

REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS

PUBLICACION TECNICA DEL CUERPO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DIRECTOR

D. MANUEL MALUQUER Y SALVADOR

COLABORADORES

LOS INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

SE PUBLICA LOS JUEVES

Dirección y Administración: Plaza de Oriente, 6, primero derecha.

Sobre un nuevo sistema de barómetro

POR

DON JOSÉ TOUS Y BIAGGI (1)

Desde los primeros experimentos de Viviani y Torricelli, que al finalizar la primera mitad del siglo XVII demostraron la existencia de la presión atmosférica y la midieron, poniendo así de manifiesto la razón porque la Naturaleza no tenía aquel *horror vacui* en la forma en que se lo suponían muchos aristotélicos; desde los experimentos confirmatorios de Pascal y la célebre confirmación de aquella presión hecha por Perier en Puy-de-Dôme, hasta nuestros días, la teoría y la construcción de los barómetros se ha ido perfeccionando constantemente.

Durante casi dos siglos, el clásico barómetro de mercurio fué el único que se construyó y aun limitado su empleo más bien como aparato demostrativo de la presión atmosférica las más de las veces, que no como instrumento para su medición. Este último punto de vista se ha ido desarrollando y perfeccionando constantemente desde las primeras observaciones de Torricelli, que ya notó que la presión de la atmósfera no era constante. No parece bien probado quién fuera el primero que relacionó las variaciones de la presión barométrica con los cambios atmosféricos, probablemente serían muchos, ya que el hecho de sí mismo es tan visible como repetido.

Lo que no es tan visible y sencillo es fijar cuál sea aquella relación y que, á falta de otra mejor, el comercio y el gran público han admitido ya una en la forma aquella ya vulgar y corriente que, desde *Tempestad á Buen tiempo fijo*, pronostica los cambios atmosféricos que la gente cree que más le interesan, y muchas personas, aun con bastantes conocimientos físicos, consultan aquellas indicaciones, sobre todo la que señala *Lluvia*, con la misma buena fe con que el sencillo labrador ojea en su calendario los cambios que han de traer los próximos cambios de luna.

De la misma naturaleza de la presión atmosférica y de la aptitud del barómetro para medirla, desde la citada y conocida experiencia de Puy-de-Dôme, se ha venido utilizando este instrumento para la medición de altura que, si en un principio, y sobre todo cuando no se conocía más barómetro que el de mercurio, casi sólo fué empleado por personas cuyos conocimientos

daban valor científico á las observaciones verificadas, desde la invención del barómetro aneroide, y, sobre todo, su vulgarización, se ha venido á parar á las graduaciones altimétricas directas que, si bien no tan exageradamente, se parecen algo á la clasificación dicha para la previsión de los cambios atmosféricos, y aun para mucha gente, presentan dichas graduaciones el inconveniente de dejarlos más afirmados en el error por la mayor confianza que les inspiran las cosas que vienen expresadas por números.

A Vidi se debe la invención de un nuevo sistema de barómetro que difiere esencialmente del clásico de mercurio y que con el nombre de aneroide, sea en su primera forma, sea en la de tubo de Bourdon, se ha desarrollado extraordinariamente hasta constituir muchas veces un simple objeto de lujo.

No siendo el objeto de este trabajo el estudio de los diferentes sistemas de barómetros se prescindirá de su descripción, sean de mercurio sólo ó mixtos en sus diferentes clases, de los aneroídes de Vidi, Bourdon ó Goldschmidt, como también de los fundados en la temperatura de ebullición del agua ú otro líquido, en equilibrar la presión atmosférica parte con una corta columna de mercurio y parte por el imperfecto vacío de la cámara barométrica, de los de flotador, diferenciales, etc.

El nuevo sistema, que constituye el objeto del presente trabajo, está fundado en medir directamente la presión de la atmósfera sobre una superficie determinada, por medio de una balanza. La principal dificultad para lograrlo estriba en poder obtener y conservar el vacío en una cámara cerrada por un obturador algo móvil, de superficie fija, y que ajuste absolutamente. El sistema de pistón móvil que tan buenos resultados da en los indicadores de presiones para mediciones industriales, y, sobre todo, para obtener diagramas en las máquinas de vapor, de gas y otras resultaría inaplicable para el presente objeto, no sólo por perder el vacío la cámara barométrica, sino también por los grandes errores que en la medición introduciría el rozamiento del pistón con las paredes del cilindro.

