

El uso de la viga Vierendeel en la obra de Carlos Fernández Casado

The use of the Vierendeel beam in the work of Carlos Fernandez Casado

Josep Maria Pons-Poblet  Universitat Politècnica de Catalunya. Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería. España.
josep.maria.pons@upc.edu (autor de contacto)

Ruth Arribas-Blanco  Universitat Politècnica de València. Departamento de Construcciones Arquitectónicas. España.
rarribas@est.upv.es

RESUMEN

Carlos Fernández Casado, conocido principalmente por sus proyectos de puentes, fue un ingeniero humanista que amplió su formación con estudios de Filosofía y Estética. Uno de los pioneros en el uso del hormigón armado, fue el introductor del método de Cross en España, de forma que se facilitaba el cálculo de las estructuras hiperestáticas. Entre éstas se destaca la tipología Vierendeel, presentada a finales del siglo XIX por Arthur Vierendeel. En este artículo se hace un breve repaso a los diferentes métodos de cálculo existentes previamente a la formulación de Hardy Cross para el análisis global de la misma, para pasar a analizar, a continuación, las aportaciones novedosas realizadas por el ingeniero riojano y la aplicación práctica en las vigas Vierendeel presentes en los talleres de montaje del Instituto Nacional de Técnica Aeronáutica (INTA) en Torrejón de Ardoz.

Palabras clave: Carlos Fernández Casado; Viga Vierendeel; Método de Cross; Viga hiperestática; INTA; simetría; antimetría.

ABSTRACT

Carlos Fernández Casado, known mainly for his bridge projects, was a humanist engineer who expanded his training with studies in Philosophy and Aesthetics. One of the pioneers in the use of reinforced concrete, he was the person who introduced the Cross method in Spain, what made easier the calculation of hyperstatic structures. Among these it is highlighted the Vierendeel typology, presented at the end of the 19th century by Arthur Vierendeel. In this text, a brief review about the different calculation methods that existed prior to Hardy Cross's formulation for its global analysis is made. Then, it's analyzed the innovative contributions made by the engineer from La Rioja and the practical application of the Vierendeel beams in of the assembly workshops of the National Institute of Aeronautical Technology (INTA) in Torrejón de Ardoz.

Keywords: Carlos Fernández Casado; Vierendeel beam; Cross method; Hyperstatic beam; INTA; symmetry, antimetry.

Cómo citar este artículo/Citation: Josep Maria Pons-Poblet, Ruth Arribas-Blanco (2024). El uso de la viga Vierendeel en la obra de Carlos Fernández Casado. Informes de la Construcción, 76 (575): 6484. <https://doi.org/10.3989/ic.6484>

Copyright: © 2024 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 05/05/2023
Aceptado/Accepted: 11/06/2024
Publicado on-line/Published on-line: 23/10/2024

1. INTRODUCCIÓN

A finales del siglo XIX, el ingeniero belga Jules Arthur Vierendeel (1852-1940) presentó una patente de celosía sin líneas diagonales, únicamente dispuesta con elementos verticales y horizontales (figura 1).

“Voilà cinq ans que, pour la première fois, l'idée du système sans diagonales a été émise en public; depuis lors ce système a été l'objet d'une expérience, en 1897, à Tervueren, de trois exécutions dont deux terminées et la troisième en cours, et enfin de diverses publications [...]” (1).

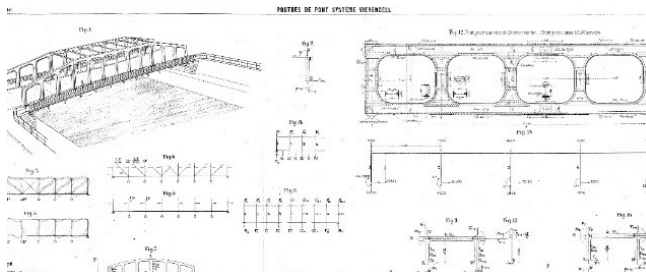


Figura 1. Detalle de la Imagen Poutres de Pont Système Vierendeel. Fuente: Mémoires de la Société des ingénieurs civils (2)

El hecho de prescindir de los elementos diagonales permitía un espacio libre que podía ser aprovechado para ubicar elementos de instalaciones, con finalidades arquitectónicas, o bien permitiendo el paso a su través de personas, por señalar algunas de sus ventajas. De esta nueva tipología (figura 2), el propio A. Vierendeel destacaba:

1. Una ventaja teórica: el cálculo exacto, cuyos resultados se confirman con la experiencia.
2. Una ventaja técnica: los largueros son más resistentes, están mejor conectados en todas sus partes, son menos sensibles a los efectos dinámicos, son menos propensos a la dislocación que los de celosía y, por último, son más duraderos.
3. Una ventaja comercial: economía con igual seguridad, o mayor seguridad con igual coste (3).



Figura 2. Disposición de la viga Vierendeel

Esta tipología específica, pasará a conocerse posteriormente como viga Vierendeel, en honor a D. Arthur. Sin duda supuso un hito en el cálculo estructural acostumbrado a celosías con elementos diagonales (aunque dispuestos en forma variada) en las mismas. Entre otras, las más destacadas eran las vigas Pratt¹, Howe² y Warren³, cada una con características específicas propias. A pesar del uso generalizado de éstas, en la bibliografía de la época se empieza a recoger tanto la tipología Vierendeel como las ventajas que aportaba, aduciendo que “le système Vierendeel est plus économique que le système

en treillis pour les mêmes charges portées, par conséquent il est à préférer dans les constructions modernes” (4).

Un ejemplo contemporáneo, en el que se llevan a la máxima expresión el uso de las vigas Vierendeel, es el edificio *Timmerhuis* de Office for Metropolitan Architecture (OMA architecture), sito en Rotterdam, cuya construcción finalizó en 2015 (figura 3). La consultoría encargada del cálculo de la estructura fue Pieters Bouwtechniek. En esta construcción se hace uso de vigas Vierendeel arriostradas transversalmente con diagonales. De este modo se consigue un comportamiento tridimensional que permite reducir el número de elementos estructurales verticales presentes en la planta baja gracias a los enormes voladizos, así como plantas flexibles que pueden ir cambiando su distribución interior. Es necesario hacer hincapié, sin embargo, que las vigas Vierendeel, debido a su poca eficiencia, se encuentran solamente en el plano transversal, paralelo a la fachada principal, mientras que en la sección longitudinal fue necesario recurrir a cerchas con elementos diagonales, así como elementos de atirantamiento. La combinación de ambas soluciones permitió optimizar el uso de los espacios interiores al reducir la presencia de diagonales en el interior del edificio.



Figura 3. Proceso de construcción de la estructura del edificio Timmerhuis de OMA. Fuente: (5)

Centrándonos en el estado español, la tipología Vierendeel fue adoptada en distintas construcciones. Podemos encontrar ejemplos de la misma, ya desde el primer cuarto de siglo XX, en la red de Metro/Tren de Cercanías de la ciudad Condal (figura 4) y en la entrada del cine Capitol en Madrid (6), entre otros.

¹ La celosía Pratt debe su nombre al ingeniero Thomas W. Pratt (1812-1875) y a su padre Caleb Pratt.

² La celosía Howe debe su nombre al ingeniero William Howe (1803-1852).

³ La celosía Warren debe su nombre al ingeniero James Warren (1806-1908).



Figura 4. Ejemplos Vigas Vierendeel. Visita de las autoridades a las obras del Ferrocarril Metropolitano Transversal de Barcelona (1924). Fuente: (7)

Respecto a esta última, la revista de Arquitectura, explicitaba (textualmente) en el año 1935:

“La estructura es mixta, metálica y de cemento armado; esta última en cubierta y Sala de Espectáculos. Las cuatro vigas de la cubierta de la Sala son de las llamadas Vierendell. Son también las mayores de Europa: 31 metros de luz por 3, 10 de altura, con un peso de 70 toneladas aproximadamente cada una. Hay otra viga Vierendell, de hierro, de 15 toneladas y de 14 metros de luz, para dar lugar a la entrada del Cine, y otras menos importantes” (8).

