

# El cálculo de estructuras en la obra de Carlos Fernández Casado

## *Analysis of structures after Carlos Fernández Casado*

Alberto Fraile\*, Lutz Hermanns\*\*, Enrique Alarcón\*

### RESUMEN

En este artículo se analizan las aportaciones de Carlos Fernández Casado al cálculo de estructuras. Tras exponer el contexto internacional, se describen sus contribuciones y su relación con la formación que recibió en la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid. Se finaliza indicando algunos de los méritos más interesantes de su obra escrita.

### SUMMARY

*In the present paper the contributions of Carlos Fernández Casado to Structural Analysis are reviewed. After a description of the international context he was working in, his contributions and their relation to the academic training he received at the Civil Engineering Scholl in Madrid are described. Finally the most interesting aspects of his written work are commented.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Carlos Fernández Casado fue uno de los ingenieros más distinguidos de su generación. Su obra construida ha oscurecido en cierta manera su categoría como tratadista de los métodos teóricos en la Mecánica de los Medios Continuos y la teoría de Estructuras. En este artículo se pretende dar una visión de ese aspecto de su actividad y presentar sus aportaciones a los temas de cálculo. En particular se le recuerda como dominador de un método general: el método de Cross y defensor de sus virtudes: sencillez, generalidad y sistematización. Eso no quiere decir que no conociese las posibilidades existentes; antes al contrario, todos sus escritos rebosan erudición y conocimiento profundo. Su elección no fue casual sino deliberada.

Por otro lado siempre tuvo claro que el cálculo, aunque inevitable, tiene un papel

secundario en el proceso del proyecto y que la labor puramente mecánica debe trasladarse a personal auxiliar para dejar el mayor tiempo posible a la comprensión profunda del comportamiento de la estructura. En sus palabras: "Intuición y experiencia son las dos fuentes vivas a las que ha de acudir el que proyecta. El cálculo no es más que la cristalización científica de todo el desarrollo intuitivo y experimental anterior... y el ingeniero ha de dominarlo aunque sólo sea para no ser dominado por él"<sup>(1)</sup>.

En este sentido Carlos Fernández Casado es un perfecto representante del concepto de ingeniero moderno tal como se implantó en España.

Se ha dicho repetidas veces que las ingenierías modernas surgen cuando se aplican los recursos de la ciencia positiva al análisis de modelos abstractos que permiten predecir

108-14

**Palabras clave:** análisis de estructuras, puentes, arcos.

**Key words:** structural analysis, bridges, arches.

\* Universidad Politécnica de Madrid, España

\*\* Centro de Modelado en Ingeniería Mecánica. (CEMIM-FFII), Madrid, España

resultados a costa de aplicar las leyes físicas tanto al ambiente externo como a la propia materia de la estructura. Por lo menos esa es la línea inaugurada por Betancourt en la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid; línea que, por otro lado, ha sido también la elegida en todas las escuelas de ingeniería españolas y mantenida a lo largo de los S. XIX y XX. Como ejemplo del convencimiento con que ello se hacía baste recordar el número de la R.O.P. de 1899, en que se celebraba el primer centenario del cuerpo. Allí Rogelio Inchaurreandieta insistía "Algunos ingenieros sostienen que la Escuela de Caminos nació con un carácter científico demasiado pronunciado, y que esto ha influido constantemente en el predominio de la teoría sobre la práctica en todas las transformaciones por las que ha pasado. Creo que mientras haya ingenieros de Caminos ha de sobreponerse a esa crítica el caluroso aplauso a los fundadores de la enseñanza que la hicieron arrancar de la expresión más acabada y completa de las ciencias exactas y físicas como se conocían en aquellos tiempos."

Y más adelante añade: "Consigno mi protesta contra la tendencia que he visto en algunos, pocos por fortuna, que quisieran sacrificar la teoría a una práctica que, entendiéndose bien, jamás sería completa y que transformaría nuestra Escuela de Ingenieros, verdaderamente tales, en una Escuela de Artes y Oficios".

Fernández Casado está enraizado en esta filosofía. Por ejemplo en el prólogo a su primera edición de "Resistencia" <sup>(2)</sup> escribe: "...Se debe llegar a la teoría de la Elasticidad porque es la que domina el problema, e ingeniería es, ante todo, dominio".

Pero es ecléctico: "... Tenemos un arte y una ciencia de la construcción. Hay que mantener ambas direcciones en equilibrio, pues romperlo conduciría de una lado a la fantasía irresponsable, y de otro, a la pedantería cerril...".

Para poner en contexto lo meritorio de su aportación a la técnica española se comienza describiendo someramente los movimientos internacionales alrededor de la teoría de estructuras y de la mecánica de los medios continuos que él vivió. A continuación se incluyen algunas circunstancias del ambiente técnico en que le tocó estar y sus contribuciones para, finalmente, recopilar algunas virtudes de su trabajo que, creemos, son dignas de emulación.

## 2. EL AMBIENTE INTERNACIONAL

En régimen lineal los principios de cálculo están claros desde Navier. Se reducen a

combinar las condiciones de equilibrio con las de compatibilidad mediante la ley de comportamiento del material. La linealidad de todas esas relaciones permite utilizar la adición de soluciones parciales definidas por valores unitarios de las incógnitas seleccionadas y ponderadas por las magnitudes de esas incógnitas. Si éstas son esfuerzos se tiene el método de la flexibilidad y si son movimientos el método de la rigidez.

Finalmente el proceso numérico se reduce a la resolución de un sistema de ecuaciones lineales en estática y un sistema de ecuaciones diferenciales en dinámica.

La posibilidad de ambos puntos de vista, fuerzas y movimientos, ya fue puesta de manifiesto en 1828 por el fundador del cálculo de estructuras Louis Marie Henri Navier <sup>(3,4)</sup>. Sin embargo, aunque el enfoque con las variables en movimientos es el más natural desde el punto de vista físico, el número de ecuaciones a resolver por métodos manuales en el tipo de estructuras habitual en el S. XIX, lo hacía impracticable.

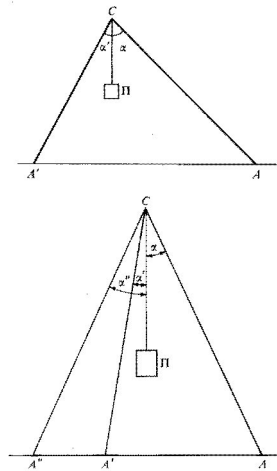
Por ello Navier y sus sucesores se inclinaron al cálculo con el método de la flexibilidad y así surgen las tres líneas de trabajo que iluminarán a los ingenieros españoles hasta 1930: métodos basados en el principio de los trabajos virtuales, Mohr <sup>(5)</sup>, la estática gráfica de Culmann <sup>(6)</sup> y los métodos energéticos propuestos por Castigliano <sup>(7)</sup> y popularizados por Müller-Breslau <sup>(8)</sup>.

El método de la rigidez no había sido olvidado por los más científicos: así en 1862, Clebsch <sup>(9)</sup> en su magistral obra sobre elasticidad añade al final un último artículo relativo a estructuras articuladas en el espacio donde aparece ya la matriz de rigidez, incluso con la notación de doble subíndice referida a los grados de libertad de los nudos, lo que, como subproducto, le permite hacer notar la simetría y, por tanto, la reciprocidad dos años antes que Maxwell enunciase el teorema de reciprocidad.

