

## RESISTENCIA DE MATERIALES.

Método nuevo para el trazado de la curva de presiones en las bóvedas de fábrica,

por

M. SZYSTOWSKI.

(Láminas 61 y 62.)

## CONSIDERACIONES GENERALES.

En el estado actual de nuestros conocimientos, la teoría de la estabilidad de bóvedas se reduce, como es sabido, á la construccion de la curva de presiones.

Nos proponemos en este artículo dar á conocer un método nuevo para la construccion de dicha curva, más sencillo que los ya existentes, y que presenta la ventaja de conciliar la facilidad de ejecucion con la exactitud de los resultados. Su empleo disipa la incertidumbre que existe hasta ahora sobre la posicion precisa de la junta de rotura en una bóveda cualquiera, y determina de una manera invariable el paso de la curva de presiones por el interior de la bóveda considerada, siempre que se adopte la hipótesis de que debe pasar por el tercio de la longitud de la junta de rotura á partir del intrados.

Hasta el presente la determinacion exacta de la posicion de la curva de presiones en una bóveda de fábrica ha presentado dificultades considerables, debidas á la imposibilidad de darse una cuenta cabal de cómo obran entre sí las diferentes partes de una bóveda cualquiera. Por esta razon los numerosos trabajos emprendidos con aquel objeto han dejado siempre que desear. Ciertos autores, como Mr. Culmann, de Zurich, han propuesto métodos fáciles, de ejecucion rápida, pero que descansan desgraciadamente sobre hipótesis no justificadas. El método de Mr. Culmann está basado en la teoría dada por Mr. Scheffler, cuyo punto de partida es el principio de la *mínima accion*.

Otros han presentado métodos fundados en teorías é hipótesis perfectamente racionales, admitidas por todo el mundo y áun verificadas en parte por experiencias concluyentes; pero que conducen á resultados sumamente complicados, que exigen mucho tiempo y una extrema habilidad para su aplicacion.

En este último grupo debemos colocar en primer término el notable método de Durand-Claye, inserto en los *Annales des Ponts et Chaussées*, 1867

y 68; en segundo lugar, el método no ménos ingenioso, pero que reconoce por fundamento algo de las ideas generales del primero, debido á Mr. Peaucellier, *Mémorial du Génie militaire*, 1875. Los dos métodos de que acabamos de hablar son completamente satisfactorios bajo el punto de vista científico, pero se prestan difícilmente á las necesidades de la práctica, porque se encuentran en su aplicacion dificultades que harémos constar y pondrémos en evidencia en el curso de este trabajo.

## RESEÑA HISTÓRICA. Y CRÍTICA DE LAS PRINCIPALES TEORÍAS DE LA ESTABILIDAD DE BÓVEDAS.

1.º *La Hire*. Parece que *La Hire*, *Histoire de l'Académie des Sciences*, 1712, fué el primer sabio á quien corresponde la gloria de haber tratado el problema de la estabilidad de las bóvedas bajo un punto de vista científico; pero su teoría, fundada sobre hipótesis inexactas, cayó en olvido poco tiempo despues de su aparicion.

2.º *Couplet*. El mérito de Couplet fué más grande por cuanto que publicó en las *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de 1729 y 1730*, un trabajo en el que demostró la verdadera causa y la manera de romperse una bóveda cualquiera segun la junta de rotura.

3.º *Coulomb*. Los trabajos de Coulomb tienen una importancia considerable, á pesar del valor casi nulo que prácticamente presenta su teoría inserta en las *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de 1775*.

Pero esta teoría descansa sobre bases sólidas, que han servido de punto de partida á investigaciones verdaderamente científicas; desapareció, sin embargo muy pronto, y no ha llegado á ser suficientemente verificada por la experiencia.

