

LA ESTÁTICA GRÁFICA, PASADO Y PRESENTE DE UNA METODOLOGÍA SINGULAR

GRAPHICAL STATICS, PAST AND PRESENT OF A SINGULAR METHODOLOGY

Josep Maria Pons-Poblet, Alba Arboix-Alió

doi: 10.4995/ega.2020.12841

El procedimiento de la Estática Gráfica, aplicado a problemas de arquitectura e ingeniería civil, tuvo una gran importancia, especialmente, a finales del siglo XIX y gran parte del siglo XX. Su conocimiento por parte de los técnicos implicaba, sin duda, que era uno de los métodos de cálculo que se estudiaban en las escuelas técnicas. Pasados cien años, su uso ha desaparecido o bien ha manifestado un claro retroceso en gran parte de las mismas. Pero conocer este método es de gran importancia, ya que no sólo implica rescatarlo del pasado y poder entender cálculos históricos, sino que permite dar herramientas a los estudiantes para resolver de una manera ágil y sencilla problemas presentes y futuros. Así, este artículo quiere presentar el procedimiento de la estática gráfica, estudiar su pasado, a la vez que, planteando el presente, preguntarse por su viabilidad en un futuro.

PALABRAS CLAVE: ESTÁTICA GRÁFICA, CREMONA, RITTER, CULMANN

The method of Graphical Statics, as applied to problems in architecture and civil engineering, was of especially great importance from the late 19th century until well into the 20th century. Without any doubt, expertise by specialists implies Graphical Statics was one of the calculation procedures taught at technical colleges at the time. Over the past hundred years, it has either vanished or has its usage dwindled for the most part. However, being acquainted with this methodology is of great importance. It does not merely entail reclaiming it from the past and the ability to historical calculations; it also enables students with agile, simple means to solve present and future problems. With that in mind, this article seeks to provide an introduction to Graphical Statics, to study its past, while considering its present and enquiring about its future viability.

KEYWORDS: GRAPHICAL STATICS, CREMONA, RITTER, CULMANN



1. Concepto de Estática Gráfica

1. Graphic Statics concept

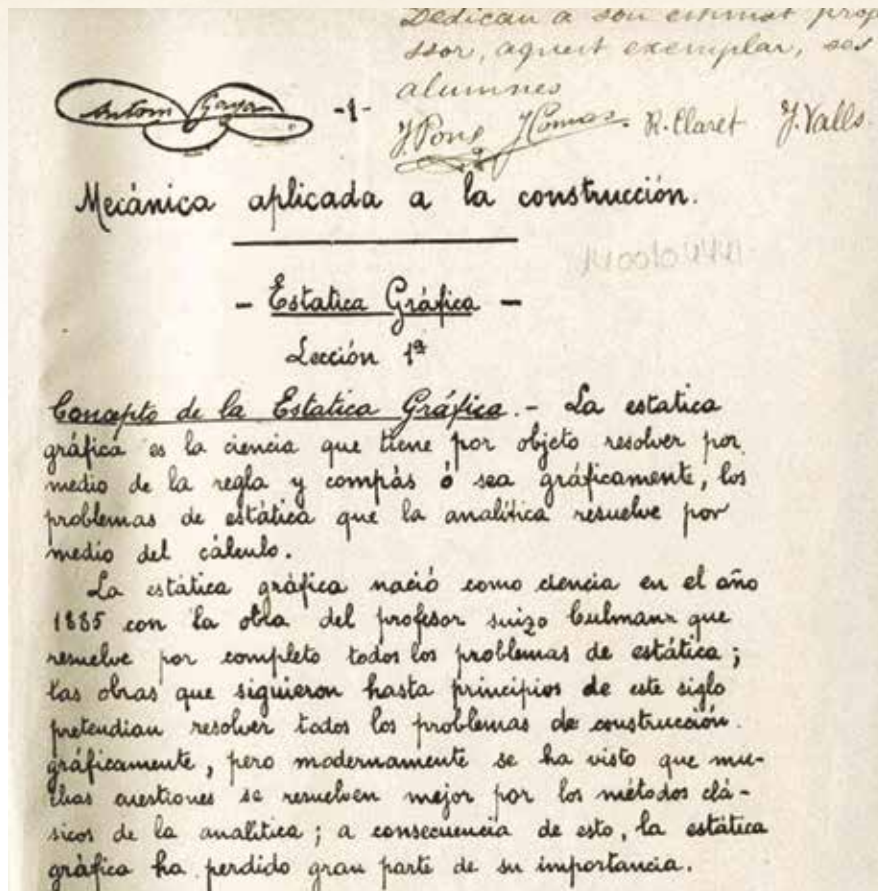
Concepto de Estática Gráfica

La estática gráfica es la ciencia que tiene por objeto resolver por medios de la regla y compás ó sea gráficamente, los problemas de estática que la analítica resuelve por medio del cálculo.

La estática gráfica nació como ciencia en el año 1885 con la obra del profesor suizo Culmann que resuelve por completo todos los problemas de estática; las obras que siguieron hasta principios de este siglo pretendían resolver todos los problemas de construcción gráficamente, pero modernamente se ha visto que muchas cuestiones se resuelven mejor por los métodos clásicos de la analítica; a consecuencia de esto, la estática gráfica ha perdido gran parte de su importancia.

Las anteriores afirmaciones, extraídas de un libro de apuntes ¹ que unos alumnos tomaron de las clases de la asignatura *Mecánica aplicada a la construcción* ², nos introducen al concepto que los futuros técnicos adquirirían de una materia llamada Estática Gráfica (o también Grafostática).

La estática gráfica fue un método (gráfico) aplicado a gran cantidad de problemas de arquitectura e ingeniería teniendo una gran importancia especialmente a finales del siglo XIX y gran parte del siglo XX. Los métodos analíticos, habituales hasta el momento (Pons 2014), se veían en gran parte superados por estos procedimientos que, en muchos casos, de manera más rápida y ágil permitían la resolución del problema. Esta sencillez y rapidez que en múltiples casos ofrecía la grafostática *versus* algunos métodos analíticos, hizo que prontamente empezase a cobrar notoriedad. Su implementación generaría gran cantidad de material bibliográfico (también docente en las escuelas técnicas)



1

como queda atesorado en las consultas bibliométricas efectuadas. En esta época, los citados métodos analíticos provenían básicamente de la formulación de la resistencia de materiales (como pudieren ser entre otros los teoremas de Mohr y Castigliano o la integración de la ecuación de la elástica). Conocidos los mismos y formulado el problema, la resolución del mismo implicaba en múltiples casos arduos y tediosos cálculos que habían de ser resueltos manualmente o con la ayuda de elementos como la regla de cálculo.

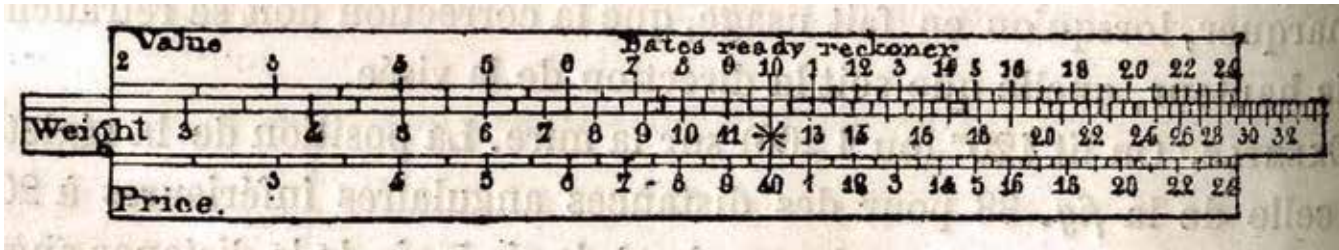
A pesar que, a veces, los procedimientos gráficos no conseguían la precisión de los analíticos, la validez de los mismos era comúnmente

