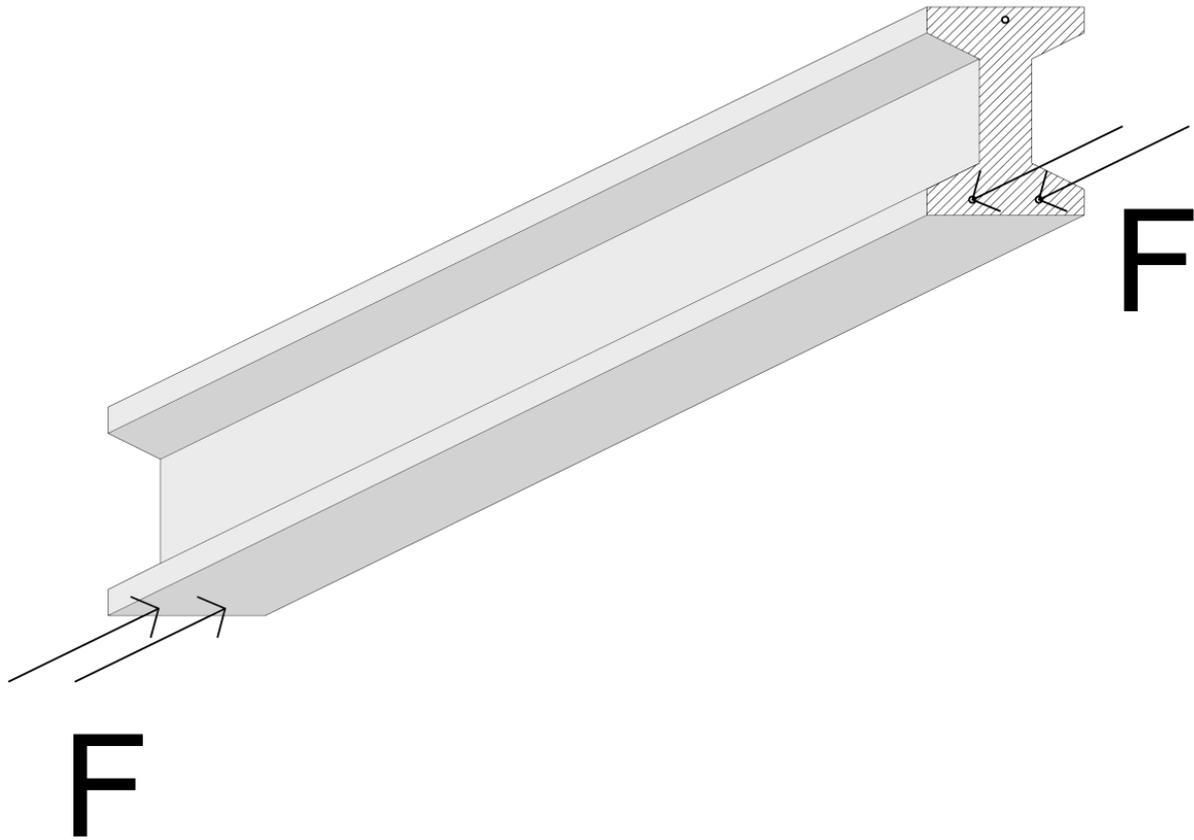


# HORMIGÓN PRETENSADO. PRIMERAS PATENTES.



Autor: Lliteras Barceló, Jaume

Tutor: Dr. Fenollosa Forner, Ernesto Jesús

Curso: 2020-2021

Trabajo Final de Grado

Grado en Fundamentos de la Arquitectura



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR DE  
ARQUITECTURA



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

# Índice

1. Resumen.	3
2. Abstract.	4
3. Objetivos y metodología	5
4. Antecedentes: El hormigón armado.	6
4.1. Pioneros del hormigón armado.	8
5. Concepto del pretensado.	11
6. Hormigón pretensado.	12
6.1. Tipos de pretensados.	12
6.2. Tipos de anclaje.	13
6.3. Ventajas del Hormigón pretensado	13
7. Primeras patentes hormigón pretensado.	15
7.1. Patente P. H. Jackson US 375999 (1886).	15
7.2. Patente W. Doehring US 347474 (1886).	21
7.3. Patente T. A. Lee US 461028 (1891).	24
7.4. Patente F. Chaudy (1894).	28
7.5. Patente M. Koenen US 672379 (1901).	30
7.6. Patente C. R. Steiner (1908).	33
7.7. Patente J.G.F. Lund US 1028578 (1908).	35
7.8. Patente W. Wilson US 1259698 (1918).	40
7.9. Patente W.S. Hewett (1922).	45
7.10. Patente K. Wettstein US 1626318 (1924).	48
7.11. Patente R.E. Dill US 1684663 (1925).	57
7.12. Patente E. Freyssinet US 338864 (1928).	63
7.13. Patentes F. Dischinger US 1940401 (1933).	72
7.14. Patentes G. Magnel (1940).	77
7.15. Patente E. Hoyer (1940).	82
7.16. Patente Abeles US 2645115 (1943).	84
8. Primeras construcciones con hormigón pretensado.	91
8.1. El puente de Veudre de E. Freyssinet	91
8.2. El puente de Boutiron de E. Freyssinet	96
8.3. Acueducto de Tempul de E. Torroja	99
9. Conclusiones.	102
10. Bibliografía.	103

## 1. Resumen

El pretensado es un sistema que nace para la optimización de los recursos al igual que el hormigón armado. Aquí daremos un recorrido por las primeras patentes que intentan introducir la técnica del pretensado en el hormigón armado.

En el recorrido nos centraremos en las innovaciones producidas en cada momento de una forma cronológica en el tiempo. En este trabajo se pretende realizar una búsqueda de como avanza el pretensado y quienes fueron los inventores que hicieron los mayores avances en el campo del pretensado no se pretende afirmar el rigor científico del pretensado mediante cálculos ni probar o desmentir la eficacia de las patentes mencionadas. Explicando y narrando las patentes realizadas por los inventores.

También se pretende explicar algunas de las primeras construcciones construidas mediante este material, así como narrar el proceso y las dificultades debidas a la falta de antecedentes de los pioneros en la construcción de infraestructuras con hormigón pretensado. Como son el puente de Veudre y Boutiron de E. Freyssinet y el Acueducto de Tempul de E. Torroja.

**Palabras clave:** hormigón pretensado, patentes, parte traccionada, sistema de anclaje y deformaciones.

## 2. Abstract

Prestressing is a system that was created to optimize resources like reinforced concrete. Here we will take a tour of the first patents that attempt to introduce the prestressing technique in reinforced concrete.

In the tour we will focus on the innovations produced at each moment in a chronological way in time. This work aims to carry out a search of how prestressing advances and who were the inventors who made the greatest advances in the field of prestressing. It is not intended to affirm the scientific rigor of prestressing through calculations or to prove or deny the effectiveness of the aforementioned patents. Explaining and narrating the patents made by the inventors.

It is also intended to explain some of the first constructions built using this material, as well as to narrate the process and the difficulties due to the lack of antecedents of the pioneers in the construction of infrastructures with prestressed concrete. Such as the Veudre and Boutiron bridge by E. Freyssinet and the Aqueduct of Tempul by E. Torroja.

**Keywords:** prestressed concrete, patents, tensile part, anchoring system and deformations.

### 3. Objetivos y metodología

El objetivo principal del presente Trabajo Final de Grado consiste en la recopilación e investigación de las primeras patentes de hormigón armado. Para llegar a entender el racionamiento seguido por los muchos de los investigadores, casi todos ingenieros, sobre un campo muy complejo como es el hormigón pretensado.

