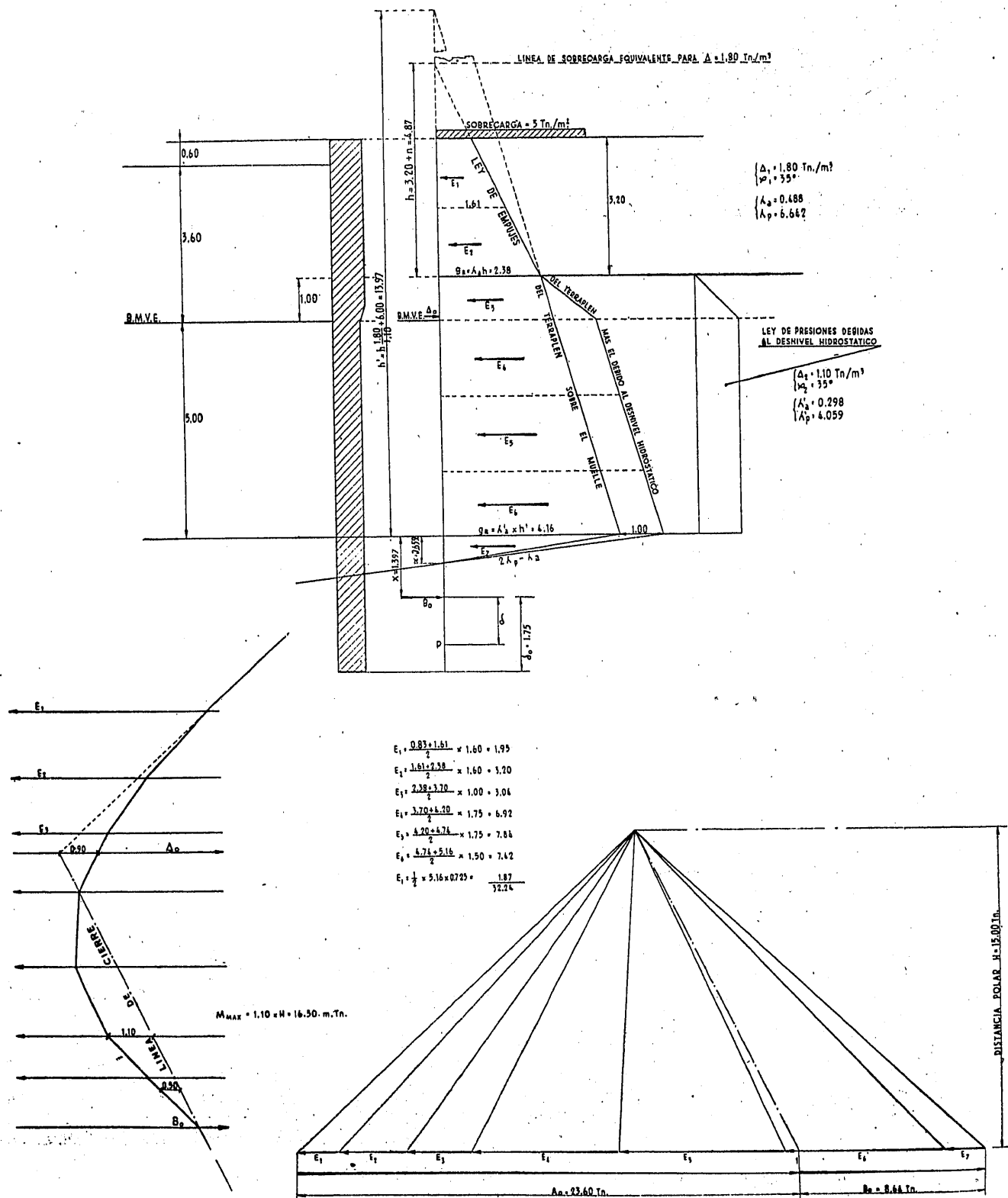


Fig. 14. — Vista de conjunto del muelle reconstruido y el comercial.

Fig. 15. — DETERMINACIÓN GRÁFICA DE A_0 , B_0 y M .