The concept of Graphical Statics

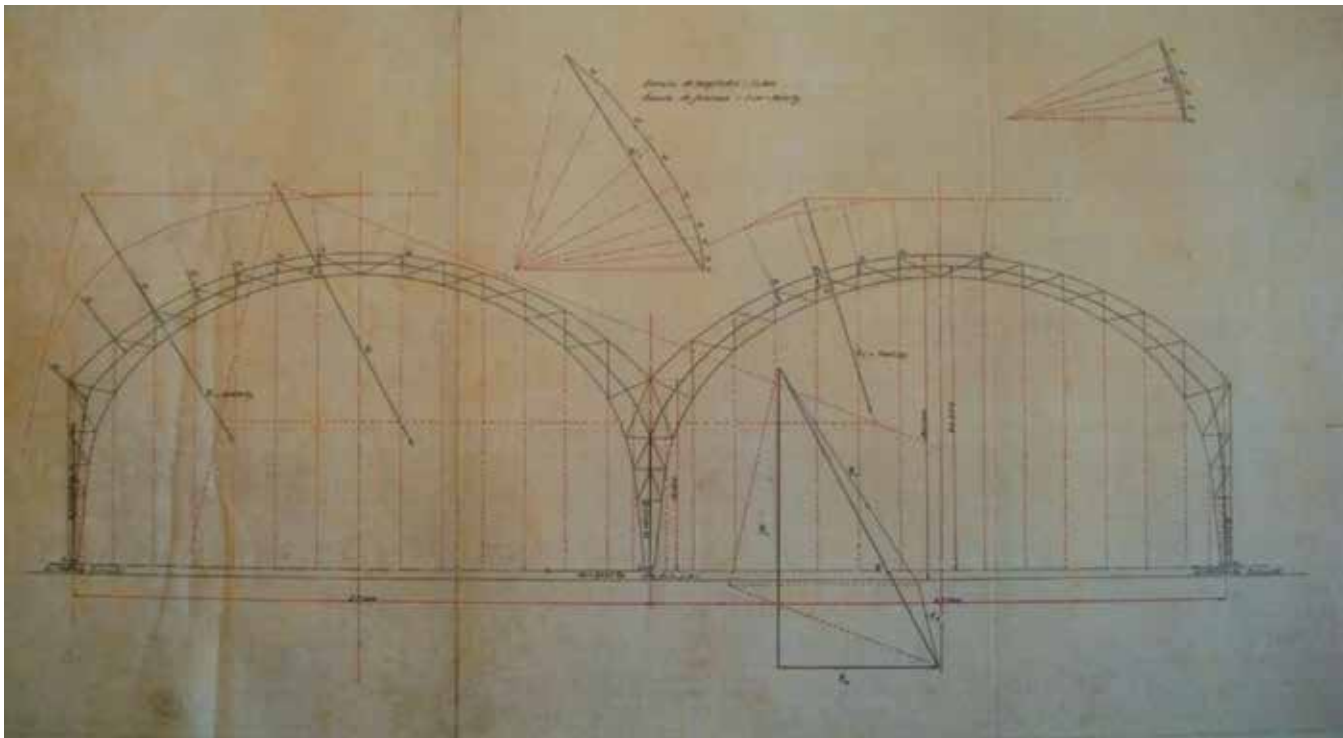
Graphical statics is the science which aims to solve problems of statics by means of straightedge and compass – that is to say, graphically – and which analytical statics would solve by means of calculation.

Graphical statics was born as a science in the year 1885 with the work of Swiss professor Culmann, which solves all problems of statics thoroughly. The works that were to follow until the beginning of this century expected to solve all construction problems graphically, but as of late it has been noted that many questions are better solved via classic analytical methods. As a consequence, graphical statics has lost a great deal of its importance.

The above statements, extracted from a notebook ¹ which some students put together from classes of the subject *Mechanics applied to construction* ², serve as an introduction to the concept which succeeding



2



3

scholars learnt about a subject area called Graphical Statics (also Graphostatics). Graphical statics was a (graphical) method applied to a large amount of architecture and engineering problems which was of great importance especially in the late 19th century and during a big part of the 20th. Analytical methods, customary up to that point (Pons 2014) began to be overtaken by these procedures which, in many instances, allowed for a quicker and more agile solution of problems. This simplicity and swiftness caused it to gain salience. Its implementation spawned a large amount of bibliographic material (as well as educational material in technical colleges) as is apparent from the bibliometric consultations we made. At that time, the aforesaid methods

aceptada para los problemas en los que se empleaba:

Los métodos grafostáticos, de suma simplicidad, [...] tienen desde luego el inconveniente de los errores de trazado y de lectura, pero si se tiene en cuenta que para determinar las dimensiones de los hierros que correspondan para resistir a los esfuerzos de la barras, debe calcularse el coeficiente de resistencia y en éste hay un gran margen de seguridad, se comprende que tienen poca importancia los errores de trazado y de lectura (Pons y Bas 1941).

Prosiguiendo:

Con todo será muy conveniente escoger en los dibujos escalas algo grandes

y tener cuidado en la construcción del dibujo empleando buenas escuadras. Los procedimientos grafostáticos los utilizaremos siempre que empleándolos en lugar de los procedimientos analíticos haya un buen ahorro de tiempo (Pons y Bas 1918).

Pasado. Breve apunte histórico

Las técnicas gráficas han estado presentes desde tiempos inmemoriales. En múltiples quehaceres el ser humano ha dejado constancia de su uso. La arquitectura y la ingeniería también pueden dar fe de ello.



- 2. Regla de cálculo del siglo XIX
- 3. Estación de Francia (Barcelona). Determinación gráfica de las fuerzas generadas por el viento sobre la cubierta (Maquinista Terrestre y Marítima S.A.) (Parejo - Pons 2010)
- 4. Cueva de Altamira. Arte rupestre paleolítico 3

- 2. Slide Rule from the XIX Century
- 3. France Station (Barcelona): graphic determination of the forces generated by the wind on the roof. (Maquinista Terrestre y Marítima S.A.) (Parejo - Pons 2010).
- 4. Altamira Cave. Paleolithic Rock Art 3

De hecho, la expresión gráfica se ha caracterizado ya desde sus orígenes como un vehículo de capacidad descriptiva con el que poder controlar la forma a la vez que permitir mostrarla. El dibujo arquitectónico sería uno de sus más célebres expresiones. Sus variantes, el croquis, los planos, la proporcionalidad, el soporte de trabajo (efímero o duradero), dejando constancia de su uso a lo largo del tiempo, han conseguido que aquella obra que originariamente estaba en la mente del creador, pudiera ver la luz. Quizás fuera la aplicación más conocida pero, a veces, la expresión gráfica también se ha aplicado a la resolución de problemas que, si bien *hasta hace algunos años se acostumbraba a resolver por vía analítica, actualmente se prefiere utilizar los procedimientos gráficos* (Henkel 1926) –en referencia a los problemas estáticos.

En la antigüedad, los diseñadores con un uso óptimo de las relaciones geométricas pertinentes, conseguían que sus *construcciones* llegasen a

buen puerto. Éstas eran primadas respecto a las relaciones mecánicas que, sin duda, no eran tenidas en cuenta (al menos como hoy en día se haría); *el cálculo de las tensiones tiene un interés secundario; es la forma de la estructura la que rige su estabilidad* (Heyman 2004). Será la geometría, la proporcionalidad, la que marcará *el proyecto*.

De hecho, desde Vitruvio hasta los primeros *Tratados*, prácticamente no encontramos referencias al cálculo estructural.

En una época donde las tensiones de trabajo eran bajas, primará fundamentalmente la forma correcta de la estructura para garantizar su estabilidad. El problema estructural pasará a ser un problema de geometría (Pons-Simó 2017).