De la sentencia anterior se quisiera destacar, aparte de la referencia Vierendell y no Vierendeel (se desconoce si es un error de transcripción), la importancia que se daba a la misma (70 toneladas, 31 metros de luz), hecho que indirectamente está destacando la confianza que en ella tenían los arquitectos responsables de la misma: Luis Martínez Feduchi (1901-1975) y Vicente Eced (1902-1978), así como el ingeniero de la estructura Agustín Arnáiz. Ahora bien, en relación a las cerchas, los elementos diagonales trabajando a tracción (Pratt), a compresión (Howe), a compresión-tracción (Warren), hacían las veces de elementos de arriostramiento de la cercha. Esto fue el origen de un importante debate sobre la operatividad de la celosía Vierendeel, pues generaba dudas respecto a su seguridad estructural, añadido al hecho de una mayor deformación en comparación con los otros modelos (9). A estos puntos se sumó el del cálculo, pues la viga Vierendeel no podía ser estudiada con los procedimientos clásicos de la estática.

2. PROBLEMA DEL CÁLCULO

“[...] el cálculo de estas vigas [Vierendeel] es justamente considerado como extremadamente laborioso, lo cual ha constituido uno de los principales obstáculos que se oponían a la difusión de este sistema” (10).

El ingeniero César Villalba Granda, en 1933, calificaba el cálculo de las vigas Vierendeel como extremadamente laborioso. El motivo se daba al hecho de que la viga Vierendeel, a pesar de que puede considerarse en algunos casos como isostática exteriormente, presenta un elevado grado de hiperestaticidad interna. Esta razón se debía a que “las conexiones deben ser necesariamente rígidas para garantizar la adecuada estab-

ilidad del conjunto, y las distintas barras que configuran la estructura se ven sometidas a la acción simultánea de esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores” (11).

La existencia de estos tres esfuerzos dificultaba notablemente el planteamiento de la solución. Esta problemática no se encontraba en las celosías Pratt, Warren y Howe. Era frecuente su cálculo considerando el nudo como articulado. Esta salvedad implicaba la existencia sólo de Esfuerzo Axial N (de tracción o compresión). Dicha simplificación no podía hacerse en la celosía Vierendeel, pues la consideración de nudo rígido implicaba la existencia de un Momento Flector M , así como un Esfuerzo Axial N y Esfuerzo Cortante T , no simplificables en el proceso de cálculo (figura 5).

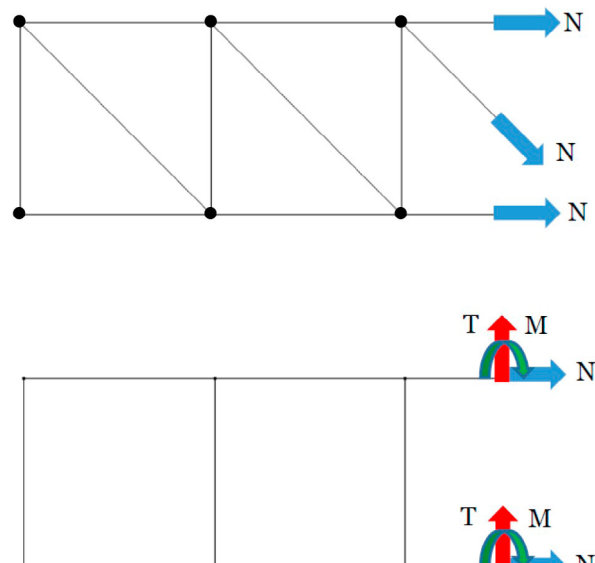


Figura 5. Esfuerzos de sección en una viga Pratt versus una viga Vierendeel

Las conocidas ecuaciones de la estática $\sum F_x = 0$, $\sum F_y = 0$, $\sum M_z = 0$, permitían encontrar las reacciones con el exterior, pero no las solicitaciones internas que presentaba la viga, fundamentales entre otras cosas para el dimensionamiento tanto a resistencia como a deformación, debido a la existencia del nudo rígido.

Una vez definida la tipología de la viga Vierendeel, quedaba pendiente plantear el método de cálculo global de la misma. De hecho, a principios del siglo XX la estructura hiperestática presentaba grandes dificultades para ser abordada en toda su generalidad y con relativa rapidez. Ciertamente eran conocidos los teoremas de Mohr (12) y Castigliano (12) o la integración de la ecuación de la elástica (12), entre otros métodos de análisis global, pero su aplicación solía ser, en no pocos casos, bastante tediosa. Hacían falta nuevas formulaciones más ágiles que éstas pues, el aumento del número de barras de los entramados, así como la elevada hiperestaticidad de las estructuras, generaba sistemas de ecuaciones resolutivas que complicaban la tarea del ingeniero estructural.

Veremos que, con la llegada del método de Cross y formulación que el mismo D. Carlos Fernández Casado (1905-1988) planteaba, quedaría el procedimiento de cálculo muy simplificado, a la vez que agilizado. En realidad, se puede plantear el problema del cálculo de la viga Vierendeel antes y después del Método de Cross, pues fue el referente que permitió sistematizar, a la vez que abreviar, el cálculo de la misma. A

pesar de ello, los métodos gráficos y empíricos siempre coexistieron con los analíticos y fueron una vía para la resolución de la tipología.

3. MÉTODOS DE CÁLCULO. ANTES DEL MÉTODO DE CROSS

“[...] no disponíamos de métodos de cálculo eficaces para las estructuras más frecuentes y otros como el de la viga de varios tramos...estaban tarados por el sello de la inútil crueldad” (13).

3.1. La estática gráfica como solución

A pesar de que la bibliografía y las memorias consultadas nos indican que, habitualmente, la tipología Vierendeel era calculada con procedimientos analíticos, la metodología de la Estática Gráfica (14), usual en las Escuelas Técnica en el periodo que estudiamos, también se aplicó para el cálculo de vigas con morfología similar, aunque con un comportamiento completamente diferente.

Un ejemplo de ello es la viga de cubierta de los *Magazzini Generali* en Chiasso (Suiza) (figura 6) del ingeniero Robert Maillart (15). Aunque, generalmente, el método de la estática gráfica se aplica a vigas reticulares con uniones articuladas, hay casos excepcionales en los que las diagonales de arriostramientos pueden ser eliminadas. Esto se consigue gracias a la optimización de la forma funicular del cordón inferior (16).

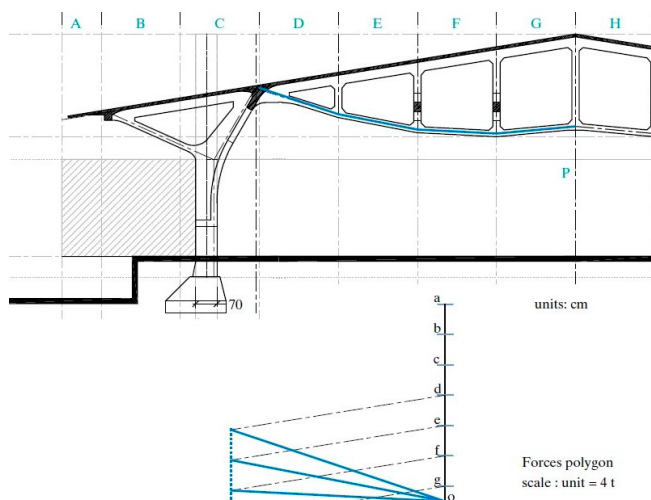


Figura 6. Procedimiento de Estática Gráfica. Fuente: (16)

3.2. Modelos experimentales

“En el caso de mayor complicación [...], en los que el cálculo resulta demasiado lento o expuesto a error, se emplea el método experimental en modelo reducido [...]” (17).

A principio del siglo XX, el empleo de prototipos sirvió para experimentar en diferentes ámbitos de la construcción y fueron utilizados tanto por arquitectos (18), como por ingenieros. En España, de la mano de Eduardo Torroja (1899-1961), destaca el modelo realizado a escala 1/10 para el Frontón Recoletos (19). En Italia, encontramos a la figura de Pier Luigi Nervi quien, primero en los laboratorios de Milán y pos-

teriormente en su propio laboratorio experimental en la Magliana (Roma), realizó modelos a escala real que le ayudaron a conocer “la realidad de cada caso singular, copiando las características peculiares e introduciendo en el modelo materiales, cimentación, vínculos, uniones y modos de ejecución que [...] suministran en, compensación, una visión sintética del problema más real y, por lo tanto, más adherida a la verdadera finalidad de las pruebas experimentales” (20). Ambos ingenieros, casi de manera contemporánea, utilizaron modelos experimentales cuya finalidad era comprobar la resistencia de construcciones con soluciones formales en las que “el cálculo matemático estimativo, con sus necesarias simplificaciones y esquematizaciones, ya no es suficiente” (20).