Ni Mohr ni Culmann llegaron a aceptar que el método de Castigliano aportase alguna novedad y pronto Crotti <sup>(10)</sup> y Engesser <sup>(11)</sup> mostraron que era errónea la apreciación de aquél sobre la naturaleza de la energía que se deriva para obtener los desplazamientos. De hecho, energía elástica y energía complementaria aparecen relacionadas por una transformación de Legendre que posibilita la canonización del planteamiento en forma semejante a la desarrollada por Hamilton. Esta línea fue seguida por Max Born y Hellinger que en 1914 estableció el Principio Canónico de la Energía Potencial, base de los desarrollos posteriores de Reissner, Veubeke



Navier (1785-1836)



Leçons (1826)



Clebsch (1833-1872)

Figura 1

y Washizu. Ello no impide reconocer que el Principio de los trabajos virtuales es la base de todos los principios variacionales y que, a pesar de los ataques de Müller-Breslau, Mohr estaba en lo cierto.

En 1877 aparece la primera edición de la teoría del sonido de Lord Rayleigh<sup>(12)</sup>, que todavía se puede leer con aprovechamiento, en la que se ponen las bases del método que, desarrollado por Ritz<sup>(13)</sup> y popularizado por Timoshenko<sup>(14)</sup> en sus aplicaciones ingenieriles, ha dado lugar a los mejores planteamientos de la teoría de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, análisis funcional y métodos proyectivos de aproximación. Ritz preparó su investigación en 1904 para optar al premio Vaillant de la Academie des Sciences de Paris. Ninguno de los "rapporteurs" (Pointcaré, Picard y Painlevé) encontraron nada destacable en la misma. Años después, en 1909, en Gotinga, tras comprobar que tanto el mundo científico como el ingenieril habían comprendido las posibilidades del método, Pointcaré pidió públicamente excusas a Ritz.

También a principios de siglo (1909) se produce la interesante interpretación de la elasticidad por los hermanos Cosserat<sup>(15)</sup> que, en el equilibrio del tetraedro elemental además del vector tensión introducen el momento por unidad de superficie dando lugar a la teoría de los medios micropolares.

A partir de este momento son continuos los movimientos liderados por la escuela rusa (Galerkin, Sobolev, Mushkelsvili, Novozhilov) que conducen a una clarificación del enfoque matemático de la elasticidad, así como aportaciones tanto matemáticas (Klein, Hilbert, Volterra, Almansi, Jaumann, Synge, Love, Trefftz o Biot), como físicas

(Reiner<sup>(16)</sup>, Rivlin, Prandtl, Flügge, Koiter, Griffith, Drucker, Prager).

En 1914 Bendixen<sup>(17)</sup> publica "El Método de las Alfa-ecuaciones para el Cálculo de Pórticos" donde pone claramente de manifiesto que el estado de una pieza es función de los giros extremos y los desplazamientos relativos entre los mismos.

En 1915 Wilson y Maney<sup>(18)</sup> de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign publicaron, aparentemente sin conocer la obra anterior, una idea semejante. Son las famosas ecuaciones del método llamado "Slope Deflection" que ayudaron a desarrollar en los proyectistas el interés prioritario por los movimientos.

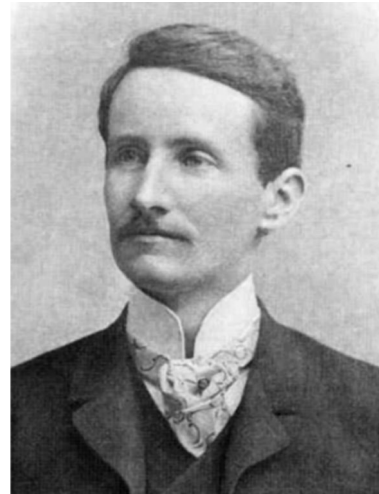
Poco después (1926) Ostenfeld<sup>(19)</sup> escribe "Die Deformations Methode" donde se vuelve a poner sobre el tapete la importancia del método de la rigidez aumentada por la necesidad de calcular, por ejemplo, las estructuras reticuladas de hormigón que entonces estaban en pleno apogeo.

Pero el problema sigue siendo el mismo: cómo resolver los enormes sistemas de ecuaciones con las modestas máquinas de calcular disponibles.

Por eso se produce el gran impacto cuando Hardy Cross<sup>(20)</sup> publica "Analysis of Continuous Frames by Distributing Fixed End Moments". El procedimiento es claramente una superposición de estados de giro y desplazamiento, pero el tratamiento operativo se hace repartiendo momentos y ello oscurece su carácter de método de rigidez con resolución iterativa del sistema de ecuaciones, aunque favorece su manejo por el ingeniero que ve inmediatamente el



**J. W. S. Lord Rayleigh (1842-1919)**



**W. Ritz (1878-1909)**

*Figura 2*



**B. Galerkin (1871-1945)**



**I. G. Bubnov (1872-1919)**



**W. Prager (1903-1980)**

*Figura 3*

sentido físico del reparto y la transmisión de momentos. Un artículo de 8 páginas motivó 144 páginas de discusión. Es decir, el método desconcertó a los expertos. Por ejemplo, Timoshenko, incapaz de reconocer nada bueno que viniera de USA, sólo incluye un renglón sobre Cross en su "Historia de la Resistencia de Materiales" <sup>(21)</sup> y ello tras una página dedicada a un presunto antecesor, Calisev, que, según él, en 1923 había propuesto un método iterativo en un artículo, por cierto escrito en Croata. Peor todavía son sus comentarios en sus memorias "As I remember" <sup>(22)</sup> donde tras una frase oscurísima sobre un plagiaro libera, sin ninguna convicción, a Cross de esa acusación:

"En cierto semestre se presentó un informe sobre el método de Hardy Cross para calcular estructuras reticuladas. Nunca antes había oído hablar de Hardy Cross, pero inmedia-

tamente me di cuenta que ese método era muy parecido al de Calisev, que yo conocía bien, pues había sido publicado casi diez años antes en Zagreb. Aquí no había plagio, simplemente algunas dudas sobre la precedencia. El método de Hardy Cross tuvo amplio uso en América, demasiado podría decirse.

Desde luego había que enseñar a un estudiante cómo usarlo, pero eso no basta. Debería comprender por qué funciona. Debería saber que consiste en la resolución mediante aproximaciones sucesivas de un sistema lineal de ecuaciones. Pero en América las escuelas de aquel tiempo enseñaban "cómo" calcular pero no "por qué" funciona el cálculo."