LEY DE MOMENTOS FLECTORES Y DIAGRAMA DE TENSIONES EN EL MUELLE

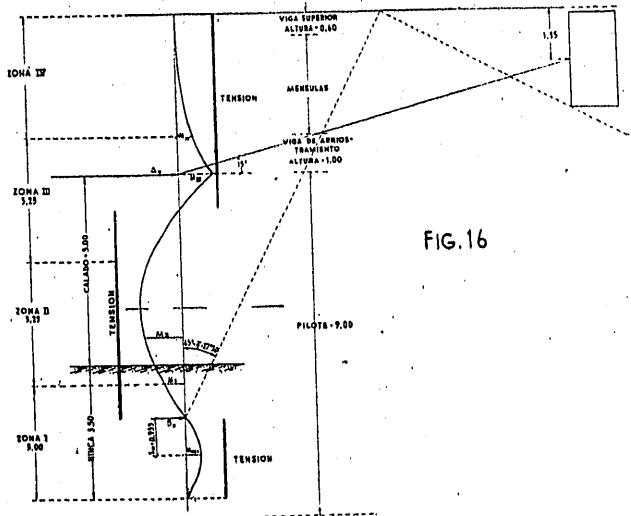


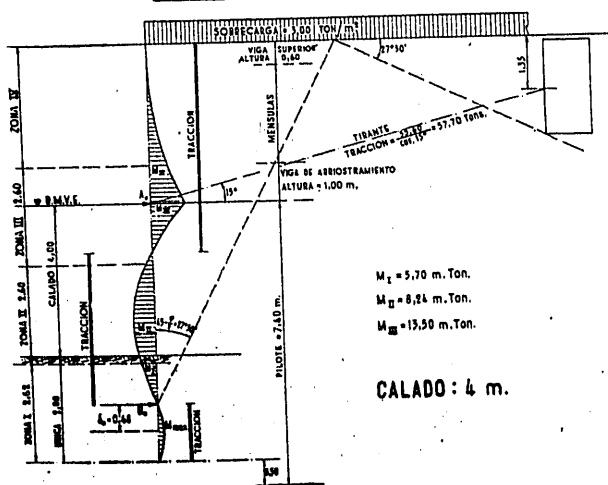
FIG.16

les tipo de este muelle para diferentes calados y carreras de mareas.

Perfil tipo para muelle pesquero de 4 m. de calado en B. M. V. E. — Siguiendo el mismo sistema de cálculo hemos obtenido para este tipo de muelle la ley de momentos flectores y diagrama de tensiones, que se recogen en la figura 17, de las cuales sacamos los datos precisos para calcular las secciones y armaduras de los distintos elementos que lo constituyen, y que se especifican en la figura 18.

Perfil tipo para 6 m. de calado en B. M. V. E. — Por el mismo procedimiento hemos llegado a las leyes de momentos y diagrama de tensiones de la figura 19, que nos ha permitido calcular la sección tipo para 6 m. de calado en B. M. V. E., que se recoge con todo detalle en la figura 20.

FIG.17.-LEY DE MOMENTOS FLECTORES Y DIAGRAMA DE TENSIONES EN EL MUELLE



SECCION TIPO DEL MUELLE DE 4,00 m. DE CALADO

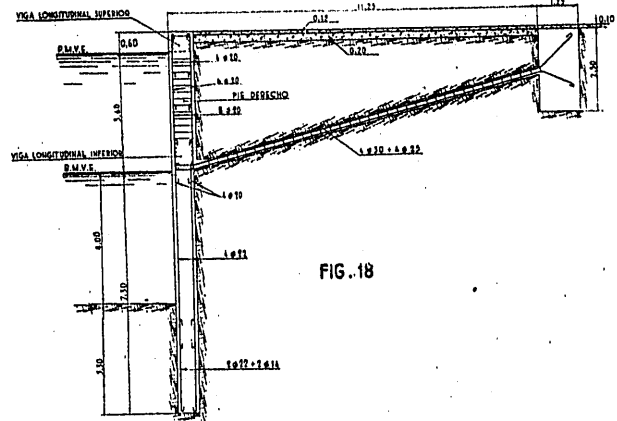


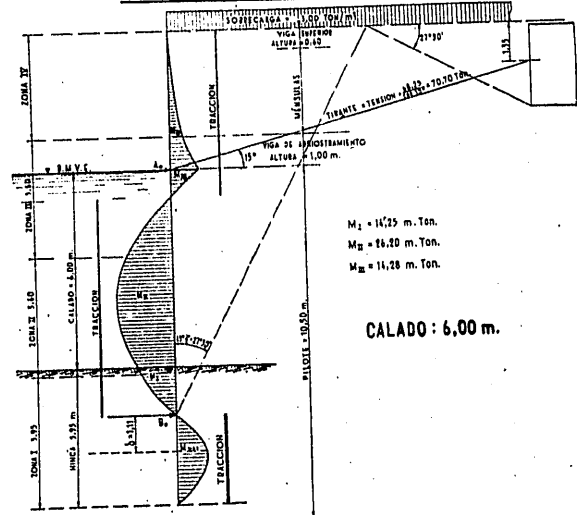
FIG.18

Perfil tipo para muelle comercial normal de 9,50 metros de calado en B. M. V. E. — Hemos tomado como tipo. las características de algunos muelles de la bahía de Cádiz, con la misma carrera de marea de 4,20 m. y la coronación a 1 m. sobre la P. M. V. E.