En este nuevo sistema el cierre de la abertura de la cámara barométrica se verifica por medio de una membrana ú hoja metálica de pequeñísimo grueso, sólo el suficiente para hacerla impermeable al aire y que no se rasgue á la acción de los pequeños esfuerzos que en su plano puedan desarrollarse, membrana casi toda ella apoyada sobre un plato de balanza, que es la que mide la presión.

La figura 1.^a da fácilmente una idea del principio de esta disposición.

a Cámara barométrica cilíndrica.

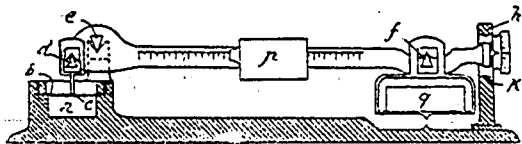
(1) Memoria leída en la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona.

b Membrana metálica plana ú ondulada que cierra la cámara perpendicularmente al eje de ésta.

c Plato de balanza resistente y rígido sobre el cual se apoya casi totalmente la membrana anterior y que va suspendido de la cuchilla *d* que, con la *e* y la *f*, constituyen una balanza de brazos desiguales en la que, por medio del peso *g* del platillo y el peso corregido *p*, se equilibra la presión atmosférica.

h *k* Topes fijos que limitan las oscilaciones del brazo de la balanza, impidiendo deformaciones excesivas en la membrana.

fig. 1



Como en todas las cosas de carácter práctico, de la idea á su realización, se presentan siempre dificultades para completar aquélla dándole forma práctica. En el caso presente, lo único ideal y difícil de realizar es la construcción y colocación de la membrana *b*. La industria, desde mucho tiempo, proporciona hojas metálicas de un espesor delgadísimo en los panes de oro que tanto se emplean para el dorado, la plata y el estaño, se expenden también en el comercio de un espesor muy delgado también, y ahora se presenta aquí un problema de Física que no parece que esté resuelto, que es, la impermeabilidad de tenues hojas metálicas al paso del aire bajo presiones aproximadas á la atmósfera. Parece, á primera vista, que dichas hojas, salvo defecto, han de ser absolutamente impermeables, y si este nuevo sistema de barómetro se desarrolla, la experiencia dirá si lo son ó no. No sería la primera vez, ni mucho menos, que un ensayo de carácter práctico contribuyera á poner de manifiesto y esclarecer un punto científico. Por otra parte, para el presente objeto, se necesitan hojas más resistentes para impedir su ruptura bajo la acción de la fuerza de inercia que desarrollaría el platillo *c* á cualquier sacudida, aun muy pequeña, del instrumento. Esta consideración fija, pues, un minimum para el espesor de la membrana. Un maximum lo fija otra consideración, muy importante para el caso, que es la sensibilidad y exactitud de las indicaciones del instrumento. Para el estudio de este punto, que es aquí fundamental, debe notarse que la presión atmosférica está equilibrada por dos fuerzas; una, que es casi la total, medida con toda la exactitud que permite una balanza de precisión y la otra que es la resistencia elástica de la membrana, cuya medición, por ser mucho menos precisa que la anterior, conviene, para aumentar la exactitud, reducirla á un minimum. Se comprende que si no existiera la fuerza que introduce la balanza toda la presión atmosférica debería venir equilibrada por la resistencia elástica de la membrana, viniéndose á parar al sistema del barómetro aneroide, como límite del que se estudia.

Así, pues, como resultado de lo que se acaba de indicar, la membrana debe ser lo más delgada que sea posible dentro de los límites de su resistencia á rasgarse. Es difícil y casi inútil el querer establecer ningún cálculo *a priori*, pues todos han de ser hipotéticos.

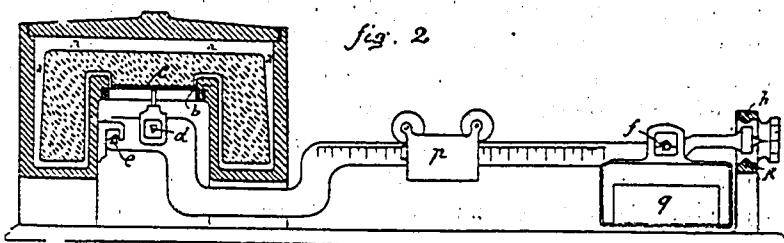
La suposición de una caída del instrumento desde una altura de unos 2 metros, que sería destructora para cualquier barómetro actual, permite apreciar por medio de un cálculo aproximativo que un espesor de membrana de cosa de 0,01 de milímetro sería suficiente. Con este espesor, y aun mucho menos, no parece que la membrana deje de ser completamente impermeable al aire.