Cuando tanto se habla de los inconvenientes del lema "publicar o perecer" convendría



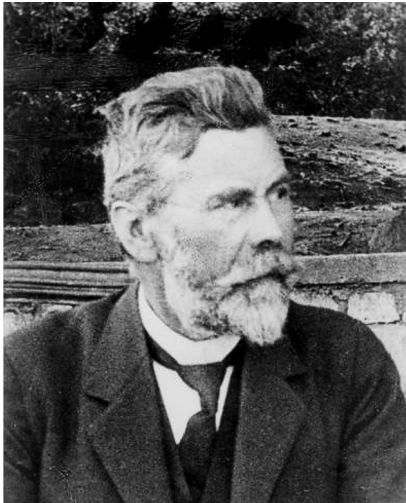
**A. Ostfeld (1866-1931)****H. Cross (1885-1959)**

Figura 4

recordar que, gracias a él, se dispone del método de Cross. Éste, formado en M.I.T y Harvard, era un gran profesor que ganó experiencia como tal durante 7 años en Brown y posteriormente alcanzó la cátedra en Urbana-Champaign en 1921 (cuando Fernández Casado, con 16 años, ya estaba en segundo de carrera). Allí, su fama de gran profesor, le ganó la antipatía del Director de su Departamento que pretendió despedirlo con la excusa de que no publicaba. La respuesta de Cross fue un artículo sobre el Método de la columna y el previamente citado que recibió los comentarios de 38 autores y fue, desde el primer momento, saludado como una piedra miliar aunque, como vimos mas arriba, algunos autores no comprendían el ruido organizado a su alrededor. No deja de ser curioso que se sigan publicando (en el s. XXI) artículos sobre el carácter de método de la rigidez y sobre su convergencia, visto como un esquema iterativo tipo Jacobi<sup>(23)</sup>.

### 3. CARLOS FERNÁNDEZ CASADO Y SU ENTORNO

Fernández Casado tuvo que competir en un ambiente donde existían grandes teóricos: Eduardo Torroja, Esteban Terradas, Velasco de Pando, Valdés Patac, Arangoá, Federico Goded, García Ortega, etc., todos ellos autores de publicaciones de gran categoría sobre Elasticidad y Cálculo de Estructuras.

Para comprender el entorno en que se formó y trabajó conviene repasar la línea tomada en la Escuela de Caminos con la Elasticidad y Resistencia de Materiales desde su fundación. A este respecto cabe indicar que, a falta de aportaciones originales, siempre se mantuvo un importante contacto con las

publicaciones extranjeras lo que permitió a la profesión mantenerse al tanto de lo que sucedía. Así Saavedra autor de varias obras combina su interés por los planteamientos teóricos de Poncelet y Navier con los trascendentales ensayos de Fairbairn, cuyo libro sobre aplicaciones del hierro fundido y forjado a las construcciones fue traducido y publicado casi simultáneamente con la versión inglesa.

Además en época muy temprana escribe el que probablemente sea el primer libro en español de Resistencia de Materiales<sup>(24)</sup> absolutamente influido por la Escuela francesa como demuestra también su extraordinaria obra sobre puentes colgados.

Los años de formación estructural de Fernández Casado están marcados por la presencia, junto al ecléctico Mendizábal, de dos personalidades tan opuestas y a la vez complementarias como Zafra y Ribera.

En relación con el contenido de este artículo interesa más la figura de Zafra como sabio profesor y autor, aparte el primer tratado en español de hormigón armado, de uno de los mejores libros de cálculo de estructuras que se ha publicado en nuestro país<sup>(25)</sup>. En él da pruebas de dominar las obras de la escuela alemana y, quizá por influencia de Müller-Breslau, escoge el método de Castigliano basándose en muy discutibles apreciaciones: "...A nuestro juicio el teorema de Castigliano, más amplio en concepción, menos artificioso que el de Mohr...", aunque inmediatamente reconoce que "... en la práctica usaremos indiferentemente de uno o de otro...". La puesta al día del libro se pone de manifiesto cuando, al estudiar los problemas de estabilidad elástica, se hace referencia a los trabajos de Timoshenko publicados tan sólo cinco



CÁLCULO  
DE  
ESTRUCTURAS

POR  
JUAN MANUEL DE ZAFRA

INGENIERO JEFE DEL CUERPO NACIONAL DE  
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS  
PROFESOR DE «ROMBOSIN ARRIANO» Y DE «PUERTOS»  
EN LA ESCUELA ESPECIAL DEL CUERPO

II

MADEID  
TAMAYO Y MARTÍN S. R. L.  
TELÉFONO 41-06  
1910

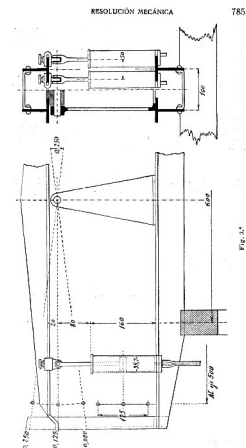


Figura 5

años antes y por la inclusión en apéndice de una máquina de resolución de sistemas de ecuaciones, proyectada por él mismo y construida en el laboratorio de Torres Quevedo, con la finalidad de estudiar estructuras “trapeciales”.

Fernández Casado ingresó en la Escuela de Caminos con 14 años en 1919, un año después que Ribera se incorporase como profesor y justo el año en que Zafra leyó su discurso de ingreso en la Academia de Ciencias <sup>(26)</sup>, donde, de forma taxativa, planteaba su ideario “...el progreso de la Construcción exige cada día mas imperiosamente el progreso de la Mecánica aplicada...”. Es de imaginar el impacto que este hecho y el enorme prestigio de que Zafra gozaba en la Escuela causarían en él y por eso no es de extrañar la admiración que siempre manifestó por su obra, incluso a pesar de criticar la limitación de sus métodos “...(Zafra) ha sido injustamente relegado al olvido...” hace notar en su artículo en ROP de 1958 <sup>(1)</sup> que corresponde, por cierto, al contenido de su primera clase como profesor en la Escuela, el 9 de enero de 1958.

En este mismo artículo al recordar las herramientas de cálculo que le fueron enseñadas en la Escuela, Fernández Casado no puede reprimir su disgusto “No disponíamos de métodos de cálculo eficaces para las estructuras más frecuentes y otras como el de la viga de varios tramos...estaban taradas por el sello de una inútil crueldad”. De esa misma opinión era otro ilustre profesor, López Bosch, que habiendo nacido en la misma fecha que Fernández Casado, y debido a la precocidad de éste, terminó tres años después, quien aseguraba que el responsable de la asignatura utilizaba en los exámenes la viga de tres tramos para ajustar cuentas pendientes con los alumnos

que no hubiesen respetado escrupulosamente la “severa disciplina” de la que siempre hizo gala el ideario de la Escuela.

Fernández Casado había nacido en 1905, año intermedio entre la entrega de los premios Nobel a Echegaray (1904) y Cajal (1906).

Hizo su carrera entre 1919 y 1924 (paréntesis en el que Benavente (1922) recibió otro Nobel) terminando con la calificación de “Muy bueno”. Eduardo Torroja había finalizado un año antes, de modo que ambos debieron tratarse mientras eran alumnos.

Sus años de formación coinciden con una etapa de tremenda inestabilidad política, empezando con las huelgas del 19, el asesinato de Eduardo Dato, el Desastre de Annual y la Dictadura de Primo de Rivera. También es curioso hacer notar que esa etapa está comprendida entre las muertes de Mohr (1918) y Müller-Breslau (1925).

Como es sabido tuvo una estancia en París donde consiguió el título de ingeniero de Radio y finalizó en 1924 la carrera de telecomunicación.