En este caso, será la experiencia de los *maestros*, que se habían ido afianzando a lo largo de siglos, la pieza clave en la construcción. Sus *reglas* regirán el *modus operandi* llevado a cabo. En esta concepción geométrica de la construcción se aplicará la máxima, por otro lado

basically derived from the formulation of strength of materials (which includes, among others, the Mohr and Castigliano theorems, or the integration of the elastic equation). They having been made known and the problem being formulated, its solution implied in multiple cases strenuous and tiresome calculation which had to be solved manually or using items such as a calculation rule. Even though graphical procedures sometimes were not able to be as precise as analytical procedures, their validity was commonly accepted for the problems in which they were used:

Graphostatic methods, of an extreme simplicity, [...] certainly have the disadvantage of delineation and reading mistakes, but bearing in mind that in order to determine the size of corresponding irons to resist those of beams, the drag coefficient must be calculated and given that this is characterised by a wide safety margin, delineation and reading mistakes are of minor importance (Pons y Bas 1941).

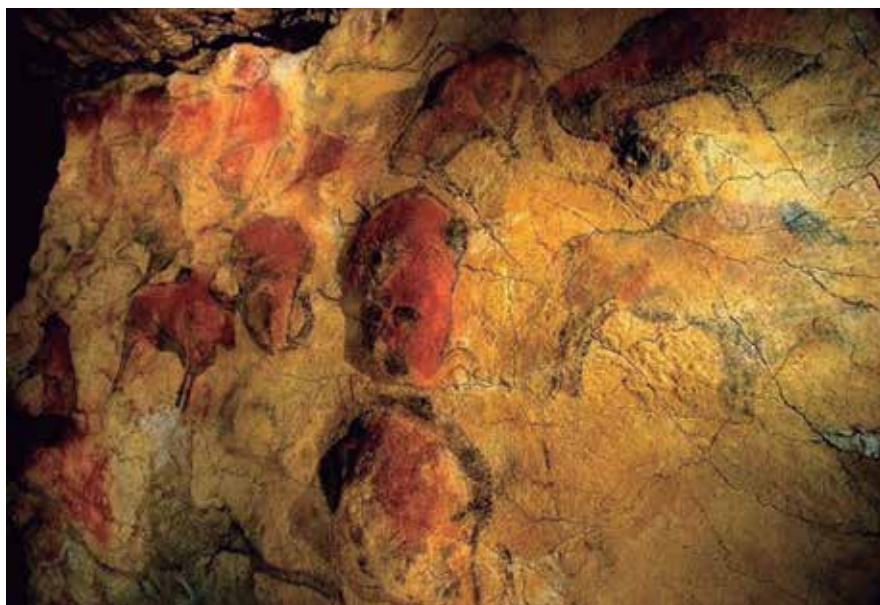
Continuing:

It will be very convenient nonetheless to choose rather big scales for the pictures and to be careful in the composition of the drawing, using proper squares. Graphostatic procedures will be used each time they ensure a time saving as compared to analytical procedures (Pons y Bas 1918).

Past. Brief historical note

Graphical techniques have always existed since time immemorial. Human beings have left evidence of their usage in many endeavours. Architecture and engineering are also proof of that.

As a matter of fact, graphical expression has been characterised since its origins as a vehicle for description which allows to control and display shapes. Architectural drawing could be considered one of its best-known expressions. Its variations, the sketch, plans, proportionality, the work support (be it ephemeral or durable), have left record of their use throughout history, allowing for a work which was originally in its creator's mind to come into existence. That might be its best known application but, sometimes, graphical expression has also been applied to solving problems, even those *which until some years ago were commonly solved via analytical methods, and for which graphical procedures are currently preferred* (Henkel





1926) – making reference statics problems. In Antiquity, *designers* with an optimal use of the applicable geometric relationships managed to make successful *constructions*. These were prioritised, as compared to mechanic relationships which, doubtlessly were not taken into account (at least not the way they would be nowadays). *The calculation of tensions is of secondary interest: it is the shape of the structure which governs its stability* (Heyman 2004). It is geometry, proportionality, which will guide *the project*.

Indeed, from Vitruvius until the earliest *Treatises* there are virtually no references to structural calculation whatsoever.

At a time when working tensions were low, the correct shape of the structure will fundamentally prevail in order to guarantee its stability. The structural problem will become a geometry problem (Pons-Simó 2017).

In that case, it was the experience of the *masters*, consolidated throughout the centuries, what mattered most in construction. Their *rules* directed the *modus operandi* in place. In this geometric understanding of construction a maxim (a “logical” one) will be applied, according to which *if a building is successful, so will be one built twice as large* (Heyman 2004). But this approach based on the rules of experience and proportionality had limits which became visible when the increase in loads and performances in the structure will be increasingly higher. It was Galileo who addressed the *geometric* logic with a critical spirit. In fact, structural calculation, entirely analytical, will only be transcendent with the Pisan’s influence.

In the late 19th century, the Swiss Karl Culmann (1821-1881) published *Die Graphische Statik*. This work, in which he compiles and formulates the principles of this new field, is considered to be the departing point of graphical statics.

In the preface to the book, the author states:

The earliest systematic application of graphical methods to determine the dimensions of the different parts of constructions are indebted to Poncelet. As a matter of fact, it was at the Superior Technical College of Engineering and Artillery of Metz [...] where Poncelet taught for the first time, before an audience of former pupils of the Paris Polytechnic College, the only one in which graphic sciences were taught at the time 4.



“lógica”, que *si un edificio funciona, también lo hará si se construye al doble de su tamaño* (Heyman 2004). Pero este planteamiento basado en las reglas de la experiencia y la proporcionalidad tendrá unos límites que serán visibles cuando el aumento de las solicitaciones y las prestaciones de la estructura sea cada vez mayor. Será Galileo, quien aborde la *lógica geométrica* con espíritu crítico. De hecho, el cálculo estructural, propiamente analítico, no trasciende hasta la influencia del pisano.

A finales del siglo XIX, el suizo Karl Culmann (1821-1881) publica *Die Graphische Statik*. Este trabajo, donde recoge y formula los principios de esta nueva disciplina, se considera como el punto de partida de la estática gráfica.

En el prólogo del libro, el autor afirma:

Las primeras aplicaciones sistemáticas de los métodos gráficos, para la determinación de las dimensiones de las distintas partes de las construcciones, se debieron a Poncelet. En efecto, fue en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Artillería de Metz, [...] donde Poncelet enseñó por primera vez, ante un público de antiguos alumnos de la Escuela Politécnica de París, la única en la que se enseñaban las ciencias gráficas en aquella época 4.

Años más tarde, Luigi Cremona (1830-1903) y Wilhelm Ritter (1847-1906) amplían el campo abierto por Karl Culmann con la publicación respectivamente de dos libros: *Les Figures Réciproques* y *Anwendungen der graphischen statik*, nuevamente de gran influencia en el campo estructural. En estos se recogen formulaciones basadas en esta *nueva* disciplina, que permiten de manera ágil el cálculo de esfuerzos de una estructura de manera distinta a los planteados por el suizo.



5. Obras de Culmann, Luigi Cremona y Wilhelm Ritter respectivamente
6. Método de Culmann

5. Works from Culmann, Luigi Cremona and Wilhelm Ritter respectively.
6. Culmann method

Se acababan de formular los conocidos métodos de Culmann, Cremona y Ritter.

Método de Culmann

El primero de los tres métodos, si bien figura en todos los materiales docentes consultados, no ha dejado ninguna aplicación real en las memorias de cálculo (al menos en las consultadas). Su función ha sido totalmente pedagógica –los autores ya lo presentaban como *poco empleado* (Pey Cuñat 1960)– siendo considerado hoy en día como un método clásico y teórico.

Se funda este método, en cortar el sistema articulado por un plano que no le corte en más de tres barras, determinar la resultante de la fuerzas exteriores que obran a la derecha o a la izquierda de la sección, y luego descomponer esta resultante en la direcciones de las tres barras cortadas (Pons y Bas 1941).