Como la sujeción de la membrana para cerrar la cámara, que deberá ser por soldadura, ofrecerá dificultades de orden práctico, no parece aventurado prever que dicho espesor muy difícilmente podía descender de dicho céntimo, tal vez medio céntimo de milímetro; la experiencia directa y el cálculo fundado en ella permitirán fijar dicho espesor con exactitud para cada caso.

Como la cámara es internamente cilíndrica y el platillo *c* circular el torneado, que es una operación tan precisa, permitirá un ajuste tan exacto como se desee, que ni siquiera deberá ser tan ajustado como pudiera tornearse, por temor de que al ajustarse rozara dicho platillo con las paredes de la cámara introduciendo una perturbación de mal medir por su naturaleza y por ser variable de sentido con el movimiento de dicho platillo. Un juego ó huelgo de medio milímetro parece más que suficiente para todos los casos, lo cual daría al disco ó platillo un diámetro de un milímetro menos que el del interior de la cámara.

Los errores que pueda introducir, pues, en la medición de la presión, la inexacta apreciación de la fuerza elástica de la membrana dependerán pues, aproximadamente, de una corona ó anillo circular de sólo medio milímetro de diferencia de radios que variarían, aproximadamente, como el desarrollo de dicho anillo, que es proporcional al diámetro, mientras que la fuerza total á medir, ó sea la presión atmosférica, varía como el cuadrado. Como ésta se mide, como se ha dicho, casi en su totalidad por medio de la balanza, de aquí que el error originado por la inexactitud en apreciar la fuerza elástica de la membrana puede disminuirse, en principio, indefinidamente aumentando el diámetro de la cámara barométrica.

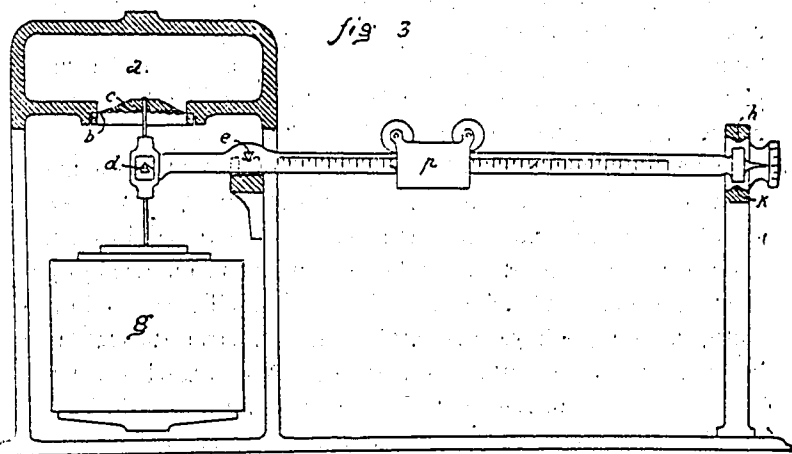
Un cálculo aproximado, para un barómetro de bolsillo de un centímetro cuadrado de superficie de membrana sobre la cual la presión atmosférica vale normalmente 1033 gramos, con las medidas citadas y para una deformación ó flecha de 0,1 milímetro en la membrana, la resistencia elástica de ésta vale sólo 1,06 gramos, ó sea un milésimo de la fuerza á medir, y como el error en apreciar dicha resistencia valdría, naturalmente, mucho menos que ella, aun apreciándolo en un 10 por 100, el error total sería sólo de 0.0001 del total, aproximadamente.



Entre las varias formas que pueden darse á este nuevo sistema de barómetro, una ofrece especial interés por su extraordinaria precisión como barómetro normal y por poder conservar dicha gran precisión, aun construyéndose como barómetro registrador.

Consiste ésta, que sólo es aplicable á barómetros fijos, en equilibrar directamente la misma presión atmosférica que el barómetro esté destinado á medir, por medio de un peso que actúa directamente sobre la membrana, la cual recibe la presión atmosférica de abajo hacia arriba, ya sea en la forma que indica la figura 2.^a, ya en la indicada por la figura 3.^a En ambas *a* representa la cámara barométrica, *b* la membrana metálica, plana ú ondulada que cierra la cámara, y sobre la cual actúa, sea directamente, un gran peso *c*, como en la figura 2.^a, ó bien una placa *c*, de la que pende el peso *g*, como se indica en la figura 3.^a, y que en ambos casos equilibran directamente la mayor parte de la presión atmosférica. El resto de ésta se equilibra, sea con el

peso q sobre el platillo de la balanza y el peso corregido p sobre el brazo e de ésta, como indica la figura 2.^a, sea con pesos colocados directamente sobre el constante g y el peso p corregido sobre el brazo d de la balanza, como indica la figura 3.^a En ambas disposiciones las deformaciones de la membrana quedan limitadas por los toques h del extremo del brazo de la balanza que lleva, como dichas figuras indican, un índice que sobre un pequeño arco graduado permite apreciar la fuerza elástica de la membrana.