Quizá esa etapa en París favoreció su contacto con las últimas publicaciones técnicas y comenzó a estudiar profundamente las herramientas de cálculo y a sistematizarlas para su uso en las publicaciones con las que luego intentaba desarrollar una “Teoría general de estructuras” (Figura 10).

La Revista de Obras Públicas recoge publicaciones suyas desde 1927; hasta 1930 estuvieron dedicadas a radiofaros. Él mismo cuenta que en ese año descubrió el método Slope-deflection de Bendixen,

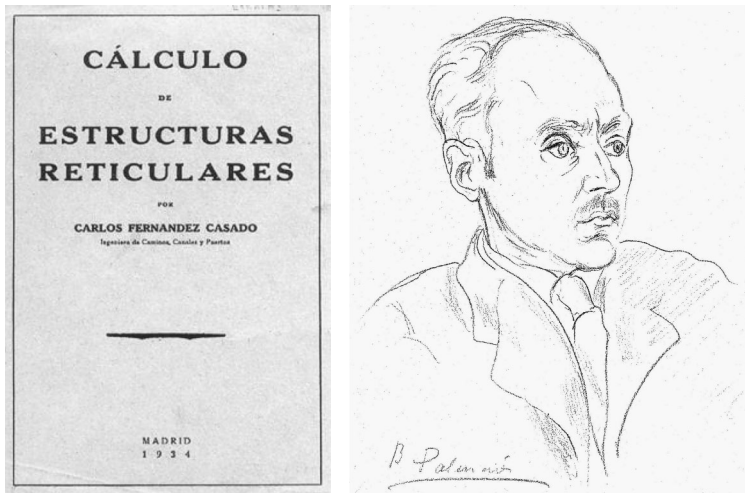


Figura 6

Wilson y Maney y ello le facilitó apreciar la novedad que aportaba la memoria de 1930 de Cross.

El impacto fue tremendo. Encontró justamente lo que andaba buscando: un método general, sencillo y riguroso que le ayudó a comprender la importancia de los movimientos de la estructura y que facilitaba la interpretación de las operaciones de cálculo como efectos físicos.

Simultáneamente comenzó a escribir sobre la teoría del arco que, en artículos desde 1931 a 1935, servirían de base a su espléndido tratado posterior "Cálculo de arcos" (1955)<sup>(27)</sup>.

En 1932 figuró oficialmente el método de Cross en la memoria de cálculo de uno de sus proyectos, y en 1934 incluye su descripción en sus artículos sobre "Puentes de altura estricta"<sup>(28)</sup>. El mismo año, con 29 de edad, publica la primera edición de su obra maestra "Cálculo de estructuras reticulares"<sup>(29)</sup>, posiblemente el primer libro europeo sobre el tema.

Fernández Troyano<sup>(30)</sup> hace notar que fue libro de texto en muchísimas escuelas de ingeniería de todo el mundo y que "...paradójicamente en la Escuela (de Madrid) siempre se ignoró...". Es una observación parcialmente injusta. Todas las generaciones desde entonces lo han venido estudiando a pesar de no ser de uso obligatorio (tampoco lo era las obras de Timoshenko y, como ellas, "el Fernández Casado" estaba en la mesa de todos los estudiantes de ingeniería y arquitectura).

El libro muestra la profundidad de la comprensión del método y sus referencias y críticas a otros procedimientos, el nivel de

conocimientos del autor. Puede que a los aficionados al seco esquema matemático de Proposición-Lema-Teorema-Escolio, la forma de escritura de Fernández Casado les parezca tediosa. Pero deberán reconocer que el autor es brillante a fuer de didáctico.

Su metodología es la misma que luego repetirá en otros libros: arranque desde los conceptos básicos, estudio de la pieza aislada con diferentes condiciones de contorno y sometida a la amplia variedad de acciones propia de los proyectos reales, estructuras simples bien desmenuzadas y planteamiento final del esquema operativo. Este último y definitivo detalle era, a su juicio la clave del éxito "...el esquema de cálculo es siempre el mismo, lo cual permite al ingeniero o arquitecto que proyecta emplear el mínimo esfuerzo en prepararlo y a los auxiliares que calculan hacerlo con el menor esfuerzo utilizando experiencias anteriores...".

Igualmente didáctica es la forma de presentación: hojas impares dedicadas a texto y hojas pares a figuras y fórmulas compuestas con una extraordinaria calidad de dibujo y tipografía.

La parte final del libro, y no la menos apreciada, es una colección de ejemplos reales que abarcan tanto estructuras planas como espaciales. Este hecho daba al libro un alcance práctico que concordaba con la idea del autor: "... El objetivo de los ingenieros es construir....".

Él se quejaba<sup>(1)</sup> de que Zaytzeff le había copiado, sin pedir permiso, 80 páginas de su libro, entre ellas la viga Vierendeel. En el reciente libro de Eaton<sup>(31)</sup> sobre Cross se habla de estas páginas de Zaytzeff y de lo que le gustó a Cross la resolución de la viga Vierendeel. Como una demostración más

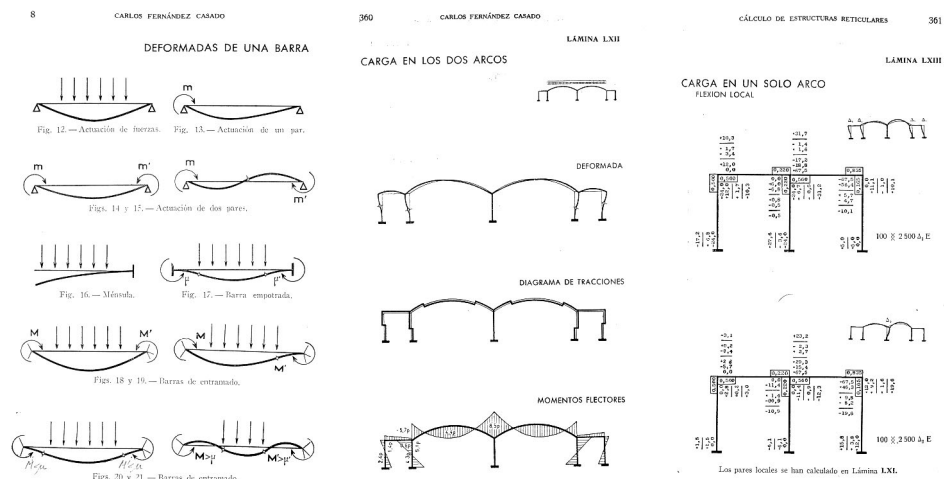


Figura 7

de la importancia de publicar en inglés, no hay ninguna referencia en este libro reciente a Fernández Casado. El mismo esquema metodológico es repetido en todas sus obras. En el "Cálculo de Arcos" (27) y sobre todo en el de "Estructuras de edificios" (32) (también de 1955), donde se remarca el aspecto práctico mediante apéndices de tablas y formularios que lo hacían un instrumento de ayuda imprescindible para todos los que se iniciaban en el proyecto de estructuras ya que tenían un uso múltiple: recuerdo de conceptos, tabulaciones de apoyo y soluciones prácticas de detalles de obras reales como el arco del Estadio de San Mamés. Con sus publicaciones Fernández Casado extendió su magisterio fuera de las paredes de la Escuela de Caminos e incrementó su prestigio ante toda la ingeniería.