Método de Cremona

En la publicación de *Les Figures Réciproques*, encontramos formulado el procedimiento que se había de convertir prontamente en el más usado por los técnicos para la resolución de estructuras (principalmente isostáticas y planas). Si la metodología empleada

por Culmann hacíamos notar que prácticamente no ha dejado huella, con el método presentado por el italiano sucede todo lo contrario: *múltiples* referencias docentes, tanto en las guías académicas, en los apuntes, en la bibliografía técnica como en las memorias de cálculo reales que los arquitectos e ingenieros presentaban en los proyectos de sus obras.

Si en vez de construir los polígonos de fuerzas de cada vértice por separado, los construimos yuxtapuestos para tener todo el trazado en una sola figura, en la que tendremos, pues, los esfuerzos interiores de todas las barras, habremos formado el diagrama de Cremona (Pons y Bas 1941)

El diagrama de Cremona, es pues, una figura obtenida por el método de los vértices y de tal modo que en ella tengamos todos los esfuerzos interiores de las barras (Pons y Bas 1941).

A primera vista, para un lector no familiarizado con la metodología, puede parecer complicado debido a la gran cantidad de líneas que configuran el procedimiento. Para ello, y suponiendo que también les sucedía a los estudiantes que se familiarizaban con el método, se transcribe una interesante recomendación dada a los mismos:

Years after that, Luigi Cremona (1830-1903) and Wilhelm Ritter (1847-1906) extended the scope of the field inaugurated by Karl Culmann with the publication of two books, respectively: *Les Figures Réciproques* and *Anwendungen der graphischen statik*, very influential in turn in the structural field.

These books contain formulations based on this *new* discipline which allow for a very agile calculation of a structure's stresses in a different way to the methods presented by the Swiss author.

The Culmann, Cremona and Ritter methods had just been formulated.

Culmann method

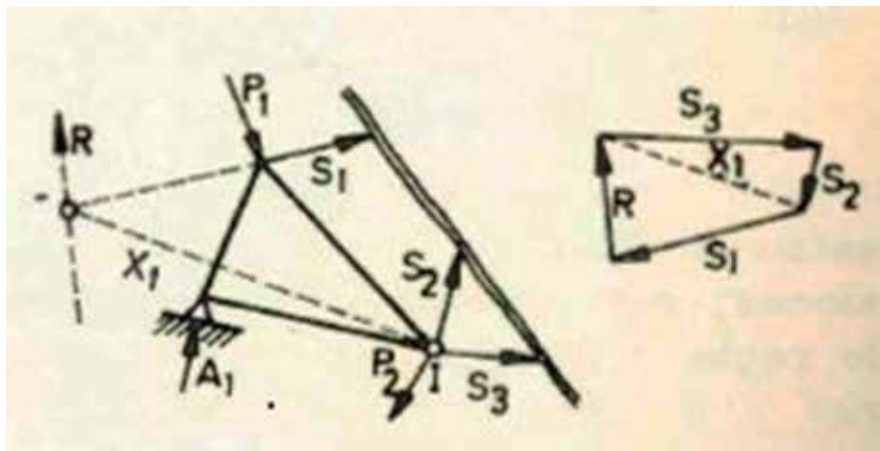
The first of the three methods, even though it is part of all teaching materials consulted, has not left any real application in calculation reports (at least that's the case of those consulted). It has merely had an educational function -its authors introduced it as *seldom used* (Pey Cuñat 1960)- and its is currently regarded as a classic, theoretical method.

This method is based on cutting the articulated system by a plane which doesn't cut more than three bars, determining the result of external forces acting to the right or left of section, and then decomposing this result in the the directions of the three cut bars (Pons y Bas 1941).

Cremona method

The formulation of the procedure which was to gradually become the most widely used to solve structures is to be found with the publication of *Les Figures Réciproques* (mainly for isostatic and flat structures). Whereas with Culmann's methodology we noted that it virtually left no imprint, the method put forward by the Italian had the opposite effect: *multiple* teaching references, in academic guides as well as in notebooks, in technical bibliography as well as in real calculation reports which architects and engineers submitted with their work projects.

If, instead of building the force triangle of every vertex separately, we built them juxtaposed in order to have the contain the whole outline in a single figure in which we will have, therefore, all the internal stress of all bars, we will come up with the Cremona diagram (Pons y Bas 1941) The Cremona diagram, thus, is a figure obtained with the vertex method and in such way that it contains all the internal stresses of the beams (Pons y Bas 1941).





It may seem complicated at first glance to a reader unfamiliar with the methodology, due to the large amount of lines which make up the procedure. To this end, and assuming that happened to students who were becoming familiar with the method for the first time, we transcribe an interesting piece of advice offered to them:

It's worthwhile to draw the figures in the diagram in red, and everything else in black, using thin lines for straight beams and thicker lines for the compressed ones (Ceballos 1957).

As we mentioned earlier, the importance of this method has been proved, besides by its recurrence in teaching materials, by examples found in calculation reports of actual building constructions. As an example, the graphical solving of a lattice in the National Automotive Company in Madrid by the engineer Don Eduardo Torroja Miret (1899-1961). Details on the entire construction can be consulted from the archive 5.

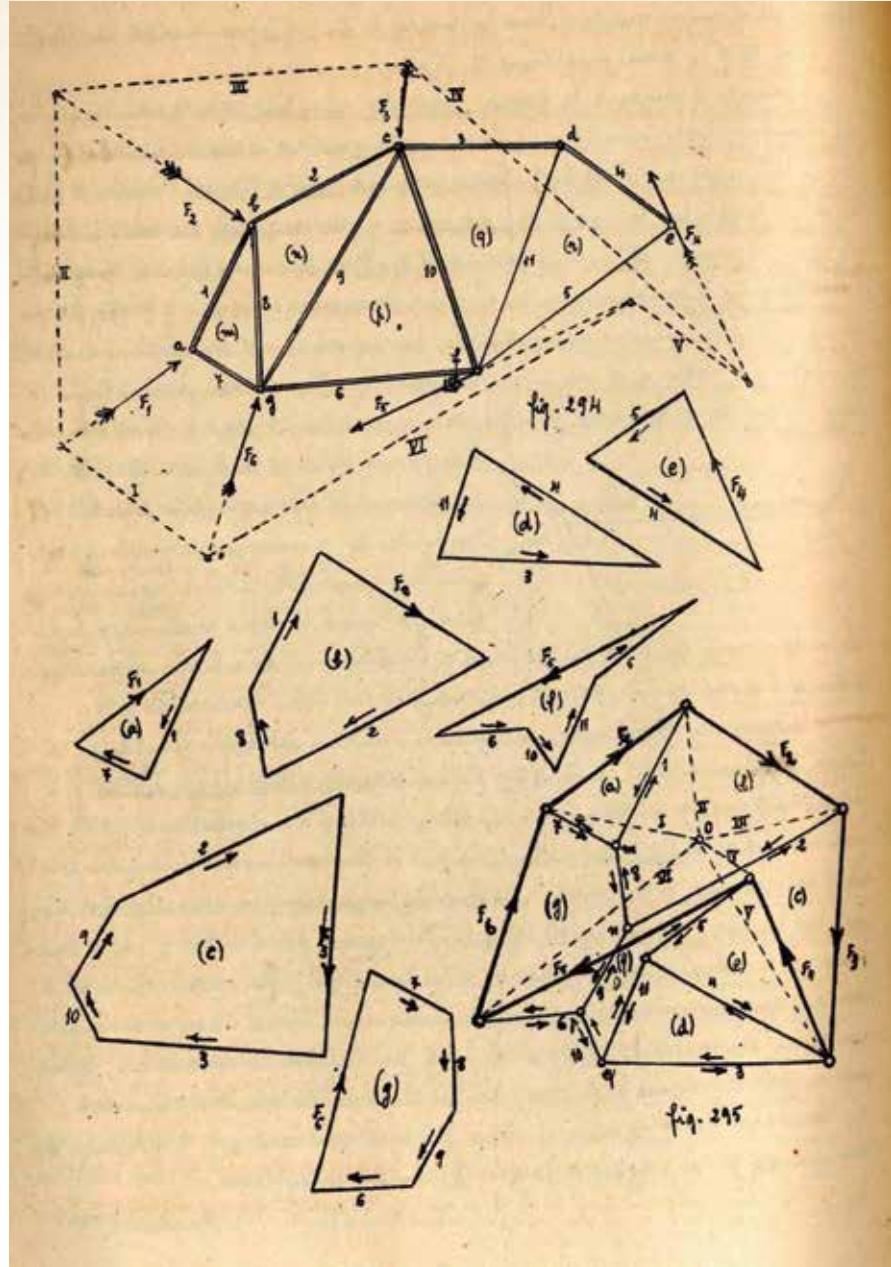
Ritter method

Even though the previous methodology, the Cremona method, allows the global solving of the problem – that is, obtaining the performance of *all* beams – the method put forward by W. Ritter in 1860 is characterised by it allowing us *to determine the stress of one beam separately without needing solving the others.* (Saliger 1950).