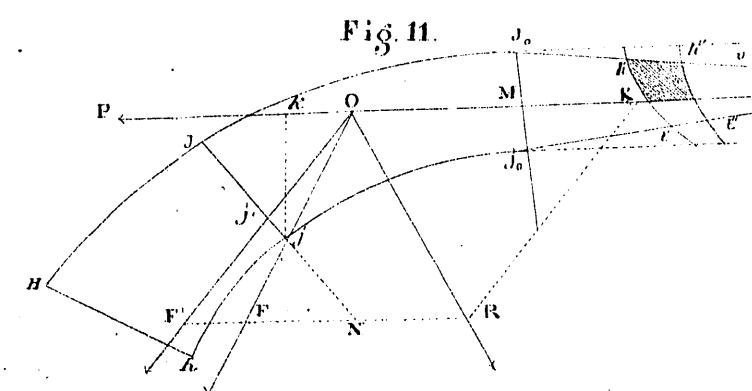
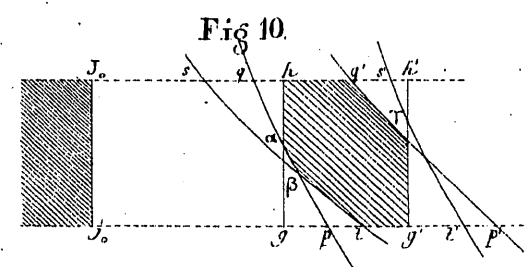
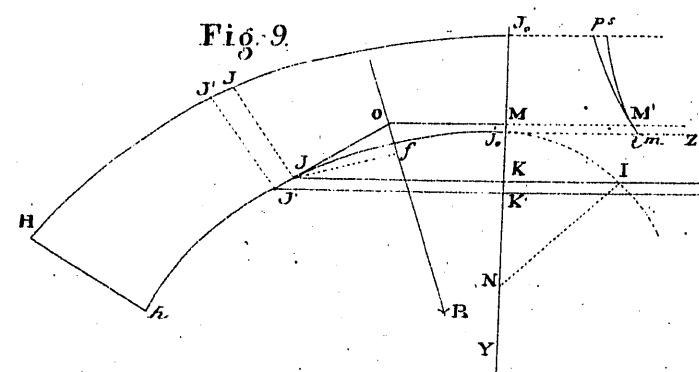
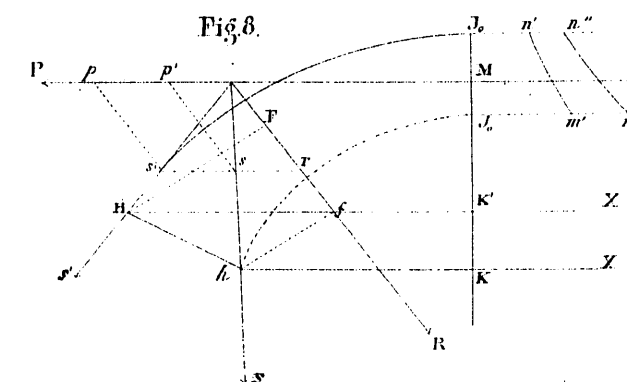
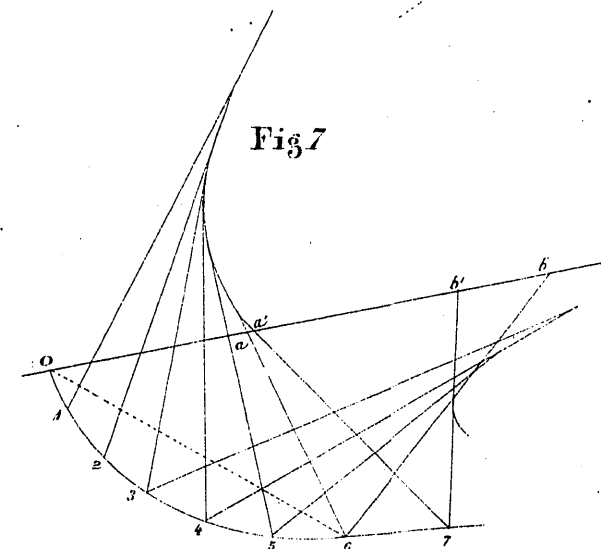
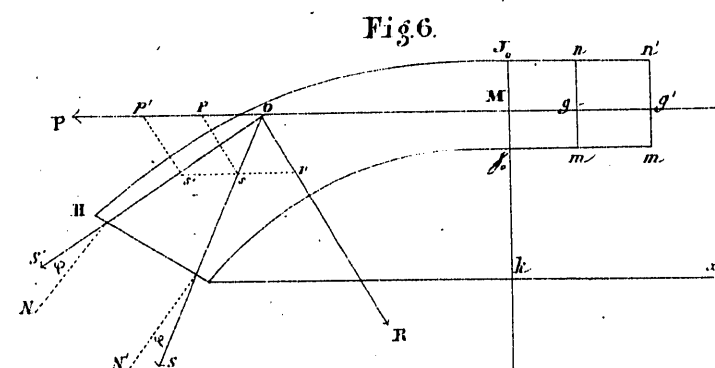
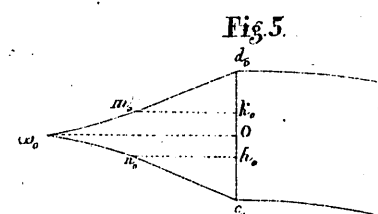
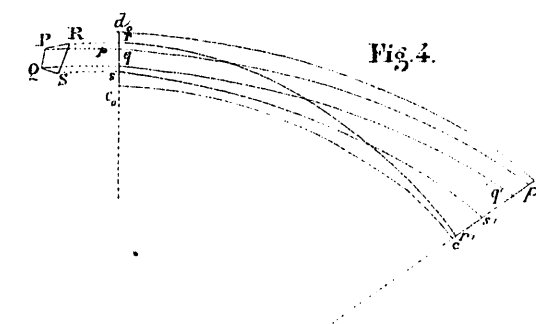
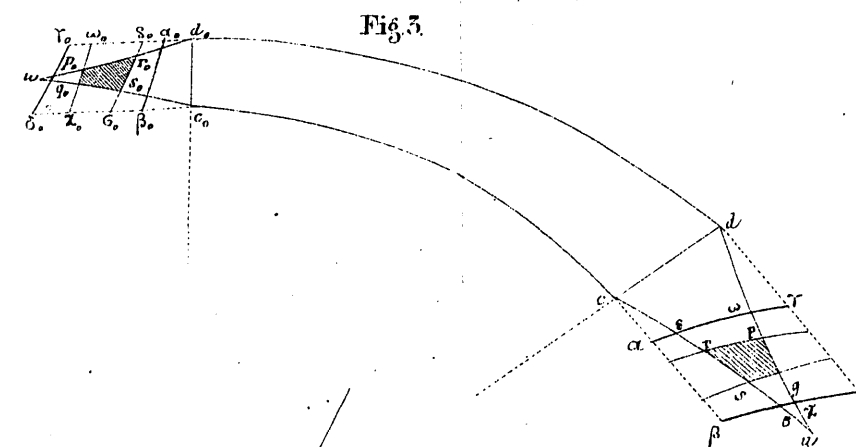
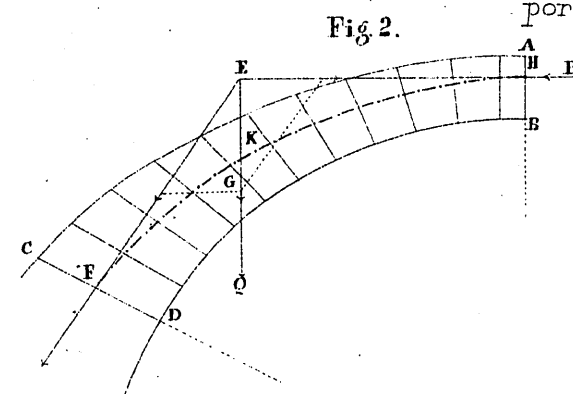
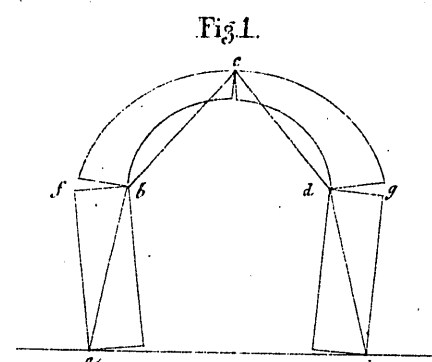
4.º *Boistard*. La teoría de la estabilidad de las bóvedas no ha adquirido una importancia práctica hasta el año 1796, gracias á las experiencias de Boistard, que estando encargado de la construccion del puente de Nemours, proyectado por Perronet, consideró como indispensable, ántes de proceder á la ejecucion de los trabajos, hacer algunos ensayos especiales en relacion con las bóvedas proyectadas por Perronet, que tenian 16<sup>m</sup>,25 de luz por 4<sup>m</sup>,10 de flecha.