Dentro de este objetivo principal aparecen objetivos secundarios, como son:

- El intento de explicar la patente original de la mejor forma posible. Utilizando los propios dibujos realizados por los diversos autores.
- Otro objetivo es mostrar cómo se avanza en un campo, el hormigón pretensado en el trabajo que nos atañe, y el periodo de perfeccionamiento que tiene ese concepto o idea que nace de un desconocimiento enorme. A demás, patente a patente se van solucionado diversos problemas o aparecen más alternativas.
- Este trabajo no pretende entrar en el campo del cálculo de las estructuras, sino que profundiza y pretende mostrar la gran reflexión teórica que hay en las estructuras sin entrar a evaluar su eficacia exacta que se desarrollaría mediante una base de cálculo.
- Un objetivo más es dar a conocer investigadores que sus patentes no resultaron eficaces, pero posteriormente su trabajo dio lugar a un descubrimiento.

La metodología seguida para el desarrollo del trabajo se basa en un par de apartados.

Primer apartado que es una introducción al hormigón pretensado donde se hace una búsqueda histórica de los materiales que lo forman como son el acero y el hormigón. Luego en el mismo apartado destaco los primeros y algunos de los más importantes investigadores del hormigón armado, así como sus respectivas patentes.

Posteriormente en los siguientes capítulos el 5 y el 6 se intenta explicar de una forma breve el concepto del pretensado y los tipos de pretensado que existen. Se explican todas las formas de aplicar el pretensado a las armaduras, los diferentes anclajes que existen y una comparación entre en comportamiento estructural del hormigón pretensado y el hormigón armado. Estos apartados aun entrarían en la introducción, ya que es una explicación breve de algunos conceptos que pueden ayudar a una mejor y más rápida comprensión del trabajo.

El grueso del trabajo se desarrollará en el capítulo 7 el cual tendrá 16 subapartados que son los 16 investigadores que consiguieron una patente sobre hormigón pretensado. El capítulo esta ordenado cronológicamente por el año que patento cada investigador su primera patente. Los subcapítulos constan de una explicación de la patente original, así como de numerosas ilustraciones para mejorar su comprensión.

Después, le sigue un capítulo el 8 donde se exponen 3 de los primeros ejemplos de construcciones de una gran relevancia, donde el autor comprende perfectamente el concepto del pretensado. En este apartado se recogen una pequeña descripción de la construcción, el proceso de diseño de la construcción, así como el proceso de ejecución de la construcción.

Y finalmente, expongo mis conclusiones sobre el trabajo realizado.

#### 4. Antecedentes: El hormigón Armado.

El hormigón es un material utilizado desde la antigüedad por las civilizaciones antiguas de Asia, Egipto y en obras importantes de los griegos y los romanos. El hormigón está formado por la combinación de tres materiales: un aglomerante, áridos y agua. Ahora en la actualidad el aglomerante es el cemento Pórtland los áridos son una combinación de arena y gravas, agua y una serie de aditivos para mejorar sus propiedades tanto para su mejor aplicación, como para mejorar sus características resistentes o de durabilidad.



*Ilustración 1 Muros del Coliseo Romano / Mayo de 2013 . Image © José Tomás Franco*

Para el hormigón pretensado deberán utilizarse, en general, hormigones de alta resistencia de las calidades B 25 hasta B 55, la denominación del hormigón hace referencia primero la letra a la consistencia que en este caso es la letra B que significa blanda y el numero hace referencia a la resistencia característica del hormigón (en el caso de pretensado en banco, por lo menos B 35), para que los acortamientos por contracción y fluencia lenta, que originan pérdidas del esfuerzo de pretensado, queden limitados a valores reducidos. En las estructuras de hormigón pretensado, adamas, puede aprovecharse la alta resistencia a compresión de estas calidades de hormigón, mejor que en las estructuras de hormigón armado. las altas calidades de hormigón proporcionan también una mayor resistencia a la corrosión. El agua de amasado, en lo posible, no debe contener cloruros (contenido Cl < 600 mg/litro). Los aditivos requieren un permiso especial para el hormigón pretensado(LEONHARDT 1967).

El hormigón armado nace de la incapacidad del hormigón para trabajar a flexión, ya que el hormigón por sí mismo, solo es capaz de trabajar de forma óptima con esfuerzos de compresión, debido que su resistencia a tracción es prácticamente nula.

El principal inconveniente del hormigón consiste en su escasa resistencia a tracción, tan escasa que puede prácticamente considerarse nula, resistencia a la tracción, motivo por el cual, en la mayoría de los proyectos de obras de este tipo, la totalidad de los esfuerzos de tal naturaleza se asigna a la armadura de la sección, de donde se deduce que todo el hormigón situado en la zona de tracciones es completamente inútil a estos efectos(Leonhardt 1986).

Por la falta de resistencia a tracción del hormigón, a este se le añade un material que posee una gran resistencia a tracción como es el acero. A finales del siglo XIX, se desarrollan multitud de sistemas para optimizar el uso del hormigón armado.

En sentido estricto, no puede decirse que el hormigón armado sea un nuevo material, pues tanto el hierro como el hormigón son conocidos y utilizados desde hace muchos siglos, pero la asociación o amalgama de ambos en los siglos XIX y XX revoluciona el arte de la construcción. Ciertamente, ningún material ha producido una revolución tan acusada de los procedimientos constructivos como el hormigón armado(Alonso Pereira 2013).

Aunque los primeros ensayos se realizaron en la primera mitad del XIX, no fue hasta finales de siglo cuando se extendió su empleo por toda Europa, a partir de las patentes perfeccionadas y difundidas desde 1880 por los franceses François Coignet (1814-1888) y Joseph Monier (1823-1906) y sobre todo por François Hennebique (1843-1921) que llegó a contar con numerosos agentes o representantes de su patente por todos los países al finalizar el siglo (Alonso Pereira 2013).

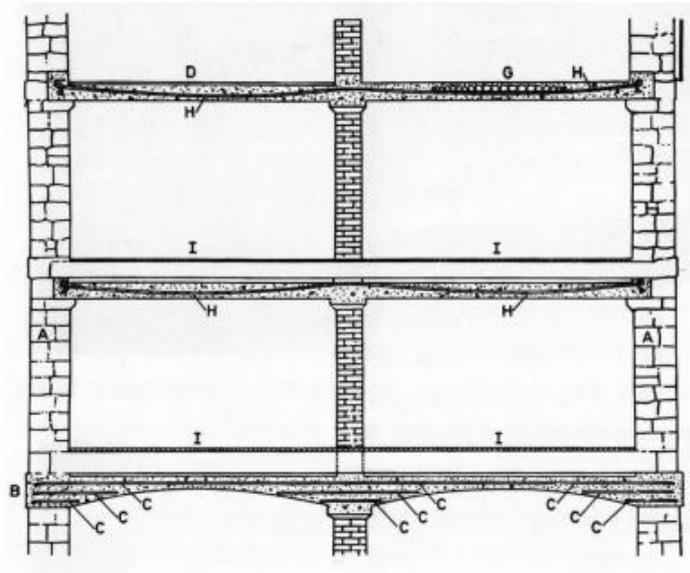
Uno de ellos, ya a principios del siglo XX, será el concepto del presentado posteriormente. El hormigón pretensado se desarrollará de la mano del investigador francés Freyssinet. Luego numerosos investigadores, como Magnel, Hoyer, Doehring, Dischinger y más, desarrollarán y perfeccionarán más este concepto.