También encontramos en ambos ingenieros ejemplos de modelos experimentales realizados con vigas Vierendeel. Todo parece indicar que Eduardo Torroja utilizó por primera vez la viga Vierendeel en dos construcciones para la Ciudad Universitaria. La primera de ellas se encuentra en el pasillo de conexión realizado entre la Facultad de Física y la Facultad de Química que formarían parte del denominado “campus” de Ciencias. El otro ejemplo lo encontramos en la cubierta de una cátedra del Hospital Clínico de Ciudad Universitaria. Ambos proyectos comenzaron a ejecutarse aproximadamente en el año 1933 y, sin embargo, no se han encontrado referencias de los cálculos utilizados más allá de un modelo reducido y una hoja de cálculo, a pesar de que en el libro en el que Torroja recopiló sus principales proyectos realizados entre 1926 y 1936 (17) sí que hace mención al método de Cross como algo recurrente en los proyectos de Ciudad Universitaria. En su archivo no se encuentra ninguna referencia al método de Cross hasta 1941 en el que es utilizado para calcular la estructura de los cuarteles militares de Granada.

Nervi, por su parte, experimentó con modelos a escala real el uso de vigas Vierendeel para la construcción de cubiertas con grandes luces, tanto formando arcos mediante elementos prefabricados (Figura 7), como con vigas que se entrelazaban para materializar cubiertas reticulares. Sin embargo, a razón de los resultados obtenidos, la viga Vierendeel fue descartada en favor del uso de vigas reticulares (20).



Figura 7. Modelo a escala de un arco realizado con elementos prefabricados formando una viga Vierendeel. Fuente: (20)

3.3. La formulación presentada por su propio autor: Jules Arthur Vierendeel

“M. le Président annonce que la Société a le plaisir d’avoir ce soir comme conférencier M. le professeur Vierendeel, Ingénieur en chef du Service Technique de la Flandre occidentale (Belgique), qui est venu exposer devant la Société la théorie complète du système de pont qu’il préconise” (21).

La *Société des ingenieurs civils de France*, recogía en sus *Memoires et Compte Rendus des Travaux* de julio de 1900 el artículo *Théorie générale des Poutres Vierendeel* (1), donde el autor A. Vierendeel sucintamente presentaba el método de cálculo que previamente había presentado en la memoria *Longerons en treillis et longeron à arcades*. Sería la génesis de lo que posteriormente se conocerá como viga Vierendeel. En el artículo, de más de 60 páginas, el autor presentaba y formulaba su teoría con distintas casuísticas.

3.4. Mecánica Elástica. Alfonso Peña Boeuf

En el año 1925 aparecía publicado el libro *Mecánica Elástica* (22), obra del Ingeniero de Caminos y profesor de la Escuela Especial del Cuerpo, D. Alfonso Peña Boeuf (1888-1966). Cinco años más tarde salía a la luz la segunda edición (ampliada) del mismo (23). Del prólogo se deduce que el autor, fruto del encargo de la sustitución docente de su maestro – *el sabio Zafra* –, quiso exponer en “pocas lecciones una síntesis de los modernos métodos elásticos con las aplicaciones más interesantes en el cálculo de las estructuras indeterminadas estáticamente, de tal modo que fuera fácilmente asimilable sin dificultad, aun en aquellos casos en que la estructura fuera complicada” (22).

El libro, publicado (por Talleres Voluntad), fue un referente que vino a llenar un vacío en el mundo de los textos técnicos, especialmente aquellos con matriz española (24). En el capítulo V del mismo, dedicado a las estructuras múltiples, encontramos un apartado de 8 páginas dedicado a la viga Vierendeel. Según el autor, éstas son aquellas vigas “formadas por cabezas enlazadas por medio de montantes verticales”, pretendiéndose “determinar una fórmula general que permite calcular con gran sencillez estas vigas” (23). El punto clave, demostrado por Vierendeel, consiste en destacar “la existencia de una inflexión”, esto es un punto de momento nulo (a igualdad de Inercias de cabezas y montantes), “en el punto medio de los montantes”. Este hecho, simplifica notablemente las relaciones existentes pues, el equilibrio de media viga debido a un plano medio que contiene dichos puntos generará sólo esfuerzos axiales (de compresión o tracción) y cortantes, simbolizados por el autor por q y π respectivamente (figura 8).

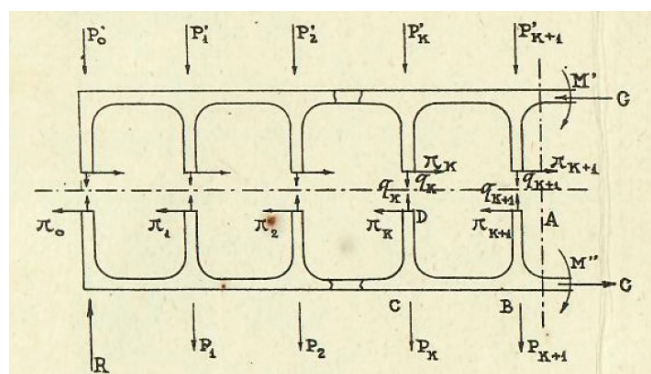


Figura 8. Detalles esfuerzos debidos al corte de la Viga Vierendeel por el plano medio. Fuente: (23)

Así pues, el objetivo será precisamente la obtención de estos valores. El autor presenta dos posibles soluciones. La primera, que es la que él enfatiza, aplicando el teorema de Castigliano (perfectamente conocido en la época). La segunda, según el autor más tediosa, fuere la propuesta por el mismo Vierendeel.

Consistiría en calcular la deformación lineal y angular de un punto en función de q y π y establecer la igualdad en los puntos medios de los montantes, entre la mitad superior y la inferior.

3.5. Relaciones según Luis Moya

El año 1928, el arquitecto Luis Moya Blanco (1904-1990) publica un documento titulado *Las Vigas Vierendeel* (1928), según recoge Antón González Capitel (1976) en su tesis doctoral (25) dentro del apartado bibliográfico de textos escritos y de trabajos no proyectuales del arquitecto de Madrid. Como en el caso anterior, hacemos notar una variación en el nombre del ingeniero belga transcrito como Vierendeel. El arquitecto de Madrid afirma que “una viga Vierendeel, en general, constituida por dos cordones, superior e inferior, rectos o poligonales, unidos por montantes verticales, tiene el aspecto de una sucesión de rectángulos o trapecios” (26) (figura 9). Según el propio autor, “el cálculo es pesado en el caso general; pero se simplifica en el caso frecuente en que los cordones superior e inferior son rectos y horizontales, de igual momento de inercia y con cargas aplicadas sólo en los nudos” (26).

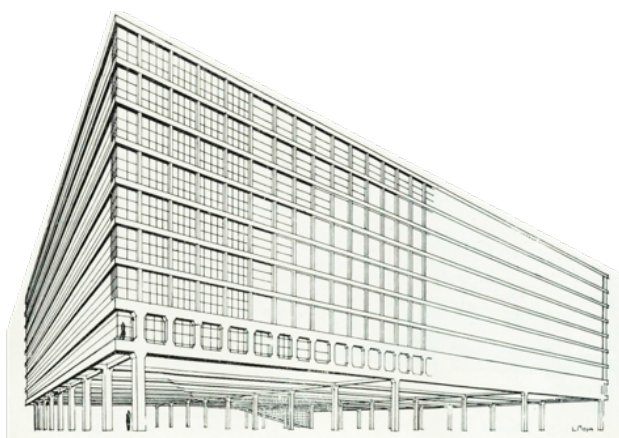


Figura 9. Ejemplo de edificio con viga Vierendeel dibujado por Luis Moya. Fuente: (26)