Para mejor apreciar la indicación, lo mismo puede aplicarse una lente de aumento como un nonio en sustitución del simple índice, y tal como usualmente se usa para medir pequeños arcos. Tanto en un caso como en el otro, se comprende que, poniendo un lápiz ó pluma sobre el peso corregido p , éste podrá marcar sobre un papel móvil la presión atmosférica de un modo continuo haciendo que el barómetro sea registrador.

No se han indicado estas disposiciones, por no formar parte esencial del sistema que se describe y por ser de uso corriente en otros aparatos registradores, sea que se verifiquen por mecanismos de relojería ó que, además, algunos movimientos vengan determinados por contactos y corrientes eléctricas.

La gran ventaja de estas dos disposiciones consiste en el gran aumento de sensibilidad que presentan, pues puede darse á la membrana un gran diámetro, con lo que se disminuye, indefinidamente, la influencia de su elasticidad y equilibrada la mayor parte de la presión por el peso directo antes descrito, la balanza sólo tiene que medir un resto relativamente pequeño. Así, por ejemplo, una membrana b de un decímetro cuadrado de superficie, recibiría una presión normal hacia arriba de 103,3 kilogramos, y como las oscilaciones barométricas no llegan la mayor parte de ellas á un 5 por 100 de la presión normal, podría darse al peso directo un valor tal, que equilibrara el 95 por 100 de la presión, con lo que la balanza sólo tendría que pesar hasta unos 5 kilogramos, y como con este peso puede fácilmente apreciar 0,05 gramos, resultaría con una sensibilidad, aproximadamente, de 1,2 millonésima parte de la presión media y aun con el empleo de la disposición indicada en la figura 3.^a, en la que puede variarse el peso directo g colocándole encima pesos adicionales, podría llegarse fácilmente, apreciando 0,01 gramos, á sensibilidades de una diezmillonésima.

No hay ningún barómetro de gran precisión de los llamados normales que ni de mucho se acerque á esta precisión. Los de mercurio, aun los que aprecian una centésima de milímetro, no son sensibles sino á 1,76 milésima de la presión, es decir, trece veces menos sensible que el últimamente citado. La resistencia elástica de la membrana, que es la única fuerza que interviene en la medición, no modifica gran cosa dicha precisión, pues con una relación de brazos de palanca tan sólo de 1 á 10,

0,1 milímetros, fácilmente observable sobre el arco graduado, representaría una flecha de 0,01 milímetros en la membrana, cuya flecha para la superficie dicha de un decímetro cuadrado, que equivale, aproximadamente, á un diámetro de 113 milímetros, para una membrana de latón ó cobre valdría poco más ó menos, según el módulo de la elasticidad del metal, unos 0,005 gramos, es decir, que en vez de una sería una y media diezmillonésima (1). Se comprende que aumentando el diámetro de la membrana podría aumentarse aún la sensibilidad, pues el grueso de aquella no debe aumentarse, por servir sólo de cierre y bastar con que sea impermeable al aire. La mayor precisión, comparado con el de mercurio, resulta en realidad mucho mayor aún si se atiende que en éste existe como causa de error la resistencia del mercurio á moverse por el tubo, debido al rozamiento y á la adherencia con él, error que, por la dificultad de medirlo, se desprecia, si bien procurando aminorarlo golpeando ligeramente el tubo, poniéndolo en vibración suave ó bien haciendo variar el nivel en la cubeta.