#### 4.1 Pioneros del hormigón armado.

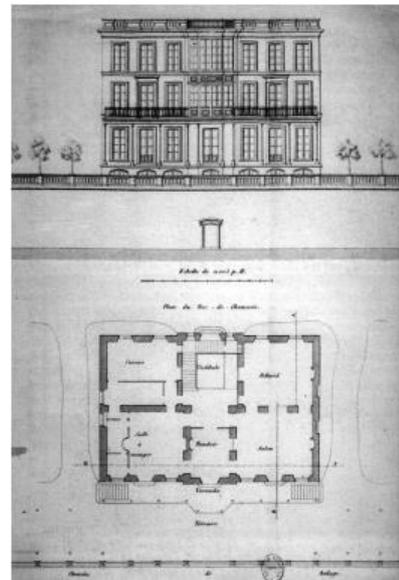
El ingeniero inglés William Boutland Wilkinson es conocido como el inventor del hormigón armado. Antes de la invención Wilkinson era un diseñador y constructor de ornamentación y molduras de yeso y hormigón conocido en la época como piedra artificial.

Wilkinson conocedor del comportamiento de las estructuras de la época, tanto de madera como de metal, contra el fuego se dispone a inventar un sistema que sea capaz de resistir contra incendios. En 1854 consigue patentar un sistema que lo titula “La mejora de la construcción de viviendas, almacenes y otros edificios resistentes al fuego”.

La invención se basaba en la creación de lo que hoy en día conocemos como una losa bidireccional con casetones de yeso como encofrado perdido. Wilkinson colocaba las barras entre los casetones y vertía el hormigón que una vez fraguado adquiriría un comportamiento muy bueno a la flexión. Fue el primero en disponer armaduras inferiores resistentes a flexo tracción en los nervios de la losa, y realizó varios ensayos de deformación de sus estructuras, algo inusual en la época (Valenzuela 2015).



*Ilustración 3 Patente de Wilkinson*



*Ilustración 2 Planos de la casa construida según la patente de Wilkinson*

Consiguió utilizar su patente en la construcción de una casa, combinándolo con elementos de la construcción clásica como pueden ser los muros portantes de ladrillos o de piedra.

Utilizó su modelo estructural en una vivienda en Newcastle en 1865, y constituyó una próspera empresa que mantuvo activa hasta principios del siglo XX, pero nunca llegó a formalizar un sistema integral de construcción en hormigón armado (Valenzuela 2015).

Otro de los primeros en patentar una invención basada en la combinación entre acero y hormigón fue el ingeniero industrial francés François Coignet. En 1852 Coignet embebió dentro de una losa de hormigón una viga metálica una vez fraguado el hormigón se sorprendió del gran comportamiento de su invención y su posible comercialización en el mundo de la construcción.

En 1853 edificó con su patente una casa que dos años más tarde fue inspeccionada por un jurado, pero este declaró que la casa presentaba dudas sobre la seguridad estructural. Lejos de rendirse, el 1855 presenta su trabajo en la exposición de París y en 1856 consigue patentar su invención para el armado del hormigón.

Finalmente, Coignet presentará todos sus trabajos bajo el nombre de Beton-Coignet: "Description of the Material and its Uses in France and America".

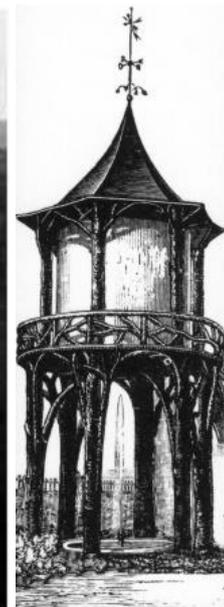
Thaddeus Hyatt también puede considerarse como uno de los padres del hormigón armado, ya que en 1877 el ingeniero industrial neoyorquino publica "An Account of Some Experiments with Portland-Cement-Concrete Combined with Iron". En ese libro podemos deducir que entiende perfectamente el funcionamiento del hormigón debido que argumenta que debe armarse las partes traccionadas además de disponer barras verticales en las zonas cercanas al soporte para soportar el cortante. También es conocedor de que el acero y el hormigón tienen un coeficiente de dilatación térmica muy similar (Valenzuela 2015).

Posteriormente, aparece Joseph Monier jardinero francés que ayudará en el desarrollo del hormigón armado. En 1867 patenta un "sistema de cajas-barreños móviles, en hierro y cemento, aplicables a la horticultura" el cual es un sistema de fabricación de jardineras mediante mallas metálicas y hormigón.

Después de los grandes resultados obtenidos, Monier desarrollará más patentes relacionadas con el hormigón armado. Finalmente, en 1886, después de conseguir la patente de "sistema de construcción de casas fijas o portátiles, higiénicas y económicas de hormigón y hierro", construirá en París una casa utilizando sus invenciones.



*Ilustración 4 Depósito de Puigverd contruido por Frances Macià i Llussà, con el sistema Monier.*



*Ilustración 5 Castillo de agua y kiosko Pivert en Pon-torson construido con el sistema Monier.*

Progresivamente las patentes fueron multiplicandose debido a la gran viabilidad económica que tenía la invención. El hecho deriva en que a finales del siglo XIX aparecen patentes destacadas como las de Cottancin, Mèlan, Ransome, Hyatt, Hennebique, Möller, Wüncsc o Matrai. Las que más destacarán será la del francés François Hennebique en Europa y la del inglés Ransome en Estados Unidos.

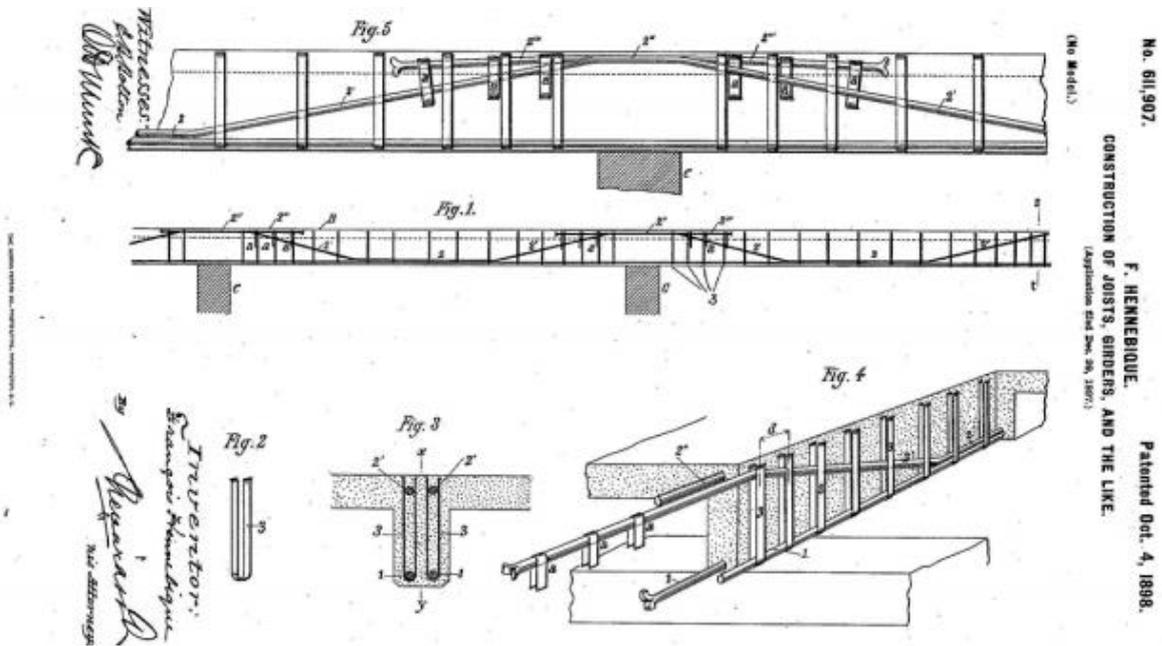


Ilustración 6 Patente de Hennebique US 611907 (1907)