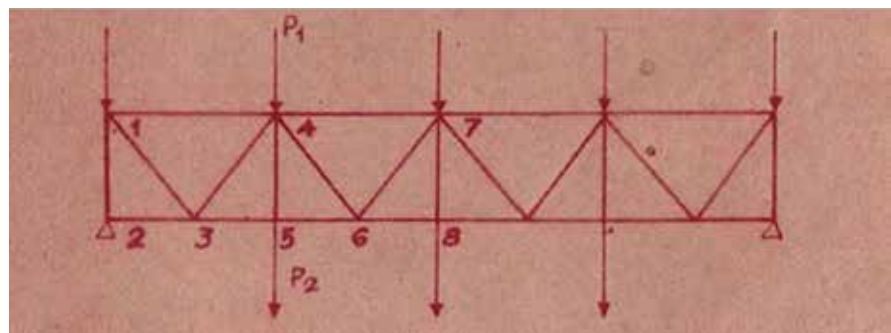
The given system is cut by t_1 - t_2 and this normal section separates the right portion which is considered as suppressed: the balance subsists if the stresses of cuts beams are applied on the left portion, taking them into account as if they were external forces (Saliger 1950).

As was the case with the Cremona method, the influence of this method has been widely reflected in teaching materials and bibliography.

Figure 12 shows us an example⁵ in which, trying to calculate the value of a beam of a flat lattice, its author (a student, in this case, might be guessed) writes down the following words: *it is not necessary to make the complete graphic*, making clear what one of the main benefits of this method. An additional advantage of this method is it allowing solving a problem both graphically and analytically



7



8



- 7. Método de Cremona
- 8. Celosía plana sometida a distintos esfuerzos
- 9. Diagrama de Cremona correspondiente
- 10. Esfuerzos (toneladas) obtenidos del Diagrama de cremona anterior

- 7. Cremona method
- 8. Planar truss under several stresses
- 9. Corresponding Cremona diagram
- 10. Stresses (tons) obtained from the previous Cremona diagram

En los diagramas es conveniente dibujar las fuerzas en rojo, lo demás en negro, con trazo fino las barras estiradas y con trazo más grueso las comprimidas (Ceballos 1957).

Como se refería, la importancia del método es constatado, a parte de su abundante presencia en el material docente, también en ejemplos encontrados en las memorias de cálculo de construcciones reales. Se muestra, como ejemplo, la resolución gráfica de una celosía de la Empresa Nacional de Automoción en Madrid por parte del Ingeniero Don Eduardo Torroja Miret (1899-

Present

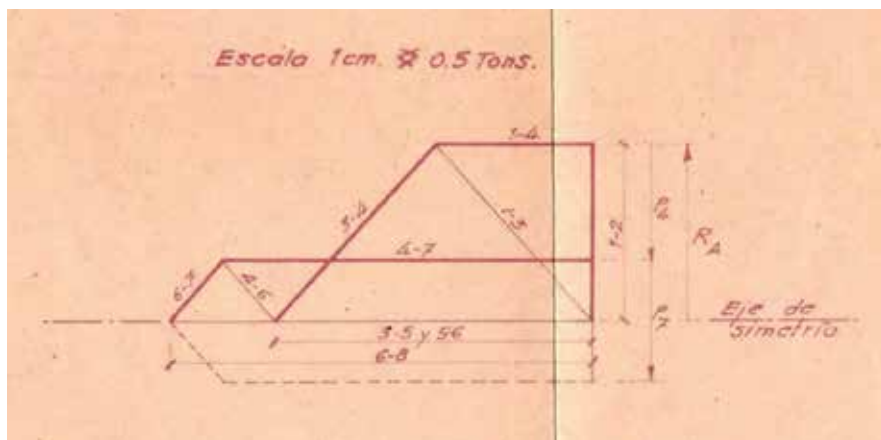
The benefits of graphical statics were already being challenged in technical colleges in the early 20th century. From the notes contained in the manuscripts of *Applied mechanics* by Pons y Bas, we encounter:

All moment curves that we have measured in strength of materials can be also measured with the help of Graphostatic elements, even though it would be more accurate to say that *it is more beneficial to solve these problems with the calculation procedures used in strength of materials, rather than with those which we are studying* (Pons y Bas 1941).

Nowadays, after more than one hundred years, the graphical statics method is still present in teaching bibliography of technical schools, as well as in related bibliography, albeit with a marked decline and apparent disuse. The main difference to be found is that, even though initially it was conceived as a procedure using materials appertaining to *graphic design*: pencil, rubber, rule, square and bevel, today solutions can be found for the final result using graphic design software, which is also useful to read the values of real stresses on every beam. We have come all the way from drawing desk to software desk with CAD and BIM software. However, it must be emphasised that calculation procedures are increasingly being implemented with numerical methods (matrix calculation, finite element method) which have replaced some of the previously existing methods, as has been the case with graphical calculation.

Conclusions

As we mentioned early on in this essay, graphical statics has been a widely used calculation method during a specific period of time, coexisting with analytical methods. And, in fact, in some specific cases displaying more quickness and a more extensive use by technicians. Calculation memories prove that in some cases. After some time, the implementation of analytical methods using numerical procedures have demoted graphostatics, this field becoming an almost residual element in the case of some technical colleges, as it is the case in engineering where its use is nonexistent or barely testimonial. It's not exactly the same



9

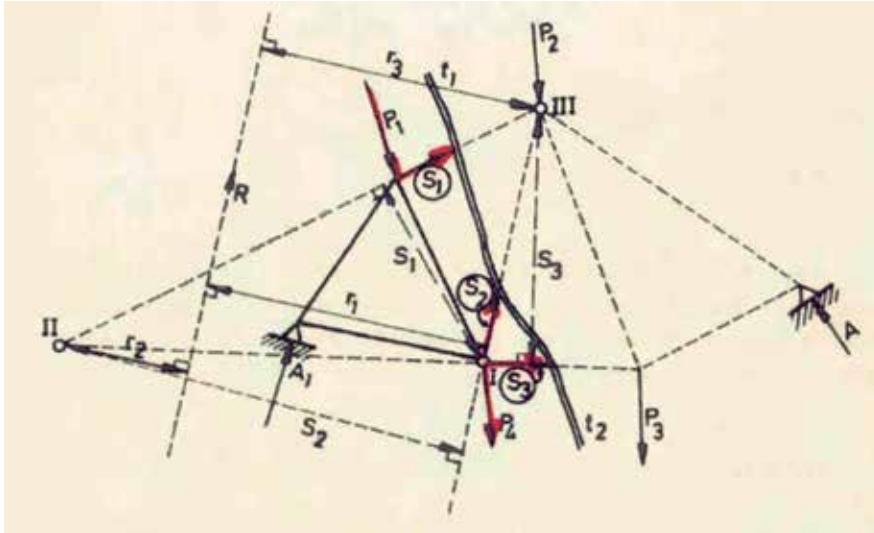
Esfuerzos

En el Anejo nº 1 se ha trazado el diagrama de Cremona para carga unidad en cada nudo de la cabeza superior. De él se obtienen los esfuerzos axiales siguientes:

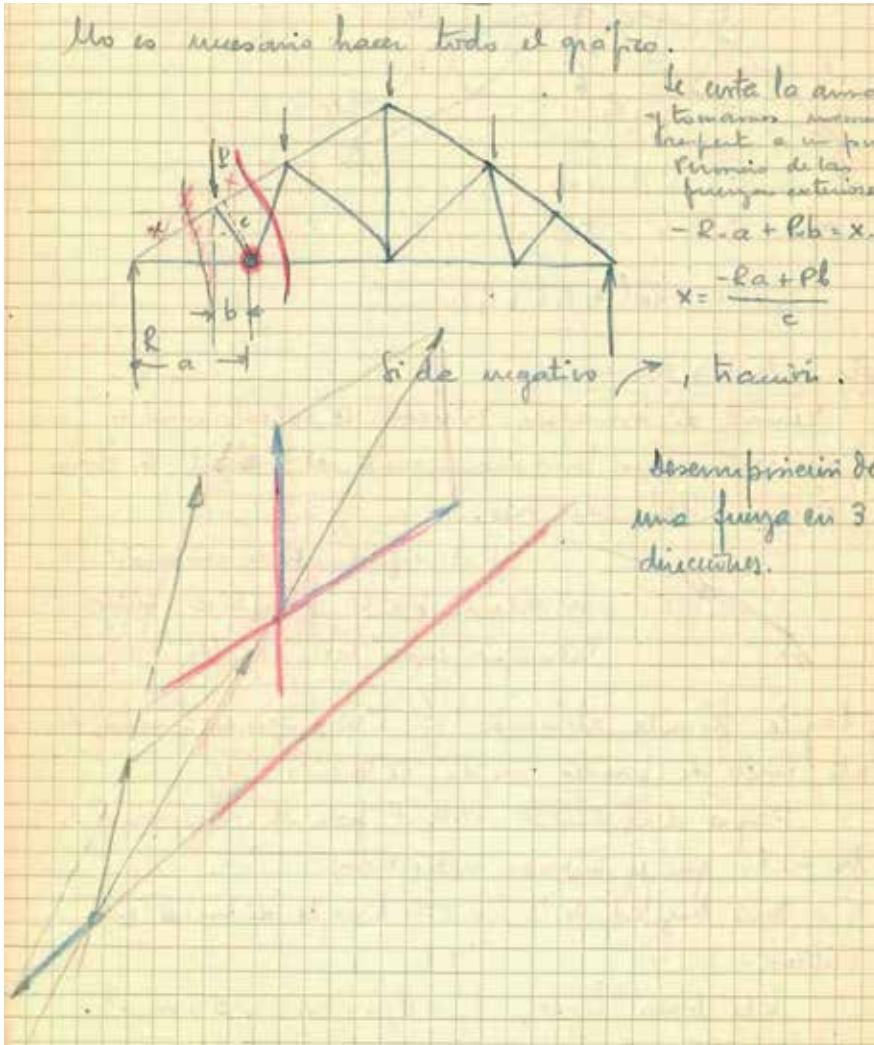
Barra		Barra	
1-4	= - 10,9 Ton	1-2	= - 20,4 ton
4-7	= - 25,7	4-5 y 7-8	= 2,4 "
2-3	= 0	1-3	= 16,3
3-5	= 21,9	3-4	= - 16,3
5-6	= 21,9	4-6	= 5,6
6-8	= 29,3	6-7	= - 5,6

- Compresión
+ Tracción

10



11



12

1961). El detalle de la edificación completa se puede consultar del propio archivo 5.

Método de Ritter

Si bien el método precedente de Cremona permite la resolución global del problema planteado, esto es, la obtención de las acciones de todas las diferentes barras, el método presentado en 1860 por W. Ritter se caracteriza por el hecho que puede determinarse aisladamente el esfuerzo de una barra sin necesidad de averiguar los demás (Saliger 1950).

El sistema dado se corta por t_1-t_2 y esta sección normal separa la porción derecha que se considera suprimida: el equilibrio subsiste si se aplican a la porción izquierda los esfuerzos de las barras cortadas, teniéndolos en cuenta como si de fuerzas exteriores se tratara (Saliger 1950).

Como el caso precedente de Cremona, este método también se encuentra abundantemente reflejado en el material didáctico y bibliográfico.

La figura 12 nos muestra un ejemplo 5 donde, queriéndose calcular el valor de una barra de una celosía plana, el autor (se supone en este caso alumno) apunta la sentencia: *no es necesario hacer todo el gráfico*, dejando claro una de las bondades del método. Otra ventaja adicional de este método la podemos encontrar en el hecho que nos permite la resolución tanto gráfica como analítica del problema.

Presente

Las bondades de la estática gráfica ya empezaban a ser cuestionadas en las escuelas técnicas a principios del siglo xx. De los apuntes referidos manuscritos de



Mecánica aplicada de Pons y Bas, recogemos:

Todas las curvas de momentos que hemos determinado en la resistencia de materiales pueden determinarse también con el auxilio de los elementos de la Grafostática, aunque digamos en honor a la verdad *que es más ventajoso resolver estos problemas por los procedimientos de cálculo empleados por la Resistencia de materiales que por los que estamos estudiando* (Pons y Bas 1941).

Hoy en día, pasados más de cien años, el método grafostático continúa estando presente tanto en el material docente de las escuelas técnicas, como en el material bibliográfico afín, si bien con un claro retroceso y evidente desuso. La principal diferencia que podemos encontrar es que, si inicialmente estaba pensado proceder para obtener la solución con material propio *del mundo gráfico*: lápiz, goma, regla, escuadra y cartabón, hoy en día se puede resolver generando el resultado final con programario de diseño gráfico y, a través del mismo, leer el valor del esfuerzo real que actúa en cada barra. Hemos pasado de la mesa de dibujo a la del ordenador con software CAD y BIM.

Ahora bien, cabe destacar que los procedimientos de cálculo, cada vez más, van siendo implementados con métodos numéricos (cálculo matricial, método de los elementos finitos) los cuales han ido relegando algunos de los previamente existentes –como ha sido el caso de cálculo gráfico.

Conclusiones

Decíamos al principio del trabajo que la estática gráfica ha sido un método de cálculo muy utilizado en un periodo específico cohabi-

tando con los métodos analíticos y, de hecho, en algunos casos concretos superándolos en rapidez y uso generalizado por parte de los técnicos. Las memorias de cálculo así lo constatan en determinados casos. Pasado el tiempo, la implementación de métodos analíticos con procedimientos numéricos ha ido relegando la grafostática hasta ser un elemento casi residual en algunas escuelas técnicas, como fuere el caso de las de ingeniería donde su uso es nulo o casi testimonial. No siendo exactamente el mismo caso en las escuelas técnicas de arquitectura donde su uso, a pesar de haber menguado, continúa aún vigente, aunque como es lógico también los métodos numéricos tienen cada vez más importancia, relevancia y una actualidad *in crescendo*.

Este hecho permite prever a los autores que, en un futuro cercano, en las escuelas de ingeniería será un método anacrónico sólo referenciado en los casos históricos generados en la consulta de determinadas memorias de cálculo. No así en las escuelas de arquitectura, aunque su práctica será generalizada con métodos informáticos de dibujo asistido por ordenador.

Sirvan estas breves anotaciones sobre la estática gráfica para plantear estas cuestiones entre los lectores. Y tal vez animar a rescatar estos métodos que, aunque antiguos, permiten resolver de manera ágil y rápida problemas estructurales presentes. ■

Notas

1 / Encontrado en el fondo antiguo de la biblioteca de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona.