3.6. Revista Nacional de Arquitectura

En la Revista Nacional de Arquitectura, el año 1946 se presentaba un artículo de escasas ocho páginas titulado *Estudio de la Viga Vierendeel* (27), del arquitecto Javier Lahuerta. Según el autor, este tipo de viga, “con el que es posible salvar vanos de gran amplitud, es excepcionalmente apropiado para la arquitectura”. Él mismo refiere a la solución propuesta por Vierendeel para su resolución, aunque indica que conlleva “las hipótesis de tramos de igual luz, momentos de inercia iguales en cabezas y montantes y cargas sólo en los nudos”. Además, remarca que obtener la solución implica “la resolución de un sistema de ecuaciones con tantas incógnitas como montantes”. Este hecho pudiere parecer insignificante para un estudiante o técnico de hoy en día, pero no hemos de olvidar que la sentencia fue formulada en la década de los años 40 donde, principalmente, se contaba con reglas de cálculo. El autor dará un paso más refiriendo que “no es difícil abordar el problema directamente y contar con la posibilidad de que cabezas y montantes tengan el momento de inercia preciso, de tramos de amplitud cualquiera, y con el efecto de cargas en vanos”, ofreciéndonos, por lo tanto, la resolución del planteamiento general de la tipología estudiada. Partiendo de

las formulaciones de la pieza aislada que ofrece la Resistencia de Materiales y, planteando las correspondientes ecuaciones de equilibrio de momentos en los nudos, así como la igualdad de los giros de extremo de barra, el autor presenta las fórmulas generales para la resolución de la viga Vierendeel. La novedad de las mismas, respecto a las presentadas por Peña Boeuf, radica principalmente en su aplicación a luces de tramos cualquiera. Llegados a este punto, el autor a modo de prontuario daba la relación de los momentos finales para vigas de tres, cuatro y cinco tramos, tanto para cargas puntuales como cargas uniformemente repartidas en los vanos.

Con las formulaciones recogidas, podemos afirmar que la resolución de la viga Vierendeel estaba prácticamente resuelta. Ahora bien, ello implicaba la resolución de un sistema de ecuaciones largo y monótono o bien la adaptación de la tipología a las formulaciones dadas en el prontuario. Fuere necesario obtener un medio ágil, a la vez que generalista, que permitiese la resolución de la tipología de manera cómoda para el ingeniero estructural.

4. MÉTODOS ANALÍTICOS DE CÁLCULO. EL MÉTODO DE CROSS

En mayo de 1930, el ingeniero norteamericano Hardy Cross (1885-1959) publicó en la revista *American Society of Civil Engineers* un artículo titulado *Analysis of continuous frames by distributing fixed-end moments* (28). Fuere el germen del conocido como *Método de Cross*. El propio autor norteamericano, en la *Synopsis*, presenta sin ambigüedad el objetivo de su método, “the purpose of this paper is to explain briefly a method which has been found useful in analyzing frames which are statistically indeterminate. The essential idea which the writer wishes to present involves no mathematical relations except the simplest arithmetic” (28).

Formulado el método, su generalización tanto en obras docentes como técnicas, a la vez que, en memorias de cálculo, fue numerosa como atestigua la bibliografía al respecto (12). La mayoría de los métodos existentes quedaron desplazados por éste, mucho más rápido, ágil y con igual seguridad en el resultado final.

[...] el ingeniero Cross desarrolló un procedimiento que, usando medios teóricos extremadamente simples, permite determinar de una manera muy clara los momentos flectores en los nudos de vigas continuas, pórticos, etc. [...]. Se trata de un procedimiento de los llamados “procedimientos de iteración”, es decir, se trata de un tipo de cálculo progresivo, paso a paso, en el cual en cada fase del cálculo se corrige el resultado de la operación anterior, convergiendo el error a cero. [...]. El cálculo se desarrolla con medios extremadamente sencillos, en forma sinóptica y clara y sin esfuerzo mental digno de consideración. Por esto puede, quizás, resumirse este procedimiento bajo el lema de la *estática fácil* (29).

Llegados a este punto, el problema del cálculo estructural referido a vigas y pórticos estaba resuelto. Hasta la implementación de los métodos numéricos, esta metodología sería la más usada por los técnicos, así como la más habitual tanto en la docencia como en la bibliografía académica de las Escuelas Técnicas (12). El análisis de la viga Vierendeel no quedaría al margen.

4.1. El método de Cross en España

“Un pedazo de papel y un lápiz bastan para acometer el análisis de cualquier estructura reticular” (30).

Hablar del Método de Cross en España, es hablar de la figura de Don Carlos Fernández Casado, quien fue su introductor y su valedor (31). Él mismo, ya a principios de los años 30, intuyó que el método formulado por el americano generaría un vuelco en el mundo del cálculo estructural. Los métodos existentes a principios de siglo XX vendrían a ser sustituidos por una nueva formulación técnica: los métodos iterativos -entre los cuales se encontraba el método del norteamericano.

“Inmediatamente adoptamos el método de cálculo para nuestros proyectos y figuró oficialmente por primera vez en un concurso del año 1932 donde utilizamos, además la simplificación de cargas y estructuras simétricas” (30). Todo parece indicar que se trataba del proyecto para la construcción de la nueva Facultad de Filosofía y Letras de la nueva Ciudad Universitaria en Madrid, resultando esas obras adjudicadas el 20 de julio de 1932 a la empresa Huarte y Cía (32). El ingeniero riojano, a pesar de no formar parte del grupo de técnicos que dirigían la construcción de la Ciudad Universitaria de Madrid, tuvo oportunidad de participar en alguno de estos proyectos como técnico de la constructora Huarte y Cía que, en aquella época, comenzaba su andadura e intento de expansión por todo el territorio nacional, todavía bajo el nombre de Huarte y Malumbres (33). Huarte se rodeaba de arquitectos e ingenieros con los que participaba en las licitaciones de la ejecución de las obras ofreciendo, según palabras del hijo de D. Carlos Fernández Casado, el también ingeniero Leonardo Fernández Troyano “un cambio de estructura para abaratarla y mejorarla” (34) consiguiendo de este modo adjudicarse muchas obras que posibilitaron el crecimiento de la constructora de Huarte hasta convertirse en una de las más importantes de aquella época.

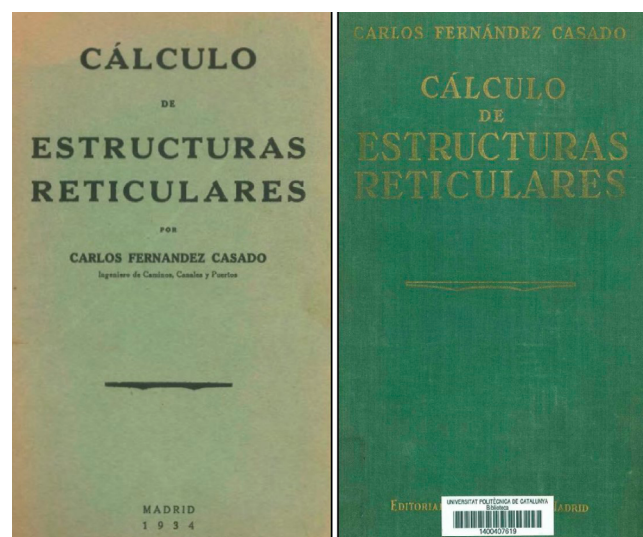


Figura 10. Primera edición (1934) y Octava edición (1967)

Una vez formulado el método, hacía falta una obra docente (para el alumno, el profesor y el técnico) que presentase pedagógicamente el método, pero sin perder en ningún punto el rigor y la veracidad. Fernández Casado, adelantándose a los tiempos venideros, introdujo en el estado español un

método que posee en grado sumo las tres cualidades que deben exigirse a un método de cálculo: “universalidad, sencillez y exactitud” (35); la primera edición del texto *Cálculo de Estructuras Reticulares* veía la luz (figura 10).

Presentamos una sistematización completa del método de Cross [...]. Este método, que los norteamericanos consideran como “la aportación más valiosa al cálculo de estructuras, durante los treinta años del siglo”, resuelve del modo más sencillo y exacto cualquier tipo de estructura reticular, por complicado que sea (35).

Hablamos de 1934. El autor, ya en esta primera edición indicaba la importancia del nuevo método que presentaba. El libro, conocido tradicionalmente como *el Fernández Casado* (31), tuvo desde el primer momento el rigor y la precisión, así como el sentido físico y la pedagogía, que siempre han acompañado los trabajos de Don Carlos Fernández Casado, convirtiéndole en un insigne referente dentro del mundo del cálculo estructural.