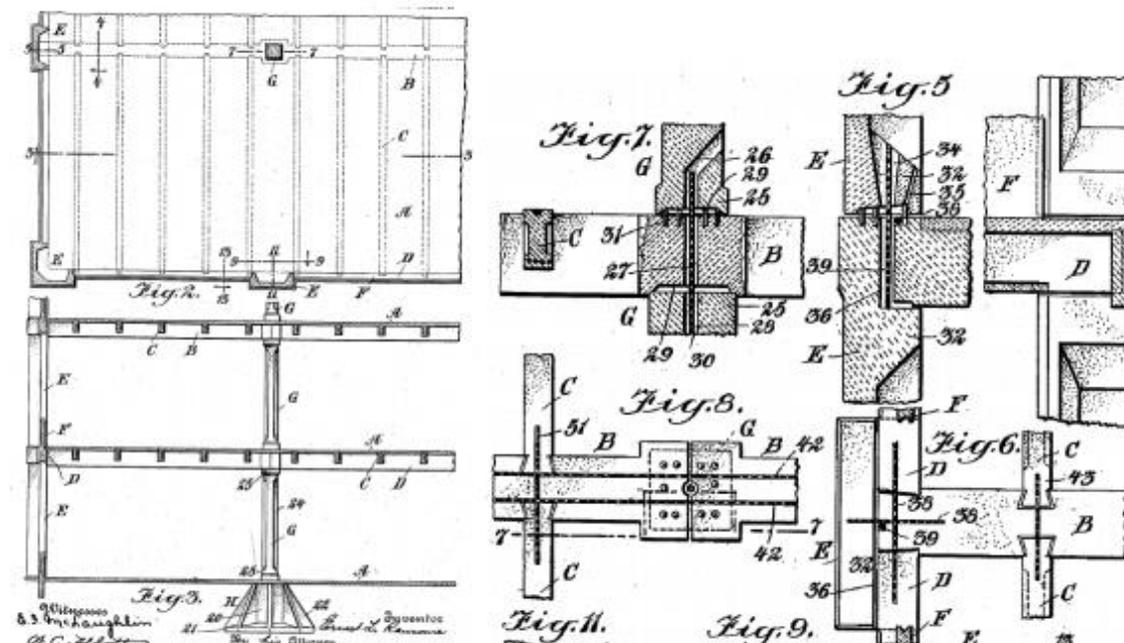


Ilustración 7 Patente de Ransome US 305226 (1884)

## 5. Concepto de pretensado.

Para la comprensión de las primeras patentes del hormigón pretensado es oportuno el conocimiento del concepto de pretensar una estructura.

Pretensar una estructura consiste en introducir acciones exteriores (acciones de pretensado) de modo que, superpuestas a las cargas exteriores, provocan que el régimen tensional de la estructura se transforme en otro que, por cualquier razón, interese más. (Cobo Escamilla 2010)

Este concepto nos proporciona una solución muy eficaz para que la estructura trabaje como deseamos introduciendo acciones de pretensado que nos ayude a optimizar los materiales utilizados en la construcción de la estructura.

En el hormigón pretensado se aplica una carga  $v$  por debajo del eje de simetría de la sección que la comprime provocando que la sección de hormigón tenga una gráfica de tensiones con la parte inferior comprimida y la parte superior un poco traccionada aún sin haber entrado en carga. Como se puede ver en la Ilustración 9.

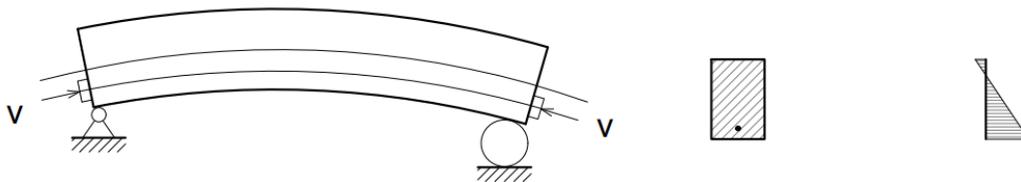


Ilustración 8 Concepto pretensado

Posteriormente, cuando la sección entra en carga, carga  $p$ , proporciona una gráfica de tensiones propia de la flexión, es decir en parte superior aparecen compresiones y en la parte inferior tracciones, pero como tenemos las tensiones provocadas por el pretensado estas se compensan dando resultado a una gráfica de tensiones de la sección totalmente comprimida.

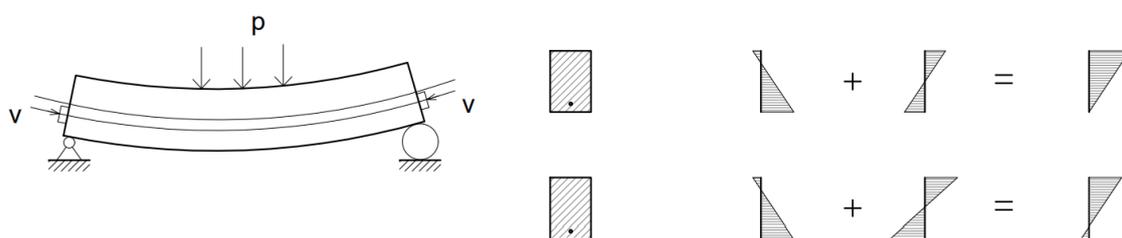


Ilustración 9 Concepto pretensado

Esta solución puede optimizarse aumentando la carga, por consiguiente, las tensiones propias de la flexión, esto provoca que la gráfica de tensiones varíe y aparezcan tracciones en la parte inferior de la sección que puede ser asumidas por armaduras o por la propia sección, como se puede apreciar en la ilustración 9.

## 6. Hormigón Pretensado

### 6.1. Tipos de pretensados.

El pretensado con adherencia inmediata o pretensado en banco (prestressed) es el pretensado más utilizado ya que se usa en la fabricación de las piezas de hormigón pretensado prefabricado. Como pueden ser losas alveolares, viguetas y muchas más. El sistema es sencillo como describe Leonhardt.

Se produce por tensado del acero, antes del endurecimiento del hormigón. Los alambres de acero se tesan entre dos bloques de anclaje fijos, y se hormigonan en este estado. En esta forma se origina una adherencia directa entre el acero para pretensado y el hormigón. Después de un endurecimiento suficiente del hormigón, se sueltan los extremos de los alambres de los bloques de anclaje, de modo que el esfuerzo de tesado se transmite al hormigón, por adherencia o a través de elementos de anclaje.

Pretensado con adherencia posterior (post-tensioned), también llamado postensado, es un pretensado ya que las cargas exteriores o de tensado son introducidas antes de que la estructura entre en cargas de servicio.

El acero para pretensado se coloca suelto en canales de deslizamiento o de tesado, en general en vainas (ducts), durante el hormigonado, y es tesado y anclado en los extremos después de endurecido el hormigón. La adherencia se establece, después del pretensado, inyectando en las vainas mortero de cemento (grout, injection mortar) que también sirve como protección contra la corrosión.

Pretensado con adherencia, se utiliza un procedimiento similar al anterior, es decir, el acero para el tensado se coloca en vainas, el acero es tesado, posteriormente se inyecta un mortero en las vainas. El cuál es el encargado mediante la adherencia de mantener el pretensado.