2 / Se desconoce el año de edición pero la temática, así como las referencias encontradas, sugieren sea de finales de la década de los 40.

in the case of architecture technical schools where, in spite of decreasing use, it is still applicable, even though, logically there also the numerical methods are increasingly important, relevant and *in crescendo*.

This allows us authors predict that in a near future, it will become a dated method in engineering colleges, only quoted in historical cases in the consultation of specific calculation reports. That will not be the case in architecture colleges, even though its usage will be commonplace with computer-aided drawing methods.

We wish these brief notes on graphical statics will be useful in raising such questions among the readers, and maybe encourage them to rekindle methods which, old-fashioned as they might appear, make it possible to solve in a quick and agile way present structural problems. ■

Notes

1 / Found in the old repository of the Superior Technical College of Industrial Engineering of Barcelona.

2 / The publishing year is not known but the subject, as well as the found references, suggest it must be from the late 1940s.

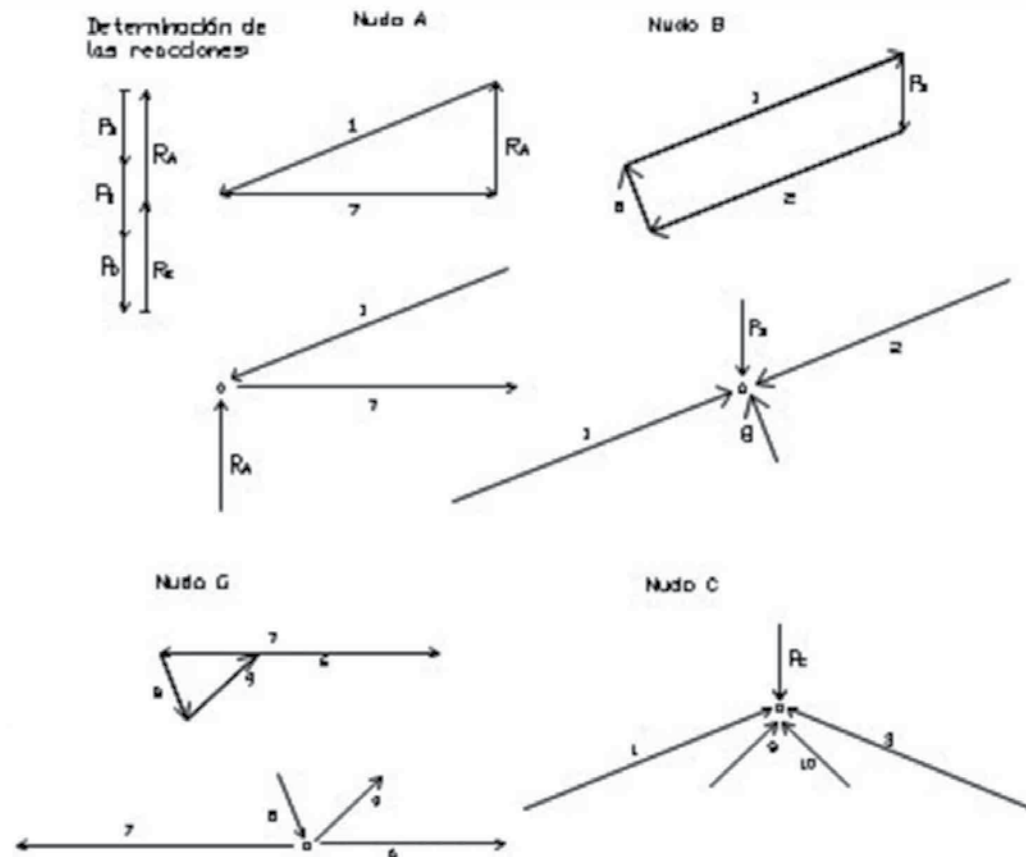
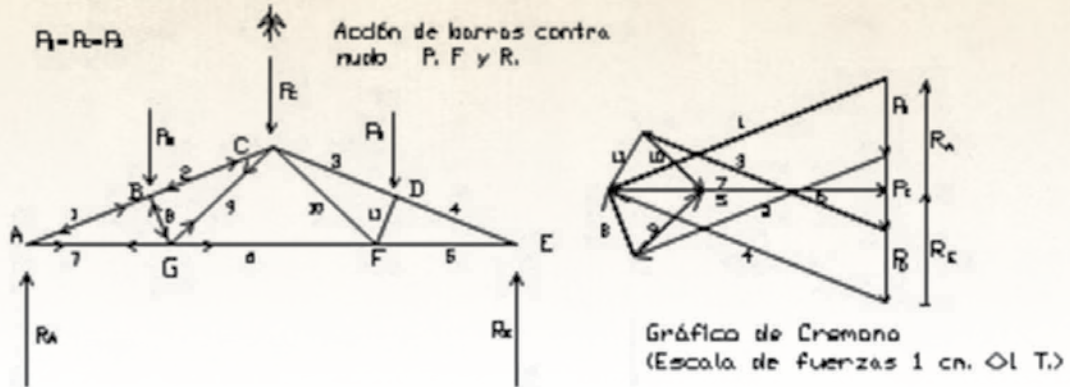
3 / Author's translation of the original: Les premières applications systématiques des méthodes graphiques, à la détermination des dimensions des diverses parties des constructions, sont dues à Poncelet. C'est en effet à l'école d'application du génie et de l'artillerie, à Metz, [...] furent pour la première fois professées par Poncelet, devant un auditoire formé d'anciens élèves de l'École polytechnique de Paris, la seule où les sciences graphiques fussent enseignées à cette époque

4 / Work: Factory of the National Automotive Company in Madrid. Engineer: Eduardo Torroja Miret ETM-335-001. [Public tender of a unit of the ENASA factory] 1948-04. Solución B. Cálculos justificativos. Nº 665.302. 30 typewritten pages with notes in black ink and collaged with drawings [...]. <http://www.cehopu.cedex.es/etm/expt/ETM-335-001.htm>

5 / Notes of the *Mechanics* course 1957-1958 belonging to Technical-Industrial Engineering programme

References

- CEBALLOS PRADAS, G. 1957. *Apuntes de construcciones metálicas*. Barcelona: E.T.S.I.I.B.
- HENKEL, O. 1926. *Estática Gráfica*, primera edición española. Barcelona: Ed. Labor.
- HEYMAN, J. 2004. *Análisis de estructuras: un estudio histórico*; traducción de Santiago Huerta. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- FORNONS, J. M^o. 1996. *Teoría de estructuras*. Barcelona: E.T.S.E.I.B. CPDA.
- PEY CUÑAT, A. 1960. *Apuntes de construcciones industriales*. Tarrasa: E.T.S.I.I.
- PONS Y BAS, R. M^o. 1941. *Mecánica aplicada: mecánica de la Construcción* (3^a edición). Barcelona: Casa Bosch.
- PONS-POBLET, J. M^o. 2014. *De Gaudí a Miralles: cent anys d'estructura metàl·lica a Barcelona*.



13

Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya (U.P.C). <http://hdl.handle.net/10803/279396>.

- PONS-POBLET, SIMÓ. 2017. *El binomio geometría-tensión en las obras de los siglos XV y XVI*. III Congreso Internacional do Tardo-Gótico: Da traça à edificação a arquitetura dos séculos XV e XVI em Portugal e na Europa.
- SALIGER, R. 1950. *Estática aplicada al cálculo de estructuras y al hormigón armado*. Barcelona: Labor *Traité de Statique Graphique*. Karl Culmann. <https://catalogue.bnf.fr/ark:/12148/cb30290848s> [Accessed 3 December 2019]

3/ Traducción de los autores del original: Les premières applications systématiques des méthodes graphiques, à la détermination des dimensions des diverses parties des constructions, sont dues à Poncelet. C'est en effet à l'école d'application du génie et de l'artillerie, à Metz, [...] furent pour la première fois professées par Poncelet, devant un auditoire formé d'anciens élèves de l'Ecole polytechnique de Paris, la seule où les sciences graphiques fussent enseignées à cette époque.