Existen métodos de cálculo en los que las intuiciones directas no se limitan a establecer el punto de partida, sino que influyen a lo largo de todo el desarrollo, dando a las transformaciones de cálculo un sentido más valioso que el puramente combinatorio. Los puntos de contacto entre las esferas de lo físico y lo matemático jalonan todo el proceso y, a través de las operaciones abstractas, trasparece la realidad concreta del fenómeno físico. A este tipo de métodos pertenece el que hemos adoptado.

Continuando,

Ventajas prácticas: poseyendo la intuición del fenómeno físico, que es lo que debe aprenderse en la Teoría de Estructuras, no hace falta más; los problemas se resuelven sin necesidad de recordar combinaciones artificiosas, por consiguiente, de un modo más sencillo, más seguro y agradable (35).

La difusión que tuvo el texto fue amplísima. Junto con la claridad expositiva del método, múltiples ejemplos ayudaban al lector (estudiante, docente o profesional) al aprendizaje de forma amena y exhaustiva *del Cross* (figura 11). Muestra de ello se puede constatar en gran parte de las memorias de cálculo realizadas a partir de este periodo, pues se encuentran realizadas con este procedimiento.

La justificación del porqué del método escogido nos llega unos años más tarde – en la segunda edición de 1940- cuando Don Carlos prologa el texto afirmando “que la materia impone al método, será más adecuado aquel cuyo contenido imaginativo sea más intenso, aquel en que trasparezca con más fuerza la realidad del fenómeno físico” (36). Y es que a partir de la segunda edición se incide especialmente en la deformada (“la única realidad física sensible” (37)) y en el diagrama de tracciones (“rompiendo la incertidumbre tracción-compresión” (37)), complementando así los diagramas fundamentales.

El estudio de los desplazamientos estaba ya planteado antes de Cross, pero el modo de enfocar la cuestión desde el entramado en su totalidad física, ha abierto el horizonte para tratarlo de un modo integral y no como una corrección o como influencia secundaria (30).

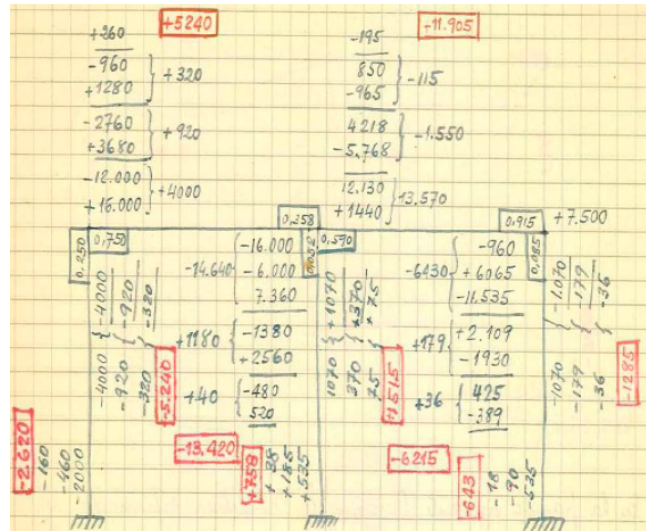


Figura 11. Ejemplo del método de Cross. Corresponde a un ejercicio de cálculo con el método de Cross obtenido de material docente de la asignatura Estructuras impartida en el curso 1963-64 en la Escuela Técnica Industrial de Barcelona. Fuente: Personal del autor

Siendo consciente que el método de Cross iba tomando arraigo en nuestro país, D. Carlos explicita que “dos notas características del método son: dar sentido físico a las operaciones de cálculo y realizarlas materialmente sobre un esquema que reproduce la estructura” (37) dejando claro nuevamente la preocupación por la comprensión del fenómeno físico.

También en la edición de 1967 (38), octava y última, vuelve a quedar clara la premonición del autor previendo cada vez más el uso de los ordenadores electrónicos que en esos momentos estaban comenzando su irrupción. Lejos de verlo como un problema afirma que “resuelven la rutina de cálculos matemáticos simples, y le permiten (al técnico) dedicar su actividad creadora al proyecto”. Así pues, lejos de pensar que el método de Cross quedaría como una cosa obsoleta o un arcaico método de cálculo que tuvo su época gloriosa, se incide “que su interés didáctico de conocimiento de las estructuras reticulares, le da su verdadera categoría”. A pesar de ser sentencias formuladas a finales de la década de los años sesenta, hoy en día retienen su actualidad y vigencia ya que, “en los casos de un entramado de gran complicación, nadie que no sea un retrógrado dudará entre resolverlo por el método de cálculo que sea, y acudir a un programa de los muchos que existen para estructuras reticulares”. Y es que para el autor “intuición y experiencia son las dos fuentes vivas a las que ha de acudir el que proyecta” (13). Todo ello añadido al tercer ítem que fuere el cálculo. De hecho, este pensamiento fue formulado por un joven e intuitivo Carlos Fernández y transcrito en la Revista de Obras Públicas del año 1931 en su primer trabajo de la serie que dedicó a la teoría del arco (39).

La formulación fundamental del método, podríamos sintetizarla en la siguiente frase:

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, deshaciendo por etapas esta rigidez, permitiendo sucesivamente los giros y los desplazamientos (40).

Las situaciones que se consideran las exponemos en cuatro etapas consecutivas (figuras 12 - 13). (Éstas han sido obte-

nidas del libro del profesor Antonio Pey Cuñat, docente en la *Escuela Especial de Ingenieros de Industrias Textiles de Tarrasa* (41):

Etapa Fundamental. Nudos absolutamente rígidos (I) y Nudos giratorios, pero no desplazables (II).

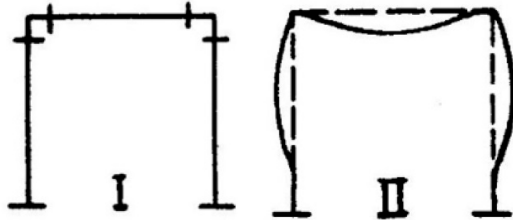


Figura 12. Etapa fundamental del Método de Cross

Etapa Paramétrica. Nudos desplazables, pero no giratorios (III) y Nudos giratorios desplazables (IV).

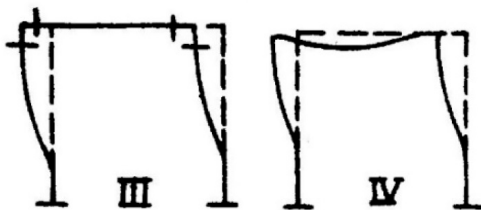


Figura 13. Etapa paramétrica del Método de Cross

5. LAS VIGAS VIERENDEEL EN LA OBRA DE CARLOS FERNÁNDEZ CASADO

5.1. La novedad del cálculo. Simetrías y antimetrías

La aplicación del método de Cross al análisis global de la viga Vierendeel supondrá una sistematización del mismo conduciendo, sin duda, a un cálculo mucho más ágil del proceso, especialmente si lo comparamos con los anteriormente descritos que fueren los que el ingeniero estructural disponía. No será necesario que las longitudes de los marcos sean iguales, ni que los perfiles de los cordones o diagonales tengan la misma inercia. Ahora bien, el hecho de que éstas comúnmente sean diseñadas como simétricas geométricamente, simplificará aún más la metodología al técnico. Y es que, sin duda, otra de las grandes aportaciones que introdujo D. Carlos a través de la formulación del método de Cross, fue el uso de las simplificaciones debidas a la simetría o antimetría de la estructura (figura 14). Este hecho permitía, con unos breves cálculos previos, el estudio sólo de una parte de la mitad de la misma.

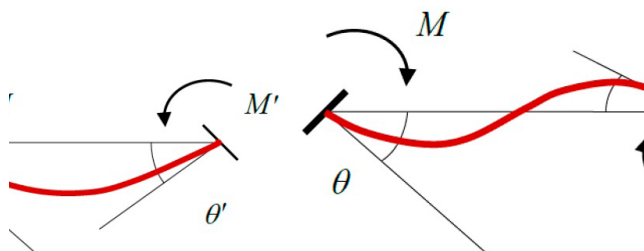


Figura 14. Viga simétrica y viga antisimétrica

[...] en la mitad de la estructura puede considerarse la barra central como empotrada con una rigidez virtual reducida en el primer caso y ampliada en el segundo mediante factores equivalentes a la suma y diferencia del factor de transmisión con la unidad. En el caso de sección constante éstos valen 0,50 y 1,50, respectivamente (38).