En la figura 21 se recogen las leyes de momentos flectores y diagrama de tensiones a que está sometido este muelle, que nos servirán de base para el cálculo del mismo.

Dada la importancia de los esfuerzos, ha sido necesario recurrir a la doble pantalla de pilotes *in situ* dispuestos en la forma indicada en la figura 22, en la que se recoge con todo detalle la sección y armaduras de este tipo de muelle.

FIG.19.-LEY DE MOMENTOS FLECTORES Y DIAGRAMA DE TENSIONES EN EL MUELLE



SECCION TIPO DEL MUELLE DE 6,00 m. DE CALADO

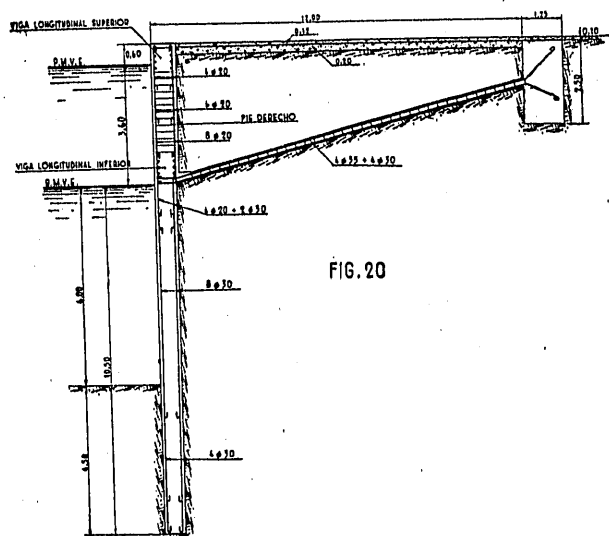


FIG. 20

Consideraciones sobre este tipo de muelles.

Es posible que en una época de abundancia de hierro este problema se hubiera resuelto fácilmente con tablestacas metálicas, pero cuando se proyectó y construyó este muelle, aparte de ser prácticamente imposible conseguir las mismas, la escasez de hierro era tal que consideramos obligado reducir su consumo a un mínimo, cosa que creemos haber conseguido, ya que el hierro en redondos necesario en nuestro caso es de 600 Kg./m. l., y con un tablestacado metálico se necesitarían tablestacas Larsen del perfil III, que tienen un peso por m.² de 155 Kg., y por tanto, el metro lineal de muelle pesaría:

$$155 \times 13,20 = 2050 \text{ Kg.}$$

LEY DE MOMENTOS FLECTORES Y DIAGRAMA DE TENSIONES EN EL MUELLE

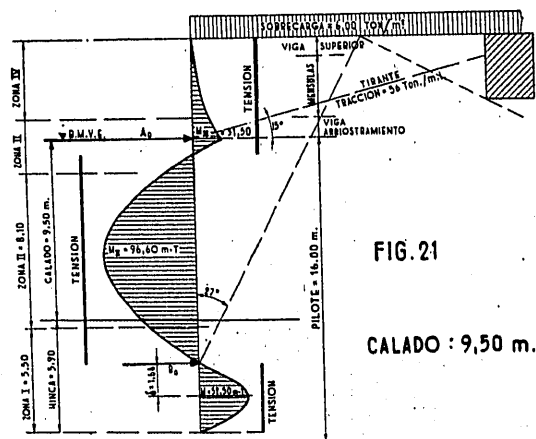


FIG. 21

CALADO : 9,50 m.

SECCION TIPO DEL MUELLE DE 9,50 m. DE CALADO

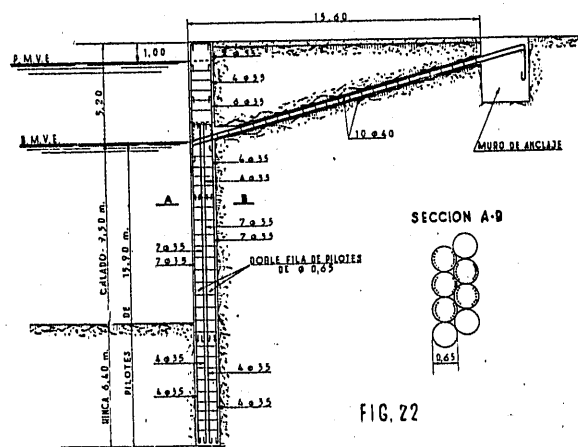


FIG. 22

Comparando ambas soluciones, vemos que con la reseñada hemos obtenido una economía del 70 por 100, en números redondos, sobre el tablestacado metálico.