Pretensado sin adherencia. El acero se coloca dentro de las vainas, es tesado, posteriormente anclado, los anclajes son los encargados de mantener el esfuerzo de tesado.

Hormigón pretensado sin adherencia (p.c., with unbonded tendons). El acero para pretensado puede deslizarse dentro de las vainas. Este estado se presenta, entre otros casos, durante el tiempo que transcurre entre el pretensado y la efectividad de la adherencia posterior. Se puede prescindir de esta adherencia cuando la armadura de acero para hormigón se dimensiona con amplitud para asegurar la capacidad portante y la capacidad de servicio. En este caso el acero para pretensado debe ser protegido contra la corrosión dentro de la vaina. Los elementos tensores sin adherencia facilitan su reemplazo en caso necesario.(LEONHARDT 1967)

## 6.2. Tipos de anclaje.

Los primeros anclajes de la época en el hormigón pretensado, a modo general, se conocen tres tipos, el más utilizado es sin ninguna duda el anclaje por adherencia del acero de tesado con el hormigón, luego los utilizado en el postensado que son los anclajes mediante cuerpos de anclaje y anclajes de los extremos mediante lazos. Los anclajes mediante cuerpos de anclaje suelen utilizarse para mantener el postensado en la parte donde se aplicó la fuerza de tesado mediante un gato hidráulico

Anclaje de los extremos por adherencia con el hormigón: anclaje por adherencia(Leonhardt 1986).

Anclaje de los extremos mediante cuerpos de anclaje, en general chapas de acero, a los cuales se fijan los tensores mediante tuercas, cuñas, cabezas recalcadas o medios Similares(Leonhardt 1986).

Anclaje de los extremos mediante lazos, ganchos o formas similares, embutidos en el hormigón(Leonhardt 1986).



Ilustración 10 [https://www.wikiwand.com/es/Hormig%C3%B3n\\_postensado](https://www.wikiwand.com/es/Hormig%C3%B3n_postensado)

## 6.3. Ventajas del Hormigón pretensado

El hormigón pretensado por el contrario que parezca, por su concepto de introducir más cargas en los elementos de una estructura presenta una gran cantidad de ventajas respecto al hormigón armado. Según Fritz Leonhardt presentan cinco ventajas claras.

1. El hormigón pretensado permite, por el aprovechamiento de materiales de altas resistencias (aceros y hormigones), adoptar mayores luces y estructuras más esbeltas, con un peso propio menor que el del hormigón armado(Leonhardt 1986).

El mayor aprovechamiento de la sección de hormigón permite reducirla eso provoca que la estructura sea más esbelta y de un peso propio mucho menor. Que se traduce en un ahorro de materiales además de poder asumir luces mucho mayores.

2. El pretensado mejora la capacidad de servicio, debido a que se reduce considerablemente la fisuración del hormigón o por lo menos, pueda limitarse con seguridad el ancho de las fisuras a un valor inocuo. Esto aumenta la durabilidad(Leonhardt 1986).

Otra ventaja muy clara es la reducción de la fisuración del hormigón, que aparecen en la parte traccionada del hormigón al reducir al mínimo esta parte. La reducción de la fisuración provoca que las armaduras están más protegidas y que el hormigón sea más impermeable, también provocado por los hormigones utilizados en el pretensado que suelen ser hormigones de alta resistencia de entre 35 y 50 MPa. Estos factores provocan un aumento considerable en la durabilidad.

3. Las deformaciones se mantienen muy reducidas porque las estructuras, sometidas a las cargas de servicio, prácticamente permanecen con flechas negativas, aun para un pretensado parcial(Leonhardt 1986).

Las piezas de hormigón pretensado antes de ser puestas en carga muchas veces presentan flechas negativas. Por eso cuando se ponen en carga, estas se compensan. Provocando que las flechas finales son mucho menores que las obtenidas en estructuras de acero o hormigón armado sin pretensar.

4. Las estructuras de hormigón pretensado tienen una elevada resistencia a la fatiga, porque las amplitudes de oscilación de las tensiones en el acero se mantienen reducidas, aun para un pretensado parcial, manteniéndose por ello muy por debajo de la resistencia a la fatiga.(Leonhardt 1986)

Si entendemos la resistencia a la fatiga como la capacidad que posee el hormigón pretensado para soportar una serie de ciclos de carga/descarga, donde la carga siempre es menor a la resistencia última del material. El hormigón pretensado al someterse al estudio de la resistencia a la fatiga se puede observar que las tensiones en el acero no varían mucho en amplitud, por ello se la resistencia a la fatiga del hormigón pretensado es muy buena.

5. Las estructuras de hormigón pretensado pueden soportar excesos de carga considerables sin sufrir daños permanentes. Las fisuras que se producen por excesos de carga vuelven a cerrarse completamente siempre que las tensiones en el acero se mantengan por debajo del límite 0,01 %.(Leonhardt 1986)

El hormigón pretensado cuando se carga en exceso sin sufrir daños permanentes debidos al acero traccionado hace que las posibles fisuras que aparecieron por el exceso de carga se cierren debido al pretensado, es decir, el propio tensado que es una fuerza axil en la sección de hormigón hace que las fisuras creadas para aguantar el esfuerzo a flexión del hormigón se cierren cuando esta carga ya no está. Siempre que el acero aguante.

## 7. Primeras Patentes

### 7.1. Patente P. H. Jackson US 375999. (1888)

La primera patente de Jackson sobre el pretensado data de 1858 (ilustración 11). En esta patente Jackson patenta una cercha de acero pretensada que consiste en un suelo que se compone de un cordón superior formado por dichas planchas de fundición, un cordón inferior formado por una barra lisa de acero en tensión, y unos montantes de fundición (2 extremos y 2 intermedios) que unen ambos cordones (Sanabra-loewe and Capellà-Ilovera 2014). En su patente primero no se colocan los montantes intermedios eso da lugar a la aparición de un cordón inferior tensado que provoca momentos negativos uniformes en el cordón superior. Posteriormente se añaden los montantes intermedios, pero cortos. De este modo se fuerza el cordón superior hacia abajo. Según Sanabra y Capellà, el resultado es bastante ineficaz, ya que a pesar de que en la primera fase el pretensado es bastante correcto, en la segunda fase se anula casi por completo el efecto beneficioso del primer pretensado(Sanabra Loewe 2014).

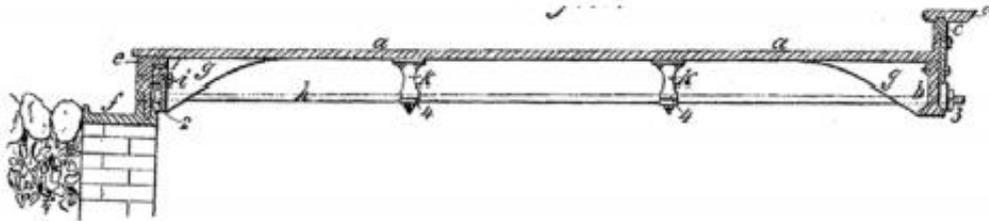


Ilustración 11 Patente de P.H. Jackson (1858)

En 1882, propone una estructura similar a una cercha, pero esta vez con el cordón superior en forma de arco hecho de fundición igual que los montantes. Al igual que le sucedería en la patente de 1858 el cordón superior esta flexionado, eso hace que el método de P.H. Jackson no sea eficaz.