El método de Cross dejó tan desconcertados a los viejos maestros españoles como el de Castigliano había dejado a Mohr y Culmann. Así en el capítulo VII de la tercera edición de su Mecánica Elástica (33), Peña (que jugó en la postguerra un desairado papel en relación con Fernández Casado) escribe "Si ahora volvemos la vista al capítulo V de esta obra ¿no es todo esto en cuanto a concepto y desarrollo, contenido en aquél capítulo? Pero con la diferencia de ser mucho más claro y de mayor facilidad didáctica aquél, además de que el proceso operatorio se hace más sistemático y de más diáfana representación gráfica. ¿Dónde está pues la originalidad del método de Cross?" Opinión que contrasta con el entusiasta seguimiento del método por parte de toda la profesión. Peña, por cierto, tampoco era partidario del acartelamiento de las vigas (también tratado por Fernández Casado en sus puente de altura estricta) que consideraba una extravagancia.

En una demostración tremenda de energía el joven Fernández Casado saca tiempo para

hacer proyectos, desarrollar métodos, escribir libros y artículos y estudiar. Son notables en estos últimos aspectos sus desarrollos de fotoelasticidad que le preparan para otra de sus obras más interesantes: la "Resistencia" (2). Ésta fue compuesta durante los terribles años de guerra y post guerra quizá como escapatoria intelectual a la dureza de las circunstancias reales. (Nowacki, el presidente de la Academia Polaca de Ciencias, confesaba que sus estudios de elasticidad polar y dinámica de estructuras nacieron de su esfuerzo por superar las condiciones de vida en el campo de concentración donde los alemanes le tuvieron confinado durante la Segunda Guerra Mundial). Desde luego el nombre de la obra y el color de su encuadernación fue cuidadosamente escogido para manifestar su voluntad de reaccionar "cum ira et cum studio" a la discriminación a la que fue sometido. El enorme esfuerzo que deseaba afrontar puede apreciarse (Figura 10) en el plan de trabajo que figuraba en los encartes finales de la obra.

La "Resistencia" (1941) es una obra interesante, lo que no sorprende viniendo de su autor. Ofrece una visión original (teoría y realidad física) de la mecánica de los medios continuos y demuestra un conocimiento del estado del arte. Hay 165 referencias, todas ellas puestas al día. La más antigua es la de Zafra (1915) y colocarlo como primer autor debe considerarse como un homenaje al viejo maestro.

Allí están los clásicos como Timoshenko o Terzaghi pero también Nadai, Love, Freudenthal, Brillouin, Orowan y Volterra.

Como en otros casos, la lectura de la obra despierta la sensación de que el autor está escribiendo para sí mismo, intentando crearse una visión general del campo en el que trabaja y un esquema en el que quepan los



ETAPA PRIMERA

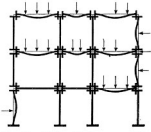


Fig. 133. — Nudos absolutamente rígidos.

La dificultad del cálculo de un entramado, tal como se plantea en el método analítico expuesto, está en la resolución del sistema de ecuaciones lineales, y era (\*) casi insuperable cuando el número de éstas resultaba algo elevado.

El método de CROSS elimina esta dificultad, y aunque a primera vista pudiera interpretarse como una resolución del sistema por aproximaciones sucesivas, no es así; por el contrario, esta coincidencia es puramente final y a posteriori, pues en este método la transposición de lo físico a lo matemático va haciéndose paso a paso; las dificultades del problema se resuelven paralelamente en ambos campos, con lo cual no llegamos a una sustitución total del uno por el otro, haciendo desmoronarse en el segundo el caudal íntegro de las dificultades del problema.

Se parte de una estructura virtual con nudos absolutamente rígidos (es decir, que no permiten giros ni desplazamientos de las extremidades de las barras) y se llega a la estructura real, desahuciendo por etapas esta rigidez, permitiendo sucesivamente los giros y los desplazamientos.

Las situaciones que se consideran las exponemos a continuación en cuatro etapas sucesivas (\*\*).

Como hemos indicado ya en la resolución del entramado por el método analítico, el problema fundamental consiste en calcular los momentos de empotramiento en todas sus barras. Los demás elementos de cálculo se deducen de ellos de un modo casi automático, particularmente si se tiene tabulados los elementos más típicos.

Etapas sucesivas (Fig. 133). — Nudos absolutamente rígidos. Las barras están completamente inmovilizadas en sus dos extremos. Por consiguiente, la determinación de los pares de empotramiento, que son los de empotramiento perfecto, es problema que ya hemos estudiado anteriormente (págs. 21 a 27, apéndices 1.º, 2.º y 3.º, y anexo 2.º).

(\*) Como veremos más adelante, los computadores electrónicos han cambiado radicalmente el problema.  
(\*\*) En gran número de casos son necesarias solamente las dos primeras etapas.

Figura 8

desarrollos modernos de que estaba siendo testigo. Así, el capítulo III "Estudio del fenómeno de la rotura" es especialmente llamativo por la complitud de enfoques y materiales y lo mismo sucede con el siguiente sobre la estructura interna, donde se refleja la teoría de Griffith que luego ha dado lugar a la Mecánica de la fractura.

Es interesantísimo también el apéndice sobre fotoelasticidad que explica su interés posterior por los métodos experimentales sobre ensayos en modelos que llevaría a acabo en el laboratorio de Huarte.

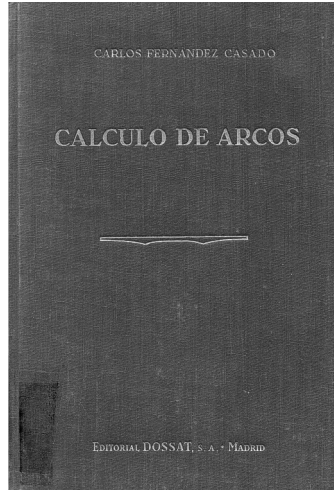
Típica del autor es la incorporación de fotografías de arquitectura clásica o grabados de Leonardo (Figura 12), congruente con una frase del prólogo: "En toda estructura hay una pretensión de eternidad y ponemos en ella algo de nuestra voluntad de trascender más allá del presente."

Desgraciadamente la obra no tuvo mucha difusión a pesar de ser un exponente del gran nivel que llegó a tener una amplia gama de ingenieros como los citados al principio del apartado y que hace más difícil entender la interrupción que en el estudio de temas como plasticidad teórica se produjo en nuestro país.

Para finalizar este apartado se recoge una obra, que él posiblemente consideraba menor, y que fue igualmente una ayuda para todos los que empezaban a proyectar. Su "Estructuras de edificios" (34) (1948) es una muestra más de su filosofía: "Dada la envergadura de la ingeniería actual no puede construirse obra alguna sin proyecto previo, por lo cual resulta que la labor primaria y básica del ingeniero es proyectar" (1).

Y en este libro puso todo lo necesario para ese fin: las normas, los métodos de cálculo,

IV  
MÉTODO DE CROSS



Arco en voladizo.