El manuscrito de Boistard, depositado en la Escuela de Puentes y Calzadas, no se publicó hasta 1822, y como no parece fuera de propósito dar aquí un resúmen sucinto de sus experiencias, de-

## RESISTENCIA de MATERIALES.

Método nuevo para el trazado de la curva de presiones en las bóvedas de fábrica.

por MF SZYSTOWSKI.



Escala de 0<sup>m</sup> 001 p.<sup>r</sup> 1320 k.  
0<sup>m</sup> 01 p.<sup>r</sup> 1<sup>m</sup>.

F. G. иже вѣра, грабо.

RESISTENCIA de MATERIALES.

Fig 12 (b)

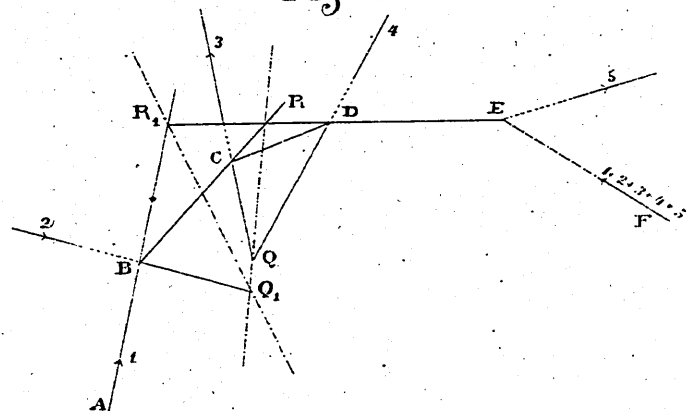


Fig 13 (a)

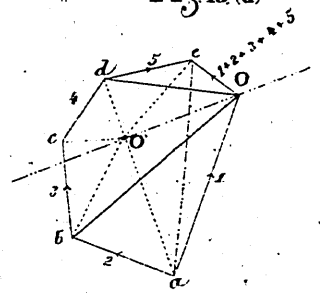


Fig 13 (b)