Anteriormente en 1872, hace una patente sobre un sistema de arcos pretensados los arcos según los dibujos y la descripción de la patente parecen de fábrica de ladrillo, aunque prevé que los materiales puedan ser de otros materiales que tengan resistencia contra los incendios: se sobreentiende piedras artificiales, hormigones, etc. En la patente de 1872 (ilustración 12) se ve en los dibujos y en la descripción dos detalles el primero es la abertura en un muro. En este detalle el elemento descrito funciona como una viga de gran canto y el pretensado podemos deducir que funcionará de manera eficaz, aunque en la descripción realizada por Jackson no aparece esta reflexión por eso deducimos que a la hora de realizar la patente no tenía claro cómo funcionaba su invento. Esta afirmación queda más evidente cuando observamos el segundo detalle en el cual vemos un arco con una barra de pretensado colocada de forma horizontal que atraviesa el arco. Aquí el pretensado en lugar de beneficiar, empeora el comportamiento de la estructura ya que el arco no queda pretensado en la zona de más tracciones.

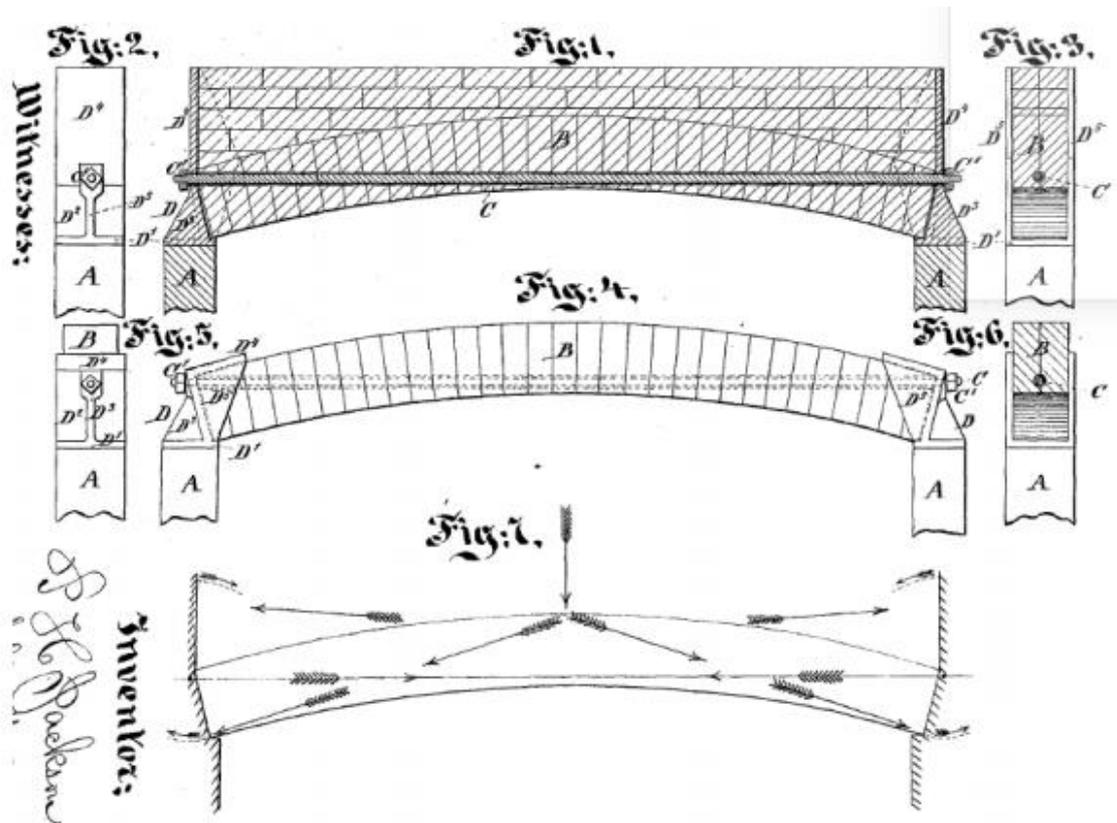


Ilustración 12 Patente de P.H. Jackson (1872)

La primera patente de hormigón pretensado es la de P.H. Jackson en 1886 y aceptada en 1887 (ilustración 14). La patente con título "Building or Bridge Construction, 1887" es una solución muy diferente a como lo conocemos hoy. El próximo año, 1888 patenta otra variante de suelo o techo "Construction of artificial-stone or concrete pavements"

Las patentes de 1887 y 1888 (ilustración 15 y 16) narra la creación de una losa, suelo o techo de piedra artificial u hormigón. La losa presenta una serie de arcos estando los apoyos de los arcos, unidos por una barra de acero, mediante amarres provistos de anclajes de rosca o de cuña. El arco se comprime mediante la fuerza ejercida por los anclajes al material, hormigón o piedra artificial. Provocando la disminución de la luz de los arcos. Este sistema es muy parecido a cómo funciona una cercha, es decir, el cordón inferior se tensa para minorizar las cargas de tracción en el cordón inferior. Un concepto ya utilizado en Estados Unidos como los entramados pretensados como las cerchas Whipple (ilustración 13).

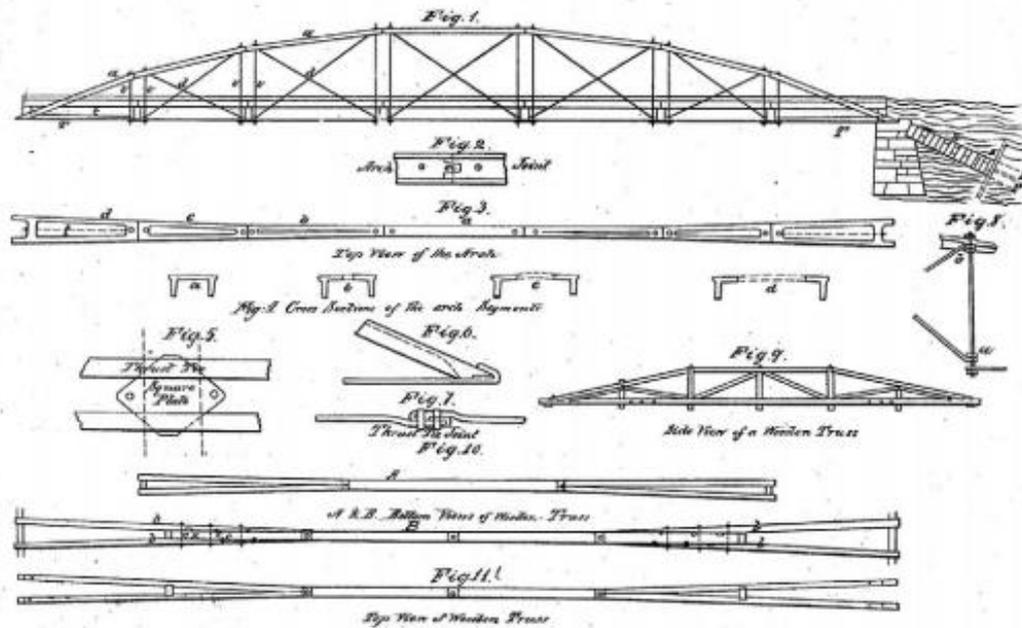


Ilustración 13 Patente Whipple US 2064 (1841).

Jackson en su patente aclara que las barras deben colocarse en la parte inferior del arco. Las uniones se unen al material de cierre mediante cemento hidráulico u otro cemento fuerte, o con el mismo material plástico que se ha utilizado para realizar el arco. La barra de hierro o acero, o elemento que estará traccionado según él no requiere preparación alguna puede utilizarse cualquier perfil conformado en frío. Ya que esta no actúa por adherencia como, sino que está anclado en los extremos, mediante cuerpos de anclaje.