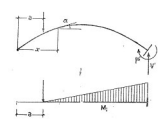


Fig. 22. — Actuación de fuerzas verticales.  
 $V + \Sigma F = 0$   
 $V' + \Sigma F(l - a) = 0$  (18)

$M = \Sigma F(x - a)$   
 $N = \Sigma F \cos \alpha$   
 $T = \Sigma F \sin \alpha$  (19)

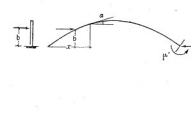


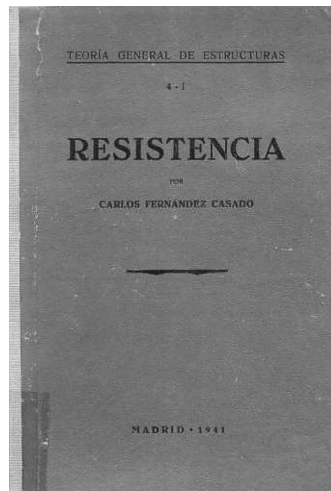
Fig. 23. — Actuación de fuerzas horizontales.  
 $H' + \Sigma F = 0$   
 $H + \Sigma F b = 0$  (20)

$M = \Sigma F(y - b)$   
 $N = \Sigma F \cos \alpha$   
 $T = \Sigma F \sin \alpha$  (21)



Fig. 24. — Fuerza horizontal en extremidad.  
 $H + H' = 0$   
 $M = H y$  (22)

Figura 9



En preparación, del mismo autor:

TEORÍA GENERAL DE ESTRUCTURAS

**PRIMERA PARTE. — Fundamentos.**

1. Materiales.
2. Morfología.
3. Estática.
4. Resistencia y elasticidad.
5. Métodos de cálculo.
6. Experiencias y reglamentos.

**SEGUNDA PARTE. — Estructuras puras.**

7. Cálculo de vigas y columnas.
8. Cálculo de arcos.
9. Cálculo de estructuras reticulares.
10. Cálculo de losas planas.
11. Cálculo de estructuras superficiales.
12. Cálculo de muros.
13. Cálculo de estructuras complejas.

**TERCERA PARTE. — Estructuras funcionalizadas.**

14. Estructuras de edificación.
15. Estructuras industriales.
16. Puentes de tramo recto.
17. Puentes de arco.
18. Estructuras hidráulicas.
19. Estructuras marinas.
20. Infraestructuras.

Publicados:  
CÁLCULO DE ESTRUCTURAS RETICULARES (2.ª edic.)  
RESISTENCIA

En prensa:  
PUENTES DE TRAMO RECTO DE HORMIGÓN ARMADO

Figura 10

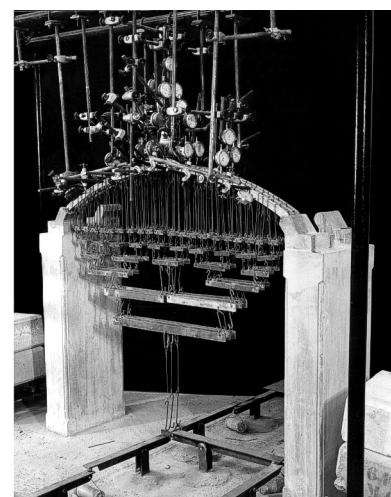
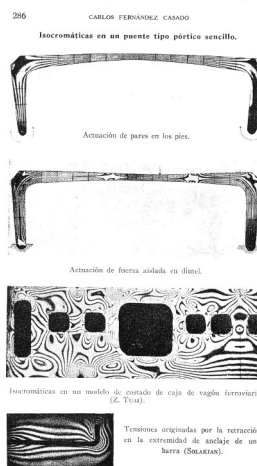


Figura 11

el prontuario y, sobre todo, los ejemplos reales. Allí está el estadio de Chamartín, o el edificio del Ministerio del Aire, o edificios normales. Están sus cálculos y sus detalles constructivos y eso, a los que no tenían maes-

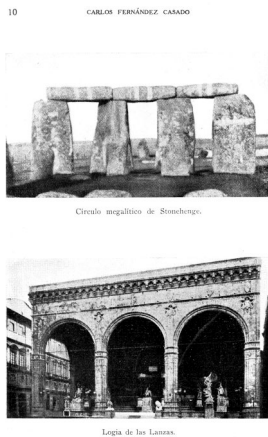


Figura 12

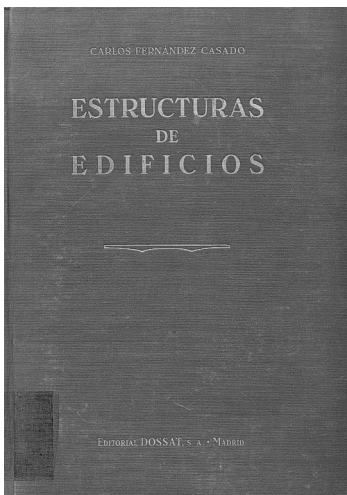


Figura 13

Si ensanchamos el campo de investigación para completar el cuadro de solicitaciones simples, tenemos que ir a buscar la *tracción* en algo que suponga movimiento; no basta con esfuerzo; el concepto pide algo más; nos satisface mejor un par, pero precisamente por lo que éste es causa de un giro.

La idea de la *tracción* está más próxima de la rotura que de la resistencia. Fisiológicamente, supone descompartamiento, pero la que está definitivamente del lado de aquella es la *cortadura* (última de las solicitaciones simples. Se imaginan inmediatamente las cuchillas de la máquina que van a producir el cizallamiento).

Resumiendo lo anterior, podemos ordenar las solicitaciones simples en dos grupos; las que entrañan idea de resistencia: *compresión*, *flexión* y *tracción*, y las que sugieren rotura: *tracción* y *cortadura*, aunque en realidad la *tracción* está en el tránsito de ambos grupos.

Volviendo al punto de vista fisiológico, la *compresión* y *flexión* suponen esfuerzo resistido por el organismo; en cambio, *cortadura* y *tracción* conducen a *fractura*; la *tracción* es tensión en sentido estricto, y estas tres últimas pueden llevarse a extremos de martirio con representación hagiográfica.

Las solicitaciones simples se combinan entre sí, dando lugar a las solicitaciones compuestas, las que también pueden encontrarse en formas naturales. Así, en las del primer grupo obtenemos, desde muy antiguo, el arco y el pilar con *flexión* y *compresión*.

Combinaciones de solicitaciones de ambos grupos se presentan en casi todos los elementos estructurales, a poco que se analice su modo de resistir, pero no pierden su intencionalidad diferente; las del segundo grupo no pueden abandonarse su dirección hacia la rotura, y aparecen siempre como desfavorables, secundarias y perjudiciales. Se procura evitarlas y cuesta mucho trabajo intuir las dentro de la integración estática de la estructura.

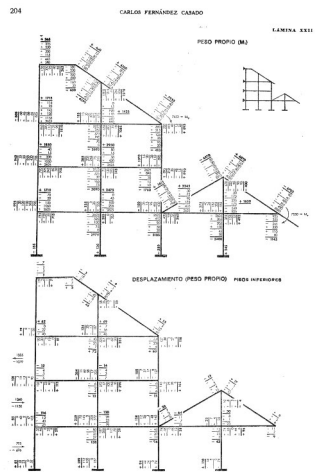
Mirando los fenómenos desde la deformación, única realidad directamente observable, podemos definirlos por el modo como se mueven relativamente las secciones inmediatas, obteniendo:

*Compresión y tracción*: traslación de las secciones perpendicularmente a sí mismas.