Este hecho resultaría de especial interés para las tipologías Vierendeel que estudiamos pues *acostumbran* a ser de geometría simétrica con disposición de carga simétrica (figura 15) o de geometría simétrica con disposición de carga antisimétrica (figura 16). Hacer uso de las simplificaciones formuladas por D. Carlos Fernández, conlleva que sólo estudiando parcialmente la misma, obtengamos el resultado total de la estructura.

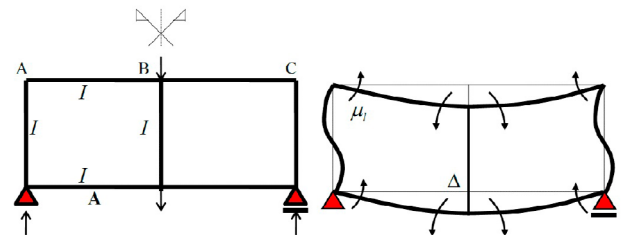


Figura 15. Estructura Vierendeel geométricamente simétrica, con carga simétrica

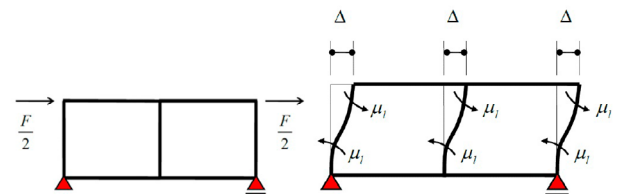


Figura 16. Estructura Vierendeel geométricamente simétrica, con carga antisimétrica

La estructura de la figura 15 presenta una simetría en cuanto a la geometría, mientras que, en cuanto a la carga, presenta una simetría respecto al eje vertical y una antimetría respecto al eje horizontal. Para esta figura, el grado de desplazabilidad es 1. Las simplificaciones nos permiten sólo estudiar una cuarta parte de la estructura tal y como se indica en la figura 17, para obtener el diagrama de momentos resultante (figura 18).

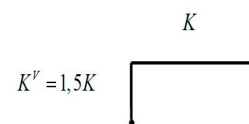


Figura 17. Simplificación de la estructura de la figura 18 a efectos de cálculo

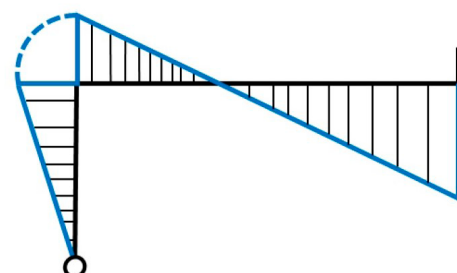


Figura 18. Diagrama (parcial) de momentos flectores de la estructura de la figura 17

En el caso de la figura 16, que presenta simetría geométrica, pero antimetría de cargas, también presenta un grado de desplazabilidad 1 para la carga propuesta. Nuevamente el uso de las simplificaciones nos permite eludir el cálculo total de la estructura (figura 19) para obtener el correspondiente diagrama de momentos (figura 20).

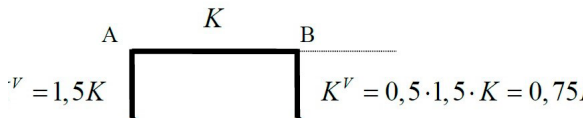


Figura 19. Simplificación de la estructura de la figura 19 a efectos de cálculo

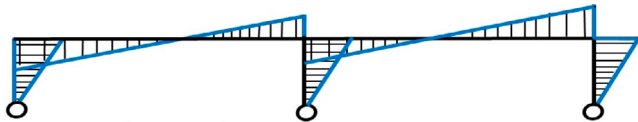


Figura 20. Diagrama (parcial) de momentos flectores de la estructura de la figura 19

El marco teórico descrito previamente, fue usado también por D. Carlos Fernández Casado en el cálculo de estructuras reales que contenían la tipología Vierendeel, como veremos a continuación.

5.2. El Taller de montaje para el Instituto de Técnica Aeronáutica (INTA) en Torrejón de Ardoz

La nave de montaje del Instituto Nacional de Técnica Aeronáutica (I.N.T.A.) construida en Torrejón de Ardoz por la empresa constructora Huarte y Cía es uno de los proyectos en los que aparecen gran número y variedad de vigas Vierendeel. La adjudicación se consiguió mediante un concurso de proyecto-construcción donde, sin intervenir en la parte de distribución arquitectónica de la misma, las empresas tenían que resolver la estructura portante. Los ingenieros D. Carlos Fernández Casado y D. Ildefonso Sánchez del Río, contando con la colaboración de los también ingenieros de caminos D. Ignacio Vivanco y D. José Manuel Fernández Oliva se ocuparon del proyecto estructural de la propuesta ganadora presentada por Huarte (42).

El programa planteaba la necesidad de resolver la cubrición de dos naves de 60 y 40 m., respectivamente, destinadas al taller de montaje propiamente dicho. Un espacio ocupado por oficinas y otro para el taller de reparación, completaban el conjunto. Varios arcos atirantados, de 60 y 40 m., resolvían las luces más exigentes de las naves principales, y el resto de elementos estructurales de cubrición fueron resueltos en su mayoría por vigas Vierendeel de diferentes dimensiones (figuras 21 y 22). El volumen destinado a oficinas, situado a continuación de la nave de 40 m. de luz, se resolvía en dos plantas. Según las indicaciones del programa de la licitación, los pilares en el interior de este cuerpo se redujeron a 4, seguramente para posibilitar mayor flexibilidad en su distribución, por lo que los ingenieros se vieron obligados a plantear “una solución extraordinaria para la estructura de este pequeño edificio” (43). Dos vigas Vierendeel de 40 m., planteadas en tres vanos (10+20+10 m.) gracias a los cuatro soportes interiores, resolvían los vanos interiores de las oficinas. Los cantos de estas vigas coincidían con la altura de una planta y los cordones inferiores y superiores de las Vierendeel fueron utilizados para apoyar los forjados que resolvían los forjados de la planta primera y de la cubierta.

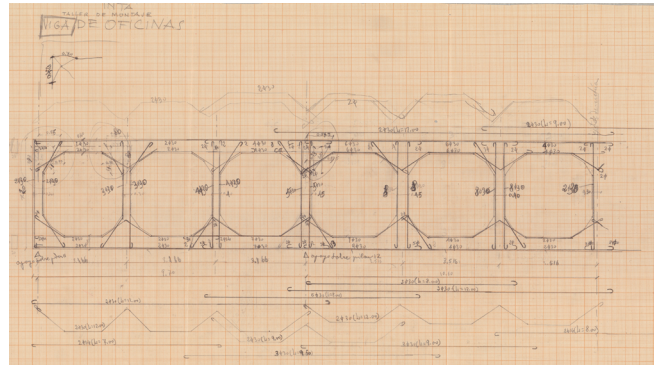


Figura 21. I/FC-083/042. Plano y detalles de armaduras de la viga Vierendeel de las oficinas del Taller de montaje para el Instituto de Técnica Aeronáutica (INTA) en Torrejón de Ardoz. Fuente: Archivo Carlos Fernández Casado, CEHOPU-CEDEX

El volumen de taller comenzaba adherido lateralmente a la nave de 40 m. para luego prolongarse más allá de las oficinas dejando un espacio central vacío. En las bases de la licitación se exigía que la cubierta estuviese resuelta con dientes de sierra para posibilitar la entrada de luz cenital en el espacio interior creado, además de limitar el número de apoyos interiores. Los espacios destinados a taller eran dos volúmenes simétricos que, en la zona adyacente a la nave de montaje tenían un ancho de 15 m. que luego se ampliaba a 25 m. una vez se extendían más allá del volumen de oficinas. Todos los vanos se plantearon para ser resueltos con Vierendeel que hacía de lucernario vertical en el que apoyaban los forjados inclinados. En la zona más estrecha del taller se proyectaron Vierendeel de 15 m. de luz sin apoyos intermedios y en la zona más ancha aparecían pilares intermedios para permitir que las vigas Vierendeel de cubierta pudieran prolongarse, con el mismo canto, un vano más de 10 m. de luz.