Las principales diferencias entre las patentes es que en la de 1887 parece proponer un sistema de tensado bidireccional es decir aparecen barras de tensión en las dos direcciones y la segunda innovación más destacable es que tanto en los dibujos como en la descripción parece apostar por el hormigón.

La patente de 1888 destaca por ser la primera vez que se utiliza el pretensado colocado en la parte inferior de la sección esta realizada en piedra artificial o hormigón. Además, es la primera en la que encontramos vainas, tan utilizadas ahora en el postensado, aunque en esta patente solo las utiliza en los extremos de los arcos o bóvedas, es decir solo son vainas parciales, las cuales su función es evitar la adherencia del hormigón con la barra de tensión y facilitar así el proceso de tensado.

A pesar de que la vaina no es completa (sólo está en los extremos), es evidente que Jackson detecta el problema y apunta en la buena dirección para resolverlo. Además, propone el empleo de tensores, para incrementar la tensión de los tendones en caso de necesidad. Con ello está indicando que posiblemente intuye la existencia de pérdidas, y propone tímidamente un sistema de retesado.(Sanabra Loewe 2014)

A pesar de que seguramente construyó algún edificio con alguna de sus patentes hoy en día no se conoce ningún edificio con estos sistemas constructivos diseñados por P.H. Jackson.

A pesar de que seguramente construyó diversos ejemplares de estos techos pretensados a mediados y finales de la década de 1880, probablemente abandonó la idea, dada la competencia que significaron para él las propuestas de hormigón armado convencional de Ernest L. Ransome (Wermiel 2009).

Lo más destacable de la aportación de Jackson al pretensado a estructuras es su perseverancia, fue el primero en aplicar el tensado a estructuras portantes de edificios debido que tenía la intención de expandir el negocio familiar una empresa de productos metálicos. Aunque Jackson no consigue verdaderamente una solución eficaz su empeño y dedicación durante más de 30 años eso le llega a figurar en un libro enciclopedia sobre construcción muy consultado en la época el (Kidder, 1895). Así ganará reconocimiento e inspirará a más ingenieros americanos para desarrollar el pretensado.

En cierto modo, Jackson puede compararse a Coignet, puesto que, a pesar de su enorme precocidad, sus invenciones en el campo de las estructuras están hechas más desde la intuición que desde el rigor ingenieril, y que en realidad buscan incrementar las ventas de una materia prima más que comprender un funcionamiento estructural. (Sanabra Loewe 2014)

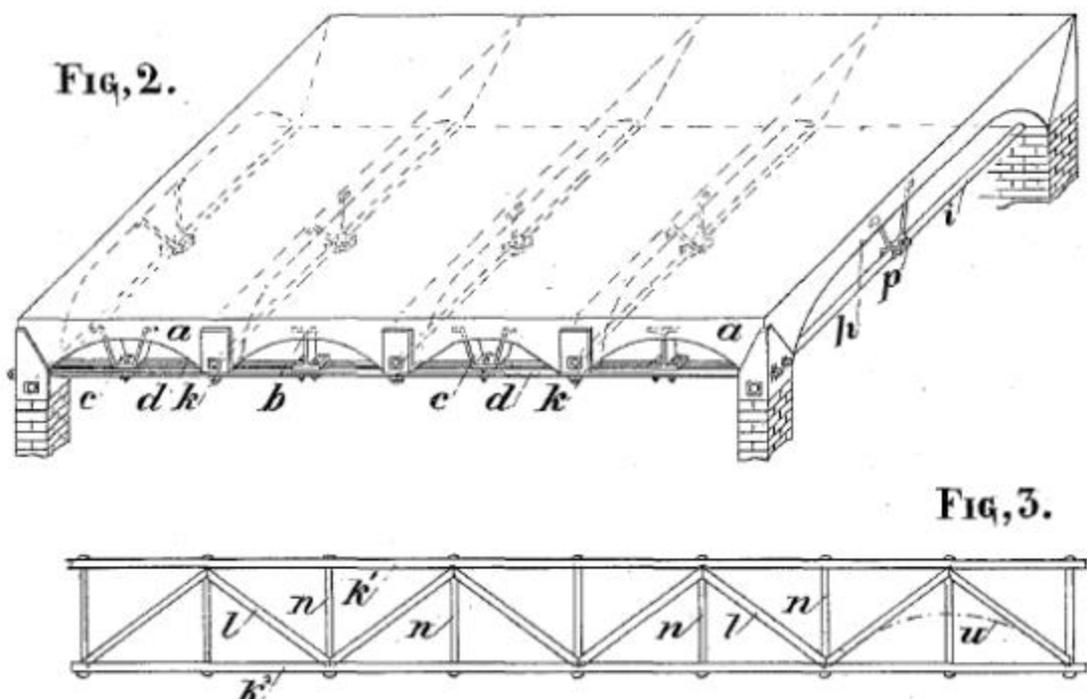


Ilustración 14 Patente de P.H. Jackson (1886-87)

En la ilustración 14 Jackson compara una cercha con su suelo.

(No Model.)

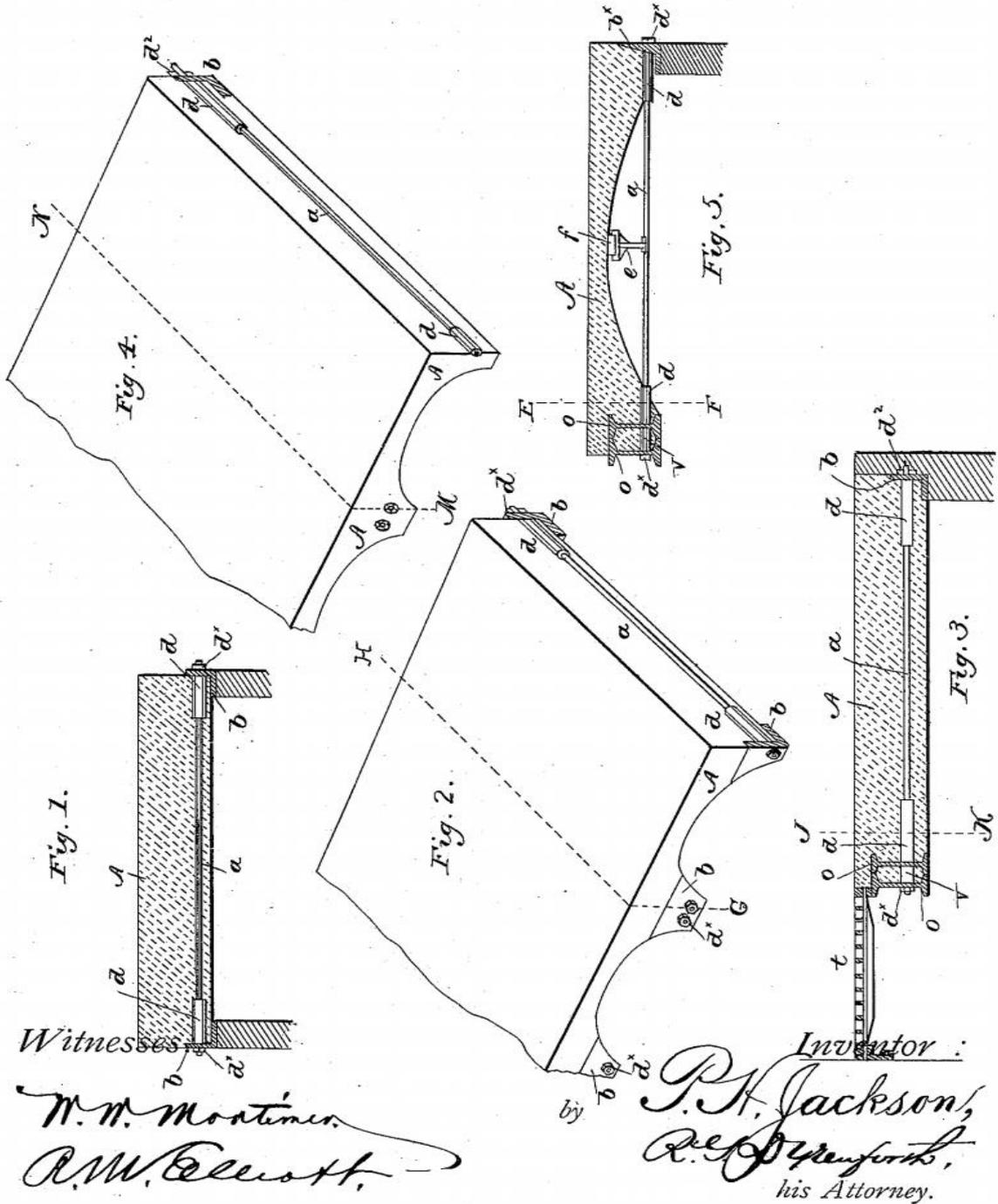
2 Sheets—Sheet 1.