*Cortadura*: deslizamiento de la sección en su plano.

*Flexión*: giro de la sección en su plano.

Abstrayendo el fenómeno a través de nociones mecánicas, aparecen las distintas solicitaciones como las combinaciones posibles



tros directos a quien consultar, les permitió arrancar en su vida profesional.

#### 4. EL MAGISTERIO DE FERNÁNDEZ CASADO

Aunque comenzó como profesor en 1958, Fernández Casado ganó la cátedra de puentes en la Escuela de Caminos en 1961 y se jubiló en 1975.

Diecisiete promociones pasaron por sus manos y tuvieron la oportunidad de tener su magisterio directo. Su planteamiento de las clases era desconcertante y aunque su calidad, muy superior a la media, era evidente, su sistema era borroso.

Ahora bien, a lo largo de los años se experimenta una evolución de la opinión que se tiene de los profesores. El alumno, presionado por el corto plazo, sólo pide claridad y sistematización en las explicaciones de clase y,

desde luego, reglas claras respecto al tipo de examen. Aunque Fernández Casado cumplía esta última condición, su actitud en la pizarra no tenía nada que ver con su mecanismo “prusiano” de exposición en los libros.

Recientemente Housner<sup>(35)</sup>, el popularizador del espectro de respuesta sísmica, ha vertido unas opiniones sobre dos de sus profesores Timoshenko y Von Karman, que reflejan sentimientos semejantes a los indicados.

Housner dice...” (Las clases de Timoshenko) eran muy interesantes y trataba los problemas con mucho más rigor que el resto de los profesores de Ann Arbor. Después, cuando estuve en Caltech, recibí un par de cursos de Theodore Von Kármán, y encontré muy chocante la diferencia entre ambos. Timoshenko era lo que podríamos llamar un “artista del encerado”. En clase todo lo que decía lo iba poniendo en la pizarra. Todo salía perfecto y limpio y, justo cuando acababa la hora él estaba llegando al final del encerado. En contraste todo lo que ponía Von Kármán en la pizarra estaba absolutamente desorganizado. Más tarde comprendí que con su enfoque Timoshenko nos escondía las dificultades: todo lo que presentaba parecía sencillísimo. Al revés, Von Kármán ponía el énfasis en las dificultades. Intelectualmente me influyó mucho más Von Kármán que nos enseñó, sobre todo, a pensar sobre los temas.”

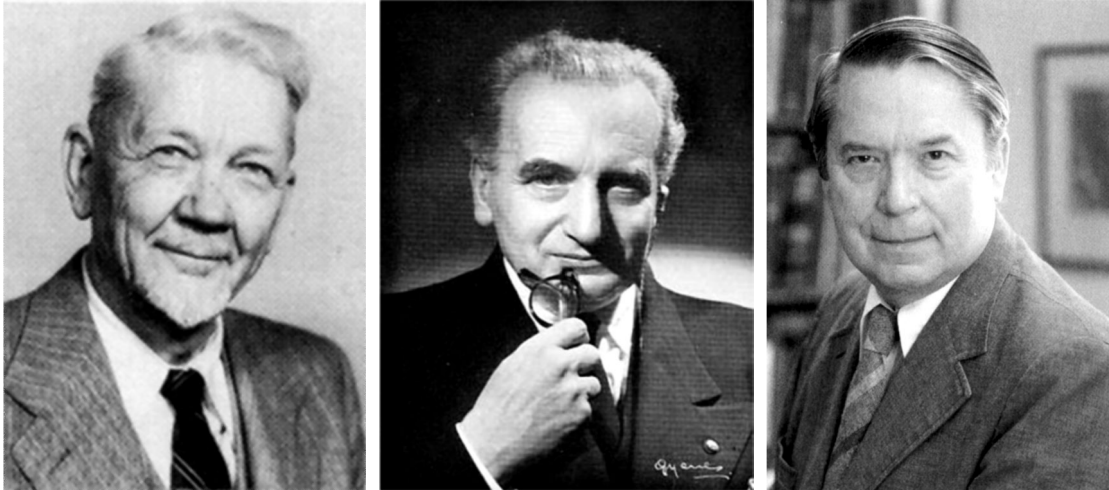
Creemos que eso es precisamente lo que se puede decir del enfoque que daba Fernández Casado a sus clases.

Desde el punto de vista del resultado de su magisterio directo se pueden citar los artículos publicados por Prieto Moresi<sup>(36)</sup> y, desde luego, la monografía nº 243 del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento sobre “Cálculo del pretensado en puentes”<sup>(37)</sup> publicada conjuntamente con su hijo Leonardo en 1964 que él mismo presentaba como su “primer éxito pedagógico”.

Además, el valor intrínseco de la monografía se ve aumentado por la inclusión en el prólogo de sus opiniones sobre los métodos de cálculo clásico y en rotura.

También es digna de mención en esta publicación una frase que explica la motivación para escribir sus libros. “Tengo que confesar mi animadversión contra el cálculo, la cual me ha llevado, sin que esto tenga nada de paradójico, a escribir libros sobre cálculo de determinados tipos de estructuras e incluso formularios para la ordenación del proyecto de las mismas. De este modo consigo tener resueltos, de un modo definitivo, problemas





S. Timoshenko (1878-1972)

Von Kármán (1881-1963)

G. Housner (1910-)

Figura 14

que se me plantearían cada vez que me enfrentase con una nueva estructura”

Gracias a ese espíritu toda la profesión pudo disfrutar del magisterio indirecto de Fernández Casado y no sólo estudiando en su obra teórica sino admirando su obra construida.

### 5. VIRTUDES A EMULAR

Aunque el artículo debería limitarse a exponer solamente lo relacionado con su capacidad técnica, es imposible dejar de expresar admiración hacia un hombre cultivado que hacía gala de su educación y amabilidad y que con la calidez de su acogida conseguía transmitir a los que le trataban la sensación de proximidad. Desde el punto de vista teórico hay que destacar su erudición y puesta al día, a pesar de vivir en una época difícil donde conseguir publicaciones extranjeras necesitaba un esfuerzo desproporcionado. Tenía también una sensibilidad especial para detectar ideas con futuro: el método de Cross por supuesto, pero también el pretensado o las estructuras atirantadas.

Otro aspecto notable es su capacidad de trabajo. Sería sorprendente hacer un cuadro cronológico en que se observase la distribución de su energía en temas profesionales, intelectuales o personales. Ello es debido probablemente a su espíritu de superación pero también al entrenamiento en una Escuela donde vivió la etapa crítica de los 14 a los 19 años en el ambiente de “constancia, trabajo asiduo y severa disciplina” que, según Carderera, caracterizaba la Institución.