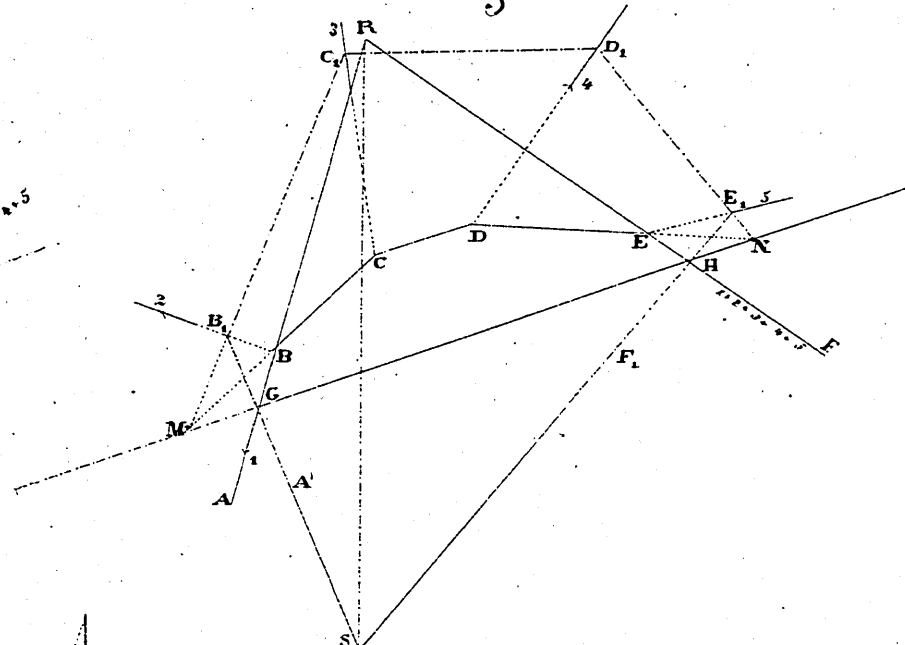


Fig 14

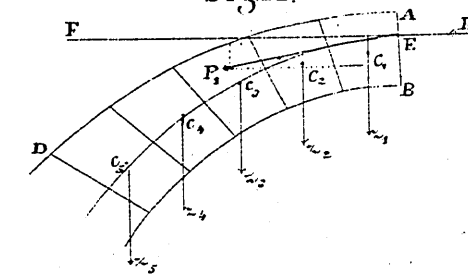


Fig 15

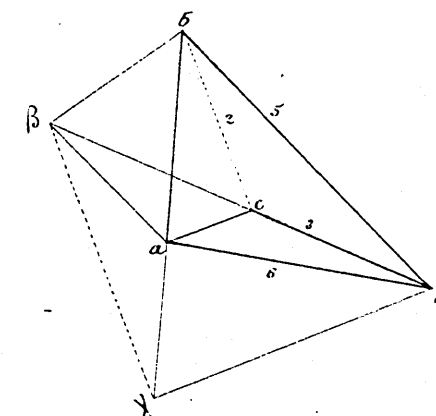


Fig 16

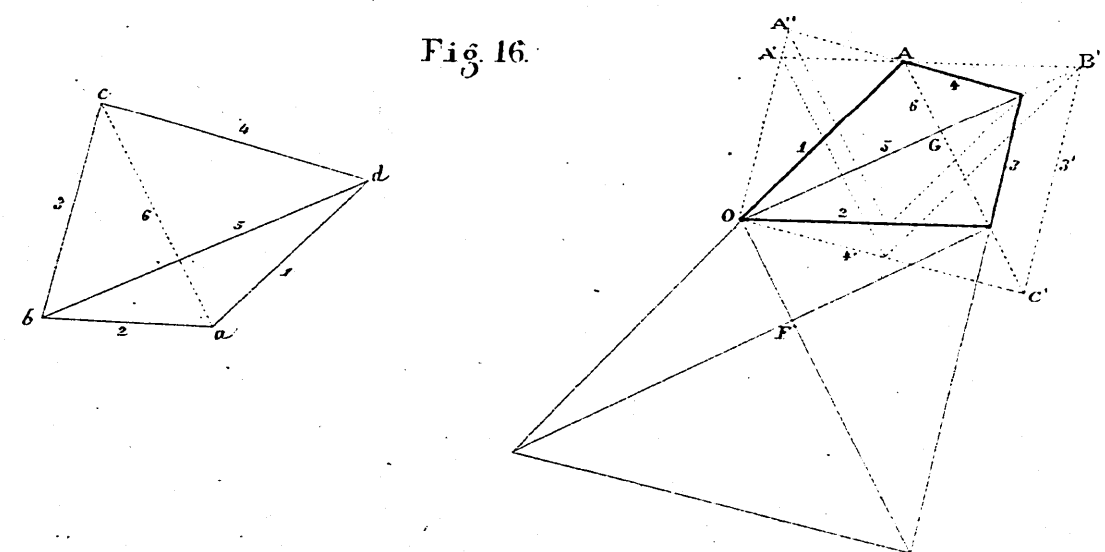
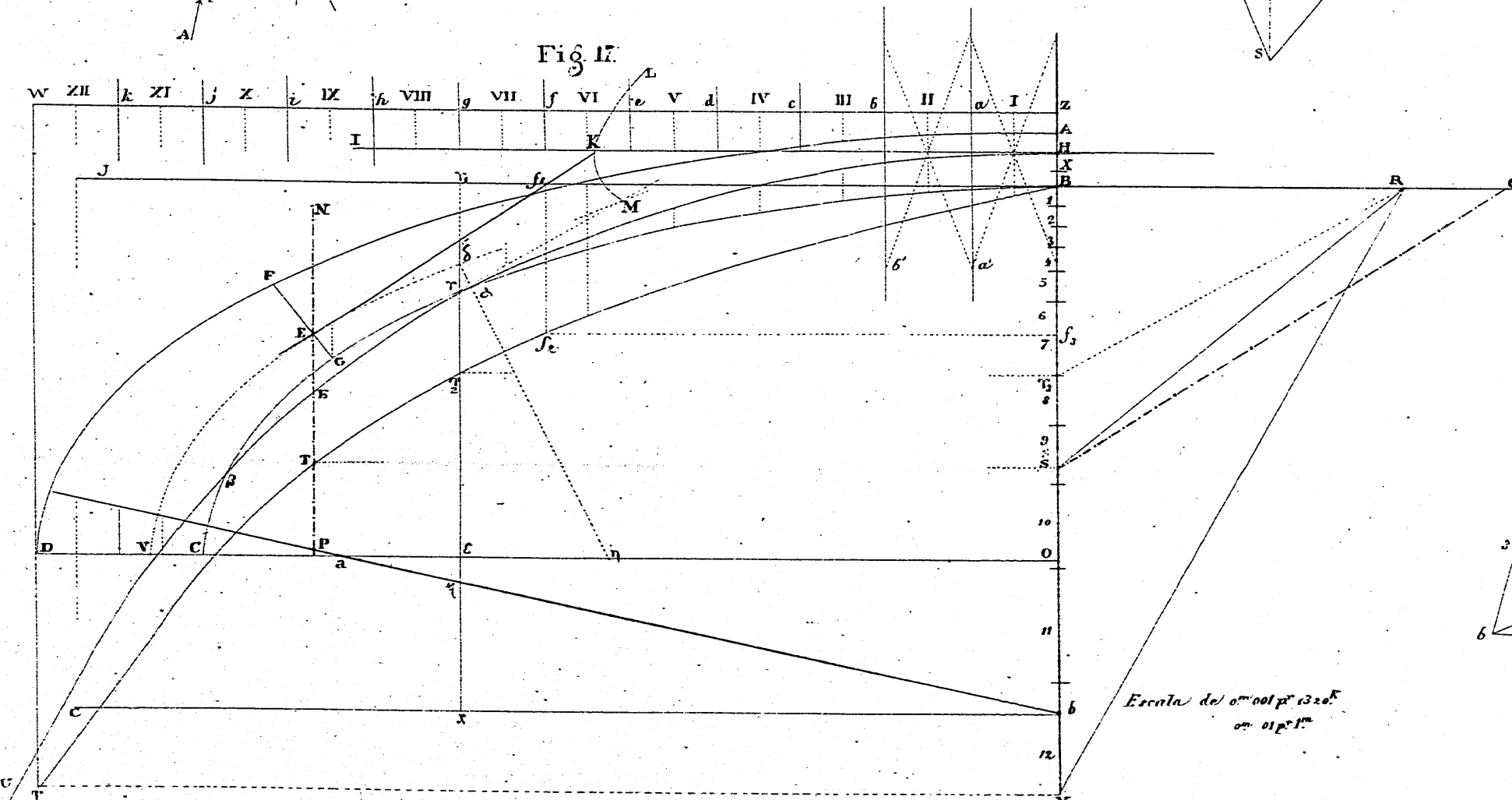


Fig 17



jarémos hablar á Mr. Morandière, que las ha analizado de la manera siguiente en su *Cours à l'École des Ponts et Chaussées*.

«La comparacion de las diversas experiencias de Boistard permite comprobar que todas las bóvedas de fábrica se abren siempre en la clave y por el intrados; que despues la parte superior de la bóveda se divide en dos *bc*, *cd*, que se caen girando alrededor de las aristas de las juntas de rotura correspondientes *bf*, *dg*. Las partes inferiores de la bóveda, con los estribos que reciben la presion de las partes superiores, se derrumban tambien, girando al rededor de sus aristas exteriores *a* y *c* de las juntas de arranque. Por consiguiente, cada bóveda puede ser considerada como un sólido compuesto de cuatro partes *ab bc cd de*, que deben permanecer en equilibrio á semejanza de una palanca acodada.»