En realidad, ninguno de estos procedimientos puede anular aquel defecto más que en casos extremadamente raros, pues estos procedimientos comunican al tubo y al mercurio un trabajo mecánico de valor indeterminado, y que, por consiguiente, es una probabilidad remotísima el que la suma de dicho trabajo y el que desarrollarán la gravedad, las resistencias pasivas y la presión atmosférica, resulte igual á cero. Sirven, es verdad, para desatascar el mercurio, pero no para asegurar que quede exactamente al nivel que le corresponde. Este efecto es análogo al producido sobre un cuerpo apoyado sobre otro cuya superficie de apoyo fuera cilíndrica y de eje horizontal, que al golpear ó hacer vibrar la superficie cóncava del apoyo, el cuerpo ya descendería, pero rarisima vez quedaría en el punto más bajo sino que oscilaría á uno y otro lado de él según la manera de golpear ó hacer vibrar el apoyo. Si bien es difícil calcular aproximadamente el error de que se trata, hay un medio experimental que sería relativamente fácil de practicar, que consiste en suspender un buen barómetro de mercurio de un soporte que se pudiera subir y bajar sin ninguna sacudida, y por el desnivel que alcanzara, cuando el mercurio empezara á moverse, se deduciría fácilmente la magnitud de aquel error, que seguramente sería más ó menos diferente para cada barómetro.

Respecto á correcciones, el nuevo sistema de barómetro que forma el objeto de este trabajo, no tiene de propio más que una, que es la debida al cambio de superficie de la abertura cerrada por la membrana por las variaciones de la temperatura. Si se cambiara de sitio, habría las generales de la variación en la intensidad de la gravedad por razón de altitud y latitud geográfica.

Desde el punto de vista económico, la disposición indicada por la figura 1.^a no parece que tenga que ser siquiera tan costosa como la de los buenos aneroides, á los que de seguro superaría en solidez, seguridad y precisión. En cuanto á la disposición para barómetros fijos, tanto la indicada por la figura 2.^a, como por la figura 3.^a, serían muchísimo más económicas que la de los actuales barómetros normales, aun prescindiendo del coste del catetómetro para la medición, caso de emplearse.

(1) La fuerza total f que, uniformemente repartida sobre una placa circular empotrada por su borde, produce una flecha δ , siendo r el radio de la placa ó membrana, vale:

$$f = \frac{6 \pi E h^3}{r^2} \delta$$

siendo h el grueso de la placa y E su módulo de elasticidad. Tomando 8000 kilogramos por milímetro para éste, 0,02 milímetros para el grueso y 0,01 milímetros para la flecha, la placa de 113 milímetros da para f casi exactamente 0,005 gramos.

En lo que presenta desventaja el nuevo sistema es en la lectura, que no es tan cómoda y rápida como la de los de mercurio, y sobre todo aneroides, si bien, aun en éstos, ya no lo es tanto cuando se quiere precisión y se recurre para alcanzarla al empleo de nonios.

En cuanto al empleo del nuevo barómetro en su forma portátil indicada por la figura 1.^a, para la medición de alturas, comparado con el anerode usual, parece indudable que ha de llevarle ventaja. Toda persona que haya verificado observaciones de esta naturaleza, aun con aneroides de las mejores marcas, habrá notado las diferencias que dan cuando un mismo desnivel se mide diferentes veces subiendo ó bajando y en diferentes épocas del año.

Aun para los llamados compensados no hay más remedio que formarse para cada barómetro unas tablas de corrección empleando el instrumento por el método de sustitución, y aun con el inconveniente de que dichas tablas varían algo con el tiempo, y, sobre todo, cuando se usa el barómetro para presiones muy diferentes de aquellas para las que se había usado, defecto, por otra parte, general á todas las mediciones dinamométricas por medio de resortes, que presentan como una inercia elástica que hace que les cueste llegar á ponerse en equilibrio, de modo que con las variaciones, sobre todo si son algo rápidas, marchan siempre atrasados en sus indicaciones. Esto, y su delicada construcción, hace que un anerode de precisión sea un instrumento de uso tan personal, que sólo el dejarlo á persona no muy cuidadosa sea motivo para recelar de sus indicaciones.

Debe notarse que el nuevo sistema de barómetro que se ha descrito no tiene nada que ver con la disposición empleada en el sistema de construcción de los llamados barómetros balanzas, pues en éstos se pesa un tubo barométrico usual lleno de mercurio que inmerge en la cubeta, mientras que en el que forma el objeto de este trabajo no hay tubo ni mercurio, y lo que la balanza mide, con la gran precisión que le es propia, es la presión que ejerce la atmósfera sobre una superficie determinada, que es la de la membrana sobre la cual actúa y que la balanza mide directamente, y aun con el empleo de la disposición indicada en la figura 3.^a ni siquiera balanza se necesita, pues el peso g puede hacerse que equilibre directa y exactamente á la presión del aire sobre la membrana.