Todo ello acompañado por una insaciable curiosidad, como muestran sus escritos

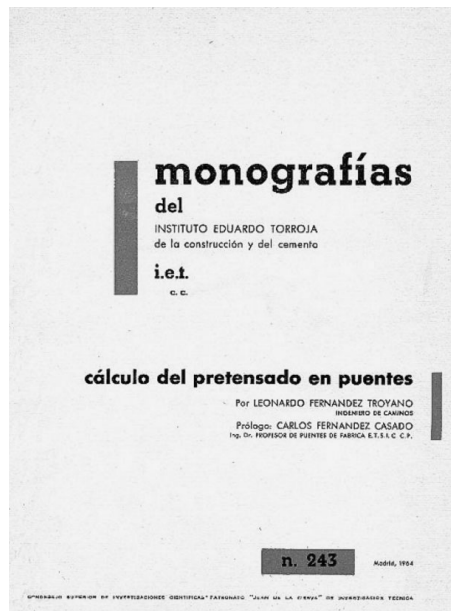


Figura 15

sobre estructuras nuevas o antiguas y su proceso de adquisición de conocimientos que duró toda su vida (terminó Derecho a los 68 años).

Finalmente, de nuevo, su magisterio basado en el análisis profundo y la capacidad expositiva manifestada en sus libros a los que dotaba de un enfoque múltiple, pero estructurado, para motivar a lectores con intereses variados.

### 6. CONCLUSIÓN

En la traducción al español de “Ingenieros y torres de marfil” de Hardy Cross se encuentra un epílogo debido a Bessie A. Stenley que se titula “Éxito imperecedero” y dice:

“Alcanza el éxito aquél que vive con plenitud, ríe con frecuencia y ama intensamente; quien se gana el respeto de personas inteligentes y el cariño de los niños, llena su nicho y

cumple con su cometido; que al abandonar el mundo terrenal deja huella de haberlo mejorado....quien siempre sabe apreciar la belleza del universo y la puede expresar, logra descubrir lo bueno de sus semejantes y ha dado lo mejor de sí mismo; cuya vida

ha sido una inspiración, cuyo recuerdo es una bendición”.

Creemos que no se puede dar una mejor definición del Ingeniero Carlos Fernández Casado.

## REFERENCIAS

- (1) Carlos Fernández Casado: “Construcción, Proyecto y Cálculo. Caracterización profesional del ingeniero”. *Revista de Obras Públicas* (1958).
- (2) Carlos Fernández Casado: “Resistencia”. Madrid, 1941.
- (3) C. L. M. H. Navier: “Resumé des leçons données à l’École des Ponts et Chaussées”. Carilian-Goeury, 1826.
- (4) C. L. M. H. Navier: “Memoire sur les lois d’équilibre et du mouvement des corps solides elastiques”. Bull. Soc. Philomath, 1821.
- (5) O. Mohr: “Beitrag sur Theorie des Bogenfachwerks”. Zeitsch. Des Arch. Und Ing. zu Hannover, 1874
- (6) C. Culmann: “Die graphische Statik”. ETH, 1866.
- (7) C. A. P. Castigliano: “Theorie de l’équilibre des systémes élastiques et ses applications”. Negro, 1879.
- (8) H. F. B. Müller-Breslau: “Die neueren Methoden der Festigkeitslehre und der Statik der Baukonstruktionen”. Baumgartner, 1886.
- (9) A. Clebsch: “Theorie der Elastizitat fester Körper”. Teubner 1862. Traducción francesa de Saint-Venant y Flamant con numerosísimas notas del primero. Dunod 1883.
- (10) F. Crotti: “La teoría dell elasticità”. Hoepli, 1888.
- (11) F. Engesser: “Über statisch ubbestimmte Träger bei beliebigen Formänderungsgesetze”. Zeitschrift des Architekten -und Ingenieur-Vereing zu Hannover, 35, 733, 1889.
- (12) J. W. Strutt (Rayleigh): “The theory of sound”. Cambridge 1877. Reimpresión Dover, 1945.
- (13) W. Ritz: “Über eine neue Methode zur Lösung gewisser Variationsprobleme der mathematischen Physik”. Joun. Für die reine und angewandte Mathematik 135, 1-61, 1908.
- (14) S. P. Timoshenko: “Einige Stabilitätsprob. der Elastizitätstheorie”. Zeitch. Mathem. und Phys, 1910.
- (15) E. Y F. Cosserat: “Theorie des corps deformables”. Hermann. 1909.
- (16) M. Reiner: “Twelve lectures on Theoretical Reology”. Ámsterdam, 1943.
- (17) A. Bendixen: “Die Methode der Alpha-Gleichungen zur Berechnung von Rahmenkonstruktionen”, 1914.
- (18) W.M. Wilson y G.A. Maney. Bulletin 80 Univers. Illinois. Eng. Exp. Station, 1915.
- (19) A. Ostenfeld: “Die Deformations Methode”, 1926.
- (20) Hardy Cross: “Analysis of Continuous Frames by Distributing Fixed End Moments” Proc. ASCE 1930 y Trans ASCE 1932.
- (21) S.P. Timoshenko “History of the strength of materials”. Mc. Graw Hill 1953. Dover, 1983.
- (22) S.P. Timoshenko “As I remember”. Ed. Van Nostrand, 1968.
- (23) K.Y. Volokh: “On the foundations of the Hardy Cross Method” International Journal of Solids and Structures. Volume 39, number 16, August, 2002.
- (24) E. Saavedra: “Lecciones sobre la Resistencia de los Materiales”. Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Segunda edición, 1859.
- (25) J. M. de Zafra: “Cálculo de estructuras”. 2 tomos. Tejada y Martín, 1915.
- (26) J. M. de Zafra: “Los progresos de la Construcción y de la Mecánica Aplicada”. Real Academia de Ciencias, 1919.
- (27) Carlos Fernández Casado: “Cálculo de arcos”. Ed. Dossat, S.A. Madrid, 1955.
- (28) Carlos Fernández Casado: “Colección de puentes de altura estricta”. *Revista de Obras Públicas*. Desde 1932 a 1936.
- (29) Carlos Fernández Casado: “Estructuras reticulares”. Ed. Dossat, SA. Octava edición reformada. Madrid, 1967, 1ª edición de 1934.
- (30) Leonardo Fernández Troyano: “Mi padre” en *Carlos Fernández Casado*. Fundación Esteyco, 1997.
- (31) Leonard K. Eaton: “Hardy Cross. American Engineer”. Univ. Illinois Press. 2006.
- (32) Carlos Fernández Casado: “Estructuras de edificios. Segunda parte: Formularios y Ejemplos”. Ed. Dossat, SA. Madrid 1955.
- (33) A. Peña Boeuf: “Mecánica Elástica”. 2ª edición, 1936.
- (34) Carlos Fernández Casado: “Estructuras de edificios”. Ed. Dossat, S. A. Madrid, 1948.
- (35) S. Scott; G. W. Housner: “George W. Housner” Connections: The EERI Oral History Series. Earthquake Engineering Research Institute.,1997.
- (36) J. E. Prieto Moresi: “Método de la propagación de momentos en las estructuras múltiples”. *Revista de Obras Públicas*, tomo I: 209-214 y 402-408, 1934
- (37) Leonardo Fernández Troyano: “Cálculo pretensado de puentes”. *Monografía Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento*, nº 243. Madrid, 1964

\* \* \*