5.º Audoy, Lamé y Clapeyron. Estos tres sabios tomaron como base de sus estudios sobre la estabilidad de las bóvedas las experiencias de Boistard, publicándose los trabajos del primero, hácia el año 1820, en el *Mémorial del Génie*, y los de los otros en los *Annales des Mines*.

6.º Navier. Las observaciones decisivas hechas hasta nuestros dias, y en las que descansa la determinacion de la curva de presion en las bóvedas de fábrica, son debidas á Navier, que en su obra titulada *Leçons de mécanique rationnelle*, publicada el año 1855, refutó, rechazando de una vez, por injustificables, todas las hipótesis admitidas por sus predecesores para la investigacion de la junta de rotura en una bóveda cualquiera.

Las hipótesis de Navier que se emplean hasta hoy para determinar la posicion de la curva de presiones en una bóveda de fábrica, pueden enunciarse así:

«La curva de presiones en una bóveda de fábrica debe pasar siempre por un punto de la clave situado al tercio de la altura de la junta, á partir del trasdos, y debe pasar tambien por el punto de la junta de rotura, situado al tercio de su longitud, á contar del intrados.»

Para la determinacion de la junta de rotura, se servia Navier de las reglas empiricas deducidas de las experiencias de Boistard, y de las que harémos un análisis detallado al ocuparnos del método que forma el objeto principal de nuestro trabajo.

7.º Méry. Todo lo que precede demuestra claramente que las condiciones de equilibrio de cada segmento de bóveda en las hipótesis admitidas,

han sido determinadas analiticamente de una manera completa. Pero los cálculos que sirven de punto de partida para dicha determinacion son sumamente complicados, y por tanto impropios para ser aplicados en la generalidad de los casos.—Era de prever que toda simplificacion de estos cálculos no podría obtenerse sino por el método gráfico; así, Méry, en su trabajo publicado en los *Annales de Ponts et Chaussées*, en 1840, no hacia más que interpretar gráficamente el método anti-guo de Coulomb.

Las condiciones de equilibrio de una bóveda, enunciadas por Méry, pueden resumirse así:

1.º La curva de presiones debe estar siempre contenida en el interior de la bóveda.

2.º Dicha curva debe encontrar siempre á la normal á cada junta bajo un ángulo menor que el de rozamiento de la fábrica sobre sí misma.

3.º La reparticion de las presiones sobre cada junta debe ser tal, que el trabajo de los puntos más cargados no debe exceder nunca del limite práctico de la resistencia de los materiales.

La posicion que debe ocupar siempre la curva de presiones en una bóveda cualquiera ha sido determinado por Méry, tomando por base la condicion siguiente:

La curva de presiones debe pasar siempre por el tercio de la longitud de la junta de la clave, á partir del intrados, y por el medio de la junta de rotura, cuya posicion ha sido determinada por Méry, como lo habia sido por los demas autores, partiendo de las experiencias de Boistard. En esta determinacion, ha seguido exactamente la marcha adoptada por Navier.—Hé aqui en qué consiste el método propuesto por Méry para trazar la curva de presiones en una bóveda cualquiera.

Sea *A B C D* una bóveda dada (*fig. 2*). Sean *A B* la junta en la clave, *C D* la junta de rotura, *G* el centro de gravedad de la superficie *A B C D*, *Q* el peso de la semi-bóveda *A B C D* por unidad de longitud, *H* y *F* dos puntos por los cuales debe pasar la curva de presiones.

Llamemos *P* al empuje horizontal en la clave, y *S* la presion sobre la junta de rotura *C D*, ambas desconocidas.

Por el punto *H* tiremos una horizontal *H E* y levantemos una perpendicular á esta última por el punto *G*; estas dos rectas se encontrarán en el punto *E*. Uniendo los puntos *E* y *F* por la recta *E F*, esta recta representará la direccion de la fuerza desconocida *S*. Conociendo el valor del peso *Q* y

las direcciones de las fuerzas E F y E H, será fácil hallar por medio del paralelogramo de las fuerzas los valores de S y P.