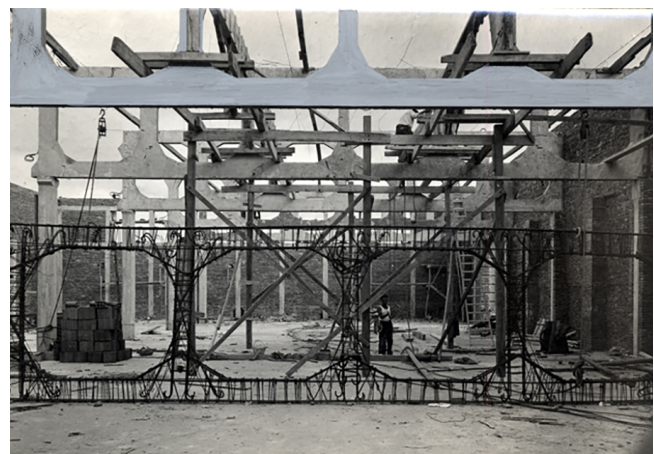


Figura 22. I/FC-083/002. Taller de montaje para el Instituto de Técnica Aeronáutica (INTA) en Torrejón de Ardoz. Vista interior del taller en construcción. Fuente: Archivo Carlos Fernández Casado, CEHOPU-CEDEX

Otras dos vigas Vierendeel fueron diseñadas en este proyecto. En este caso se trataban de la torre de mando del aeródromo de Torrejón (figura 23). La excusa para utilizar esta tipología estructural en este cuerpo era la necesidad de levantar dos plantas en una zona donde debían pasar los vehículos al campo de aterrizaje, por lo que nuevamente se aprovechó el canto de las vigas Vierendeel como altura entre plantas de forma que los forjados se apoyaban en los cordones superior e inferior. En este caso, las vigas estaban en fachada, por lo que la ausencia de triangulación posibilitó la apertura de huecos de fachada entre los montantes.

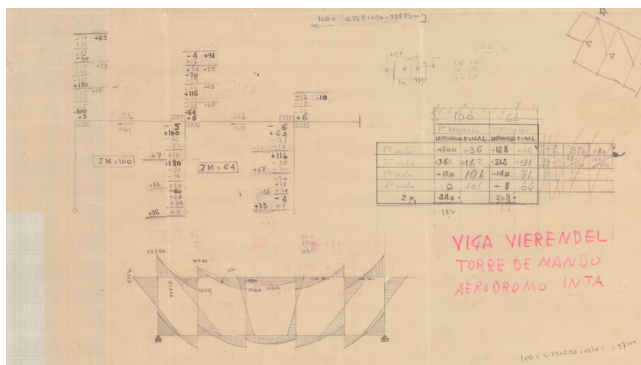


Figura 23. I/FC-083/041. Cálculos en papel vegetal de la viga Vierendeel de la Torre de mando del aeródromo del Instituto de Técnica Aeronáutica (INTA) en Torrejón de Ardoz. Fuente: Archivo Carlos Fernández Casado, CEHOPU-CEDEX

Como se indica en la memoria del proyecto (42), transcrita posteriormente en sendos artículos recogidos en la Revista de Obras Públicas (43, 44), la simplificación de la doble simetría explicada anteriormente permitía “reducir la estructura a la cuarta parte, resultando un pórtico de tres vanos con posibilidad de asiento en los nudos intermedios” (43). Y continúa:

Para determinar las características de dinteles y montantes tenemos en cuenta los acartelamientos eficaces. En una primera etapa analizamos la flexión directa ya que las cargas se transmiten a lo largo de los cordones. Después tenemos en cuenta la desnivelación de nudos, que acudiendo al procedimiento indirecto exige tres distribuciones y la resolución de un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas (43).

6. CONCLUSIONES

El ingeniero D. Carlos Fernández Casado fue uno de los precursores en lo que se refiere al cálculo de estructuras hiperestáticas, introduciendo en España de manera pionera el método de Cross. Esto facilitaría el cálculo de vigas con tipología Vierendeel, caracterizadas por su hiperestaticidad interna.

El ingeniero riojano, como él mismo expone (43), experimentaría con las vigas Vierendeel en diferentes proyectos, entre

los que destaca el taller de montaje para el Instituto de Técnica Aeronáutica (INTA), llegando a hacer ensayos a rotura de vigas a escala real que le permitiría conocer en mayor profundidad el comportamiento de este tipo de vigas.

De hecho, él mismo afirmaba:

[...] la ley de distribución de los momentos flectores nos hace ver la inadecuación de la estructura a la transmisión de cargas por flexión en vanos importantes en los que se dispone de gran altura. La doble incurvación de los momentos flectores en cada una de las barras, montantes o cordones, indican el mal aprovechamiento del material.

Las grandes tensiones de tracción que se desarrollan en las zonas de acartelamientos y la gran importancia de las armaduras necesarias para absorberlos, da lugar a acciones secundarias entre la armadura y el hormigón, así como empujes al vacío en los cambios de dirección, que son causas de iniciación de agrietamiento (43).

En posteriores proyectos en los que se tuvo que enfrentar de nuevo a luces importantes, D. Carlos Fernández Casado plantearía vigas reticulares, como en el Instituto Nacional de Previsión (45). La viga Vierendeel, con peor comportamiento frente a las deformaciones, quedaría relegada a situaciones excepcionales en las que sea necesario un espacio diáfano en fachada o cuando hace la función de pasarela y se exige espacio por el que se pueda pasar entre los cordones superior e inferior.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los/as autores/as de este artículo declaran no tener conflictos de intereses financieros, profesionales o personales que pudieran haber influido de manera inapropiada en este trabajo.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Josep Maria Pons-Poblet: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración de proyecto, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Ruth Arribas-Blanco: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración de proyecto, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

REFERENCIAS

- (1) Société des ingénieurs civils (1900). Mémoires et compte-rendu des travaux de la société des ingénieurs civils fondée le 4 mars 1848. Vol. 75, 1900, 2e semestre. (pp. 163). <http://cnum.cnam.fr/redir?ECCMC6.74>
- (2) Société des ingénieurs civils (1900). Mémoires et compte-rendu des travaux de la société des ingénieurs civils fondée le 4 mars 1848. Vol. 75, 1900, 2e semestre. 5me Série 18me Volume. Poutres de Pont Système Vierendeel. (pp. 234). <http://cnum.cnam.fr/redir?ECCMC6.74>
- (3) Société des ingénieurs civils (1900). Mémoires et compte-rendu des travaux de la société des ingénieurs civils fondée le 4 mars 1848. Vol. 75, 1900, 2e semestre. (pp. 147). <http://cnum.cnam.fr/redir?ECCMC6.74>
- (4) Société des ingénieurs civils (1900). Mémoires et compte-rendu des travaux de la société des ingénieurs civils fondée le 4 mars 1848. Vol. 75, 1900, 2e semestre. (pp. 166 y 167). <http://cnum.cnam.fr/redir?ECCMC6.74>
- (5) Pieters Bouwtechniek. Recuperado en 12 de mayo de 2024 de <https://www.pietersbouwtechniek.nl/en/projects/project?projectid=/projecten/timmerhuis>
- (6) Biblioteca digital memoriademadrid (1931). Montaje de la viga Vierendeel de la entrada del cine Capitol. Fotografía extraída de la revista Arquitectura (Nº 1 Enero-Febrero de 1935) Digitalización de microfilm. <http://www.memoriademadrid.es/busador>