Comparada esta solución con la adoptada para el muelle comercial contiguo, a base del tipo clásico de pilotes, constituido por una losa de hormigón sobre tres filas paralelas de pilotes separadas entre sí 5 m., y los pilotes de cada fila distantes entre sí 4 m., la economía en hierro es del orden del 50 por 100, si tenemos en cuenta que el hierro que se utilizó en la construcción del mismo fué de 1 200 Kg./m. l. Además, el muelle comercial es para 4 m. de calado, y el que hemos tomado como tipo de comparación es el construido para 5 m. de calado.

Si bien es posible que entre los muelles de hormigón armado sea éste el de menor cuantía de hierro, no debemos olvidar que la utilización de los mis-

MUELLE COMERCIAL CON SUPERESTRUCTURA DE MAMPOSTERIA

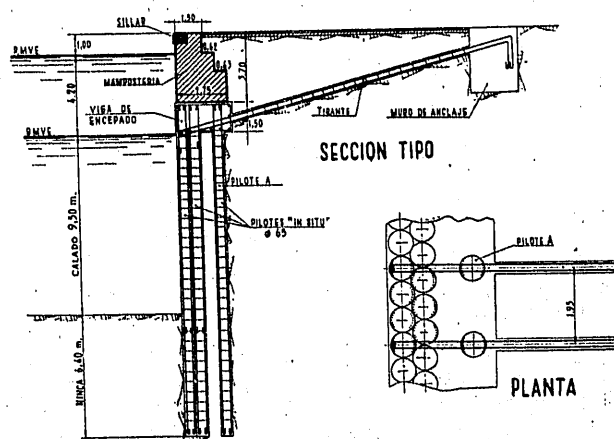


FIG. 23

mos en obras marítimas tiene sus inconvenientes, que se reducen, en parte, adoptando secciones amplias con gran recubrimiento de armaduras y una ejecución muy esmerada del hormigón, que debe incluso vibrarse para conseguir en el mismo la máxima compacidad e impermeabilidad.

Por todo ello creo que, siempre que sea factible, la solución ideal de muelle es la clásica de muro de bloques, sobre banqueta de escollera debidamente enrasada, si bien esto obliga, en general, a disponer de una serie de elementos como grúa flotante para el manejo de los bloques, draga, aunque sólo sea Priestman, equipos de buzos, barcazas para el transporte y vertido de la escollera de cimientos, etc., que no son necesarios para la construcción del tipo de muelle que hemos reseñado en este artículo, por lo cual consideramos que el mismo puede ser de aplicación en pequeños puertos pesqueros y comerciales, donde el transporte de los elementos que acabamos de reseñar sea prohibitivo por el poco volumen de obra a ejecutar.

También es de aplicación en aquellas zonas de terrenos fangosos, donde no es posible la solución de bloques y sí las clásicas de pilotes y tablestacados.

En algunos muelles comerciales que se construyan de este tipo, dado el gran tonelaje de los barcos que a los mismos pueden atracar, podrán disponerse cada 30 m. por fuera de su paramento y contiguas al mismo unás defensas de hormigón armado constituidas por un mazo de varios pilotes, que se funden en uno sólo de la forma más conveniente, desde la B. M. V. E. hasta la coronación del muelle.

La superestructura, desde el tirante hasta la coronación, podrá ejecutarse, si se cree conveniente, de hormigón en masa o mampostería, en la forma esquemática que se indica en la figura 23, para un muelle comercial en el cual deben tenerse en cuenta los esfuerzos transmitidos por el carril exterior de las grúas, para resistir los cuales puede suplementarse la pantalla con pilotes aislados, que se encajan con la misma viga longitudinal de la pantalla dimensionada convenientemente, y que sirven de losa corrida de cimentación a la superestructura.

Los pilotes suplementarios pueden disponerse coincidiendo con los tirantes de la pantalla, que por su mayor esfuerzo será conveniente aproximarlos un poco más, disponiéndolos cada tres pilotes en la forma indicada en la figura 23.