4 / Obra: Fábrica de la Empresa Nacional de Automoción en Madrid. Ingeniero: Eduardo Torroja Miret ETM-335-001. [Concurso de nave para la fábrica de ENASA] 1948-04. Solución

B. Cálculos justificativos. Nº 665.302. 30 hojas mecanografiadas con anotaciones en tinta negra y collage con dibujos [...]. <http://www.cehopu.cedex.es/etm/expt/ETM-335-001.htm>

5 / Apuntes de la asignatura *Mecánica* del curso 1957-1958 correspondientes a la titulación de Ingeniería Técnica Industrial.

Referencias

- CEBALLOS PRADAS, G. 1957. *Apuntes de construcciones metálicas*. Barcelona: E.T.S.I.I.B.



- HENKEL, O. 1926. *Estática Gráfica*, primera edición española. Barcelona: Ed. Labor.
- HEYMAN, J. 2004. *Análisis de estructuras: un estudio histórico*; traducción de Santiago Huerta. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- FORNONS, J. M^a. 1996. *Teoría de estructuras*. Barcelona: E.T.S.E.I.B. CPDA.
- PEY CUÑAT, A. 1960. *Apuntes de construcciones industriales*. Tarrasa: E.T.S.I.I.
- PONS Y BAS, R. M^a. 1941. *Mecánica aplicada: mecánica de la Construcción* (3^a edición). Barcelona: Casa Bosch.
- PONS-POBLET, J. M^a. 2014. *De Gaudí a Miralles: cent anys d'estructura metàl·lica a Barcelona*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya (U.P.C). <http://hdl.handle.net/10803/279396>.
- PONS-POBLET, SIMÓ. 2017. *El binomio geometría-tensión en las obras de los siglos xv y xvi*. III Congreso Internacional do Tardo-Gótico: Da traça à edificação a arquitetura dos séculos xv e xvi em Portugal e na Europa.

- SALIGER, R. 1950. *Estática aplicada al cálculo de estructuras y al hormigón armado*. Barcelona: Labor

Traité de Statique Graphique. Karl Culmann.
<https://catalogue.bnf.fr/ark:/12148/cb30290848s> [Accessed 3 December 2019]

Anwendungen der graphischen statik. W. Ritter.
<https://www.e-rara.ch/doi/10.3931/e-rara-20087> [Accessed 3 December 2019]

Les Figures Réciproques en Statique Graphique. Luigi Cremona.
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k99712x?rk=21459;2> [Accessed 3 December 2019]

Análisis estructural de edificios del siglo xx: la Cubierta de la Estación de Francia (2010). Parejo Rey, Carlos José. Director: Pons Poblet, Josep Maria. Proyecto final de carrera. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/10067> [Accessed 3 December 2019].

- 13. Método de Cremona. Resolución con procedimientos informáticos (Fornons 1996)
- 14. Estación de Francia (Barcelona). Modelización nave central (Parejo-Pons 2010)
- 15. Estación de Francia (Barcelona). Diagrama de resistencia de secciones (Parejo-Pons 2010)

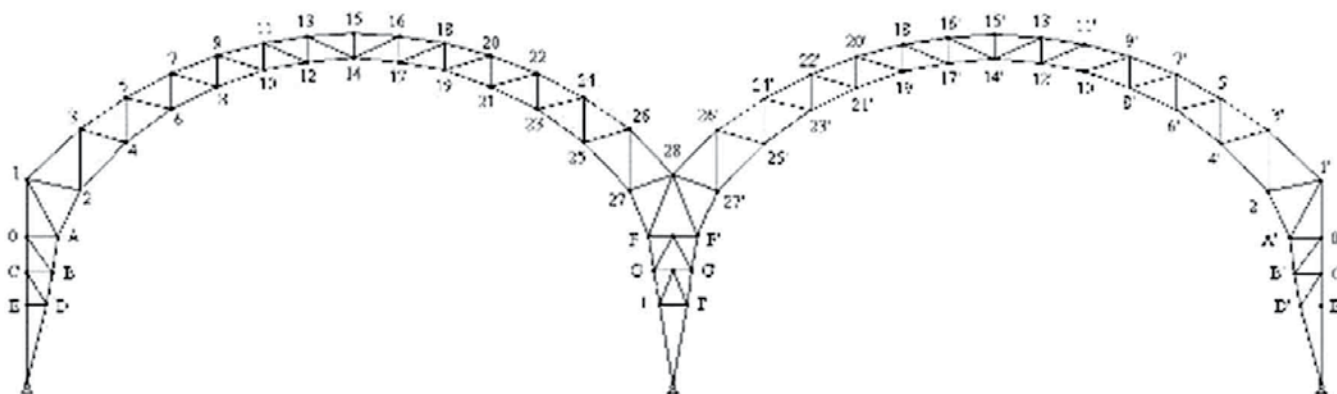
- 13. Cremona method. Solution using computer procedures (Fornons 1996).

- 14. France Station (Barcelona). Central nave model
- 15. France Station (Barcelona). Section resistance diagram

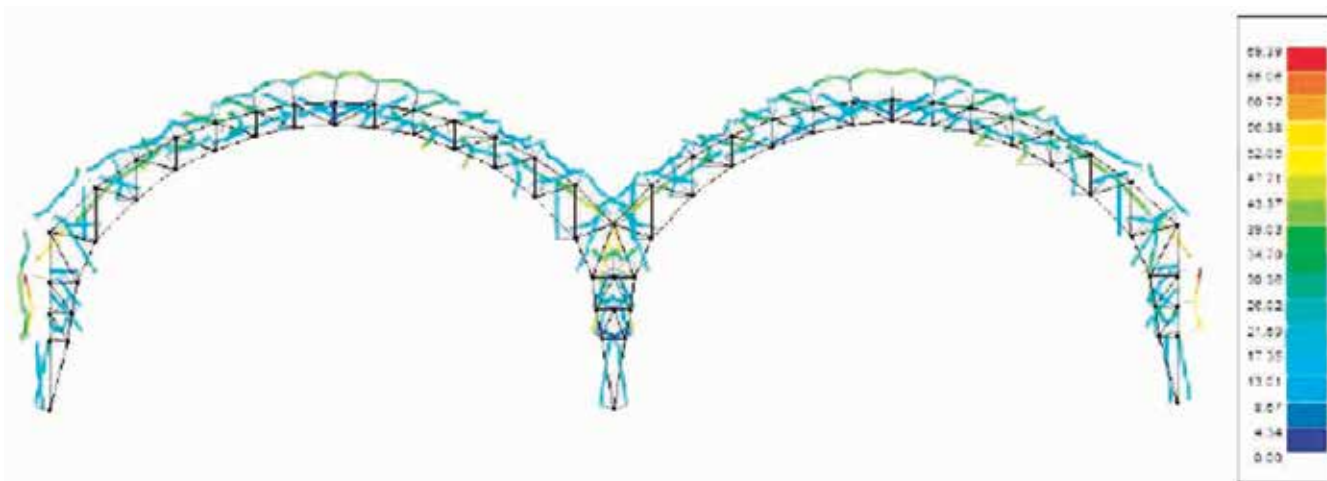
Anwendungen der graphischen statik. W. Ritter.
<https://www.e-rara.ch/doi/10.3931/e-rara-20087> [Accessed 3 December 2019]

Les Figures Réciproques en Statique Graphique. Luigi Cremona.
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k99712x?rk=21459;2> [Accessed 3 December 2019]

Análisis estructural de edificios del siglo XX: la Cubierta de la Estación de Francia (2010). Parejo Rey, Carlos José. Director: Pons Poblet, Josep Maria. Proyecto final de carrera. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/10067> [Accessed 3 December 2019]



14



15