Finalmente, no estará por demás insistir sobre la conveniencia y utilidad de cambiar la clásica manera de representar la presión atmosférica por la altura de una columna de mercurio expresada en milímetros ó pulgadas. No hay ninguna razón, fuera de la de seguir una costumbre, para no emplear en la medición de la presión atmosférica el sistema casi universal de medirla en unidades de peso, por unidad de superficie, y no deja de ser extraño que cuando en las aplicaciones de la Mecánica á las calderas, máquinas de vapor y otras, se acaba casi de desterrar la primitiva manera de contar por atmósferas, sustituyéndola por la de contar por kilogramos por centímetro cuadrado ó por libras por pulgada cuadrada, en un punto de carácter tan científico como el de que se trata, se mantenga una manera de contar que constituye sencillamente una rutina. Esto con tanta más razón cuanto que en el caso presente, evaluando la presión en gramos por centímetro cuadrado, la evaluación es más precisa, permitiendo, además, convencionalmente, suprimir algunas cifras contando sólo números enteros y que, empleando fracciones decimales de éstos, son éstas también más exactas, á igual número de cifras decimales, que no empleando fracciones de milímetro de la columna barométrica como actualmente se usa.

Puerto de Huelva.

PROYECTO DE UN MUELLE DE FABRICA

Exposición del objeto de este proyecto. — Antecedentes. — La necesidad y la oportunidad de la importante obra que vamos á proponer son consecuencia de las consideraciones siguientes:

El muelle provisional que existe en este puerto para el tráfico de mercancías generales está ya muy viejo y necesita ser restaurado. Además, para que quede en condiciones de poder cumplir con las necesidades del tráfico actual, precisa hacerle una reforma, cuyo coste sería de gran importancia.

Esta obra de restauración y ampliación nos proporcionaría un muelle más fuerte y más grande que el actual, pero de escaso calado y con los mismos graves defectos inherentes á esta clase de construcciones, en las cuales el servicio es complicado y deficiente, pues no pudiendo el público tener en ellos acceso inmediato, precisa que haya una entidad intermediaria encargada de la difícil misión de recibir las mercancías y entregarlas á bordo ó viceversa, operaciones que nunca se hacen á gusto de los comerciantes y deben ser practicadas por ellos mismos.

El puerto de Huelva cuenta ya con las obras necesarias para cumplir su cometido de un modo satisfactorio, en lo referente al tráfico de minerales, pero es provisional y deficiente en cuanto afecta á las mercancías generales, y procede, por lo tanto, el estudio y construcción de lo que á éstas corresponde, lo cual debe hacerse con el mayor detenimiento posible, toda vez que esta especie de tráfico ha de ser la vida futura de nuestro puerto.

Empezando por la cuestión de los muelles, como más principal y perentoria, debemos aspirar á conseguir que éstos sean del tipo más perfecto y cómodo para el servicio público á que se destinan, y como los que mejor satisfacen estas exigencias, según la opinión general, son los muelles de costa contruidos de fábrica, éstos son los que creemos que se deben ejecutar aquí, volviendo así á la idea fundamental del primer proyecto de este puerto, redactado el año 1878 por el ilustrado Ingeniero D. Carlos María Cortés, y desechado después de experiencias deficientes, de las cuales se creyó deducir de un modo cierto que el subsuelo de esta ría no puede sostener esta clase de construcciones.

Pero desde aquella época, el arte de la construcción ha progresado, y hombres de otras razas más perseverantes que la nuestra, gastando enormes sumas de trabajo y de dinero, después de muchas tentativas fracasadas, han conseguido erigir grandes muelles de fábrica sobre los fondos fangosos de Rotterdam, Trieste y otros puertos de tan malas ó peores condiciones que el de Huelva.

Aprovechemos el camino abierto por otros, y ya que no hemos podido ser precursores, procuremos, al menos, adaptar á nuestro caso, de un modo razonable, las lecciones de la experiencia ajena, dejándonos conducir por ella.

Vamos á explicar cuanto queda expuesto, empezando por el estudio de la transformación del muelle provisional en definitivo, el cual nos llevará á la solución radical de abandonar por completo esta idea de restauración, para adoptar la de construir un muelle de fábrica, dotado de los elementos usuales en los puertos modernos.

Esta parte contiene, además, dos notas para explicar en la primera que el muelle Sur fué construido como obra provisional, y para demostrar en la segunda que estos muelles de entramados metálicos no pueden tener en las aguas de esta ría más que una vida muy limitada.