El del empuje P, determinado por el procedimiento que acabamos de indicar, basta para trazar la curva de presiones buscada; porque bastará para esto combinar con dicha fuerza P los pesos sucesivos de las dovelas. El razonamiento que precede hace ver que el método de Méry es de fácil aplicación práctica, y sería del todo aceptable si no dejase cierta duda bajo el punto de vista de los resultados á que conducen. Las incertidumbres que este método lleva consigo provienen de las dos circunstancias siguientes:

1.ª Las experiencias de Boistard no son concluyentes bajo el punto de vista de la posición real de la junta de rotura.

2.ª La hipótesis admitida de que el punto F debe estar colocado precisamente en el medio de la junta C D es discutible, porque rechaza *à priori* toda posibilidad de giro de la bóveda al rededor del punto D, á consecuencia de la repartición igual de las presiones en todo punto de la junta C D. La presión S, que pasa por el punto medio de la junta, da reacciones iguales en todos los puntos de la superficie.

8.º Moseley. Independiente de los trabajos de Méry, publicó Moseley el año 1855, en el *Philosophical Magazine* el método antes descrito para la construcción de la curva de presiones en una bóveda de fábrica. Debemos advertir, sin embargo, que la prioridad del descubrimiento pertenece á Mr. Méry, porque su manuscrito está fechado en 1827.

En el trabajo de Moseley se encuentra citada muy especialmente la teoría de la menor resistencia que ha servido á M. Scheffler para su nuevo método.

(Se continuará.)

## DISCURSO LEIDO EN EL ATENEO BARCELONÉS

POR

D. MAURICIO GARRAN.

(Conclusion.)

Os he hablado de la capacidad del puerto y de la importancia de los materiales empleados en las obras y colocados sobre su fondo; pero nada os he dicho todavía de los materiales sacados de él.

En estos últimos años se ha cambiado en su to-

talidad el fondo del puerto. El légamo cenagoso que le cubría en toda su extensión, ha sido arrancado y transportado á alta mar; ha desaparecido, por consiguiente, la gran capa de fango que existía, quedando en casi toda su superficie al descubierto la arena ó el terreno arcilloso. El gran bajo de arena que impedía la libre entrada y que era un grave peligro para las embarcaciones, ha sido desmontado; el fondo del puerto, en casi toda su extensión, se halla ya á ocho metros de sonda, y cualquier buque puede fondear con seguridad en todo su interior.

Todos habréis visto funcionar á la vez hasta cinco poderosas dragas durante algunos años, las cuales han arrancado del fondo del puerto, subiéndolos á 10 ó 12 metros de altura, más de *dos millones* de metros cúbicos de fango, de arcilla ó de arena, que han sido transportados con remolcadores á tres millas de distancia del puerto. Juzgad, señores, de la importancia de este trabajo hecho en los últimos años, y de la mejora que ha proporcionado á los buques y á las condiciones higiénicas del mismo puerto; mejora que será más subsistente con sus actuales condiciones que con las que anteriormente tenía, con las cuales, á pesar de haberse dragado desde 1829 á 1854 *más de tres millones de metros cúbicos*, las tascas ó barras subsistían y el puerto no tenía buena entrada ni buen fondeadero, como todos recordareis. La conservación de este fondo proporcionará al puerto una de sus principales condiciones.

El resultado de los sacrificios hechos para estas obras es ya bien apreciable, y como desearéis conocer la representación de estas ventajas, escuchad los números siguientes, que manifiestan los buques y mercancías que han entrado en los años que se expresan:

|                   | Entraron<br>en el puerto. | Con toneladas. |
|-------------------|---------------------------|----------------|
| En 1845.. . . . . | 6.505                     | 555.555        |
| En 1855.. . . . . | 7.482                     | 589.491        |
| En 1865.. . . . . | 6.157                     | 466.680        |
| En 1875.. . . . . | 7.150                     | 845.299        |

Se ve por estas cifras que en 1875 el número de toneladas llegadas al puerto ha sido más del doble que en 1845 ó treinta años antes, y poco mayor el número de barcos; es decir, que ha crecido mucho la importancia y tonelaje de los barcos que vienen al puerto, habiéndose experimentado principalmente este aumento desde 1865 á 1875, que es precisamente la época en que se han rea-