- php?accion=VerFicha&id=20544&num_id=6&num_total=12
- (7) Gran Metropolitano de Barcelona. El puente del Transversal sobre el Gran Metro. Visita de las autoridades a las obras del Ferrocarril Metropolitano Transversal de Barcelona. <http://www.granmetro.es/instalaciones-singulares/el-puente-del-transversal-sobre-el-gran-metro/>
- (8) MartínezFeduchi, L., Eced, V. (1935). Edificio Carrión: La construcción. *Revista Arquitectura*, 1, 1-21. <https://www.coam.org/media/Default%20Files/fundacion/biblioteca/revista-arquitectura-100/1932-1936/docs/revista-completa/revista-arquitectura-1935-no1.pdf>
- (9) Pons-Poblet, J. M. (2019). A Viga Vierendeel: Passado e presente de uma tipologia inovadora. *Arquitetura Revista*, 15(1), 193–211. <https://doi.org/10.4013/arq.2019.151.11>
- (10) Villalba Granda, C. (1933). El puente Vierendeel de la Riera de Caldas. *Revista de Obras Públicas*, 81, tomo I (2 633), 477-482. https://quickclick.es/rop/pdf/publico/1933/1933_tomoI_2633_01.pdf
- (11) Estévez Cimadevila, J., Martín Gutiérrez, E. (2003). Análisis del rendimiento estructural de vigas Vierendeel. *Informes De La Construcción*, 54(483), 27–37. <https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/573/648>
- (12) 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.)]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/95475>
- (13) Fernández Casado, C. (1957). Construcción, proyecto y cálculo. *Revista de Obras Públicas* 105, tomo I (2902): 51-54. https://quickclick.es/rop/pdf/publico/1957/1957_tomoI_2902_01.pdf
- (14) Pons-Poblet, JM., Arboix-Alió, A. (2020). La estática gráfica, pasado y presente de una metodología singular. *EGA Expresión Gráfica Arquitectónica*, 25(39), 132-143. <http://doi.org/10.4995/ega.2020.12841>
- (15) Zastavni D. (2008). The Structural Design of Maillart's Chiasso Shed (1924): A Graphic Procedure. *Structural Engineering International*, 18(3), 247-252. <http://doi.org/10.2749/101686608785096496>
- (16) McRobie, A., Millar, C. Zastavni, D., William, B. (2022). Graphical stability analysis of Maillart's Roof at Chiasso. *Structural Engineering International*, 32(4), 538-546. <http://doi.org/10.1080/10168664.2021.2018958>
- (17) Torroja Miret, E. (2020). *Obras principales de hormigón armado proyectadas y dirigidas por Eduardo Torroja de 1926 a 1936*. Madrid: Fundación Eduardo Torroja y CEDEX.
- (18) Arribas Blanco, R. (2016). Jean Prouvé y Konrad Wachsmann. Dos formas de utilizar la maqueta como herramienta de proyecto. *Proyecto, Progreso, Arquitectura*, 15, 56–69. <https://revistascientificas.us.es/index.php/ppa/article/view/2383/2721>
- (19) López-González, C., Carreiro-Otero, M., García Navarro, J. (2014). Génesis y período vital del Frontón Recoletos. *Informes de la Construcción*, 66(536), e040. <http://doi.org/10.3989/ic.14.060>
- (20) Greco, Claudio (2014). *Pier Luigi Nervi: Dai primi brevetti al palazzo delle esposizioni di Torino 1917-1948*. Ravena (Italia): Quart edizioni.
- (21) Société des ingénieurs civils (1900). Mémoires et compte-rendu des travaux de la société des ingénieurs civils fondée le 4 mars 1848. Vol. 75, 1900, 2e semestre. (pp. 145). <http://cnum.cnam.fr/redir?ECCMC6.74>
- (22) Peña Boeuf, A. (1925). *Mecánica elástica*. Madrid: Talleres Voluntad.
- (23) Peña Boeuf, A. (1930). *Mecánica elástica*. Madrid: Talleres Voluntad.
- (24) Pons-Poblet, J. M. (2016). Mecánica Elástica, por A. Peña Boeuf. Noventa años después. *Revista de Obras Públicas* 163(3576), 59-62. https://quickclick.es/rop/pdf/publico/2016/2016_mayo_3576_07.pdf
- (25) González Capitel, A. (1976). *La arquitectura de Luis Moya Blanco*. [Tesis doctoral, E.T.S. Arquitectura (UPM)]. <http://doi.org/10.20868/UPM.thesis.2861>
- (26) Moya, L. (1928). Las vigas Vierendeel. *Revista de Arquitectura*, 114, 313-317. <https://www.coam.org/media/Default%20Files/fundacion/biblioteca/revista-arquitectura-100/1918-1931/docs/revista-articulos/revista-arquitectura-1928-n114-pag313-317.pdf>
- (27) Lahuerta, J. (1946). Estudio de la viga Vierendeel. *Revista de Arquitectura*, 49-50, 21-28. <https://www.coam.org/media/Default%20Files/fundacion/biblioteca/revista-arquitectura-100/1941-1946/docs/revista-articulos/revista-nacional-arquitectura-1946-n49-50-pag21-28.pdf>
- (28) Transactions of the American Society of Civil Engineers (1932). Vol. 96, No. 1, January 1932.
- (29) Prenzlöw, C. (1958) *Cálculo de estructuras por el método de Cross*. Barcelona: Gustavo Gili.
- (30) Fernández Casado, C. (1957). Construcción, proyecto y cálculo. *Revista de Obras Públicas*, 105, tomo I (2905), 234-238. https://quickclick.es/rop/pdf/publico/1957/1957_tomoI_2905_05.pdf
- (31) Pons, J.M^a. (2017). Cálculo de estructuras reticulares. Carlos Fernández Casado. *Revista de obras públicas*, 3593, 70-81. https://quickclick.es/rop/pdf/publico/2017/2017_diciembre_3593_07.pdf
- (32) Aguirre, A. (1935). La facultad de Filosofía y Letras en la Ciudad Universitaria de Madrid. *Revista Arquitectura*, 2, 35-44. <https://www.coam.org/media/Default%20Files/fundacion/biblioteca/revista-arquitectura-100/1932-1936/docs/revista-articulos/revista-arquitectura-1935-n02-pag35-44.pdf>
- (33) Fernández Casado, C. (1971). El promotor de arquitectura e ingeniería. *Revista Arquitectura*, 154, 11-24. <https://www.coam.org/media/Default%20Files/fundacion/biblioteca/revista-arquitectura-100/1959-1973/docs/revista-articulos/revista-arquitectura-1971-n154-pag11-24.pdf>
- (34) Hormigón estructural, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. (1 de abril de 2023). Carlos Fernández Casado – España (1905 – 1988). http://www1.caminos.upm.es/hormigon/?portfolio_page=fernandez-casado
- (35) Fernández Casado, C. (1934). *Cálculo de estructuras reticulares: nudos rígidos* (1ª ed. Ref.). Madrid: Dossat.
- (36) Fernández Casado, C. (1940). *Cálculo de estructuras reticulares: nudos rígidos* (2ª ed. Ref.). Madrid: Dossat.
- (37) Fernández Casado, C. (1944). *Cálculo de estructuras reticulares: nudos rígidos* (3ª ed. Ref.). Madrid: Dossat.
- (38) Fernández Casado, C. (1967). *Cálculo de estructuras reticulares: nudos rígidos* (8ª ed. Ref.). Madrid: Dossat.
- (39) Fernández Casado, C. (1931). Teoría del arco. *Revista de Obras Públicas*. 79, tomo I (2577), 287-292.

- https://quickclick.es/rop/pdf/publico/1931/1931_tomoI_2577_04.pdf
- (40) Operativa de la aplicación del Método de Cross. Es referenciada en todas las versiones del libro del autor consultadas, sólo con variaciones gramaticales entre ellas.
- (41) Pey Cuñat, A. (1960). *Apuntes de construcciones industriales*. Tarrasa: E.T.S.I.I., S.T.
- (42) FC-083. Taller de montaje para el Instituto de Técnica Aeronáutica (INTA) en Torrejón de Ardoz. Id.: FC-083. Ingeniero: Carlos Fernández Casado. Arquitecto: Luis Cabrera. Empresa constructora: Huarte y Cía, S.L. Fechas: 1943 (Proyecto). 1944 - 1946 (Obra).
- (43) Sánchez del Río, I., Fernández Casado, C. (1951). El taller de montaje del I.N.T.A. en Torrejón de Ardoz II. *Revista de Obras Públicas*, 2830, tomo I, 55-61. https://quickclick.es/rop/pdf/publico/1951/1951_tomoI_2830_02.pdf
- (44) Sánchez del Río, I., Fernández Casado, C. (1951). El taller de montaje del I.N.T.A. en Torrejón de Ardoz I. *Revista de Obras Públicas*, 229, tomo I, 10-19. https://quickclick.es/rop/pdf/publico/1951/1951_tomoI_2829_03.pdf
- (45) FC-064. Edificio Central del Instituto Nacional de Previsión en Madrid Id.: FC-064. Ingeniero: Carlos Fernández Casado. Arquitecto: Javier Barroso; Enrique García Ormaechea. Promotor: Instituto Nacional de Previsión (INP); INP (Instituto Nacional de Previsión). Empresa constructora: Huarte y Cía, S.L. Fecha: 1946 (Proyecto).