P. H. JACKSON.

CONSTRUCTION OF ARTIFICIAL STONE OR CONCRETE PAVEMENTS.

No. 375,999.

Patented Jan. 3, 1888.



N. PETERS, Photo-Lithographer, Washington, D. C.

Ilustración 15 Patente de P.H. Jackson US 375999. (1888) pág.1

(No Model.)

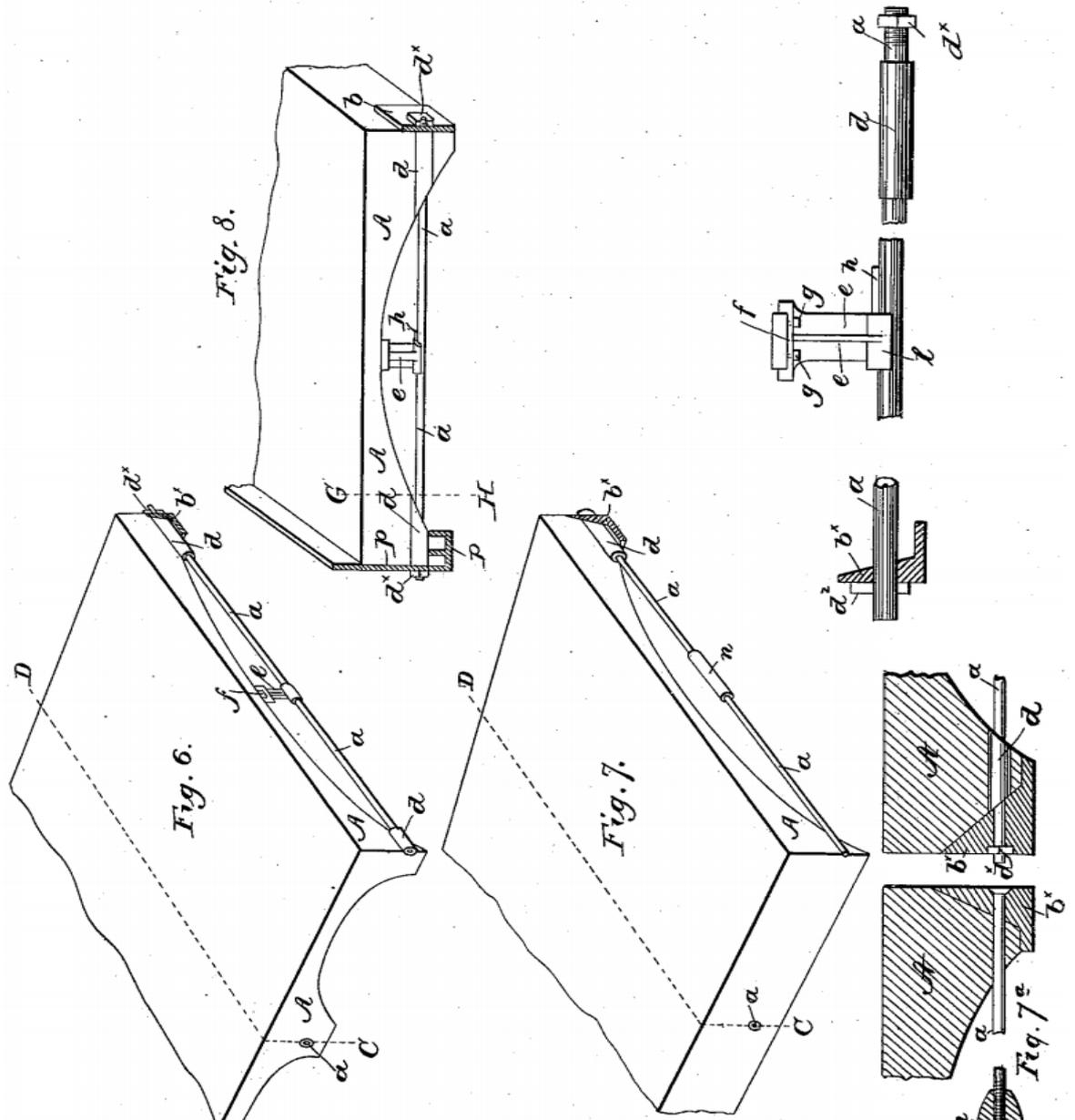
2 Sheets—Sheet 2.

P. H. JACKSON.

CONSTRUCTION OF ARTIFICIAL STONE OR CONCRETE PAVEMENTS.

No. 375,999.

Patented Jan. 3, 1888.



Witnesses:

*M. W. Mortimer*  
*A. W. Everett*

Inventor:  
*P. H. Jackson*  
 by *A. W. Everett*  
 his Attorney.

N. PETERS, Photo-Lithographer, Washington, D. C.

Ilustración 16 Patente de P.H. Jackson US 375999. (1888) pág.2

## 7.2. Patente W. Doehring No. 49024 (1888).

Doehring ingeniero de Prusia que trabaja para una empresa alemana de losa y vigas realiza una patente de hormigón pretensado in situ. En esta patente el pretensado no cumple una función estructural sino solo de protección contra incendios.

La patente que solicita C.F.W. Doehring narra la construcción y la función de unos tablonos o paneles triangulares de mortero con alambres traccionados en su interior. (Ayats Calsat 2004) El funcionamiento de los paneles contra incendios según Doehring era que una fuerza de tracción haría que tanto el mortero como los alambres previamente estirados rompiesen en el mismo momento.

El pretensado se hace mediante alambres, y se le considera el primero en proponer prefabricados pretensados. A pesar de la humildad de la propuesta de Doehring, es curioso como en el redactado de la patente hay un párrafo con reflexiones bastante físicas o “mecánicas”, y son quizás lo que induce a algunos autores a considerarlo un precursor. Dice en este párrafo que con el pretensado quiere lograr que el mortero y el acero se comporten como un solo material, y evitar que el hormigón se rompa antes que al acero cuando éste todavía tiene una gran parte de su capacidad resistente desaprovechada. A pesar de esta sugestiva frase que leída aisladamente puede parecer premonitoria, al leer el razonamiento completo de Doehring, vemos que en realidad no tiene nociones suficientes de estructuras y no comprende bien las ventajas del pretensado. (Sanabra Loewe 2014)

Doehring en el proceso de la fabricación de los paneles confía en la adherencia entre el mortero y los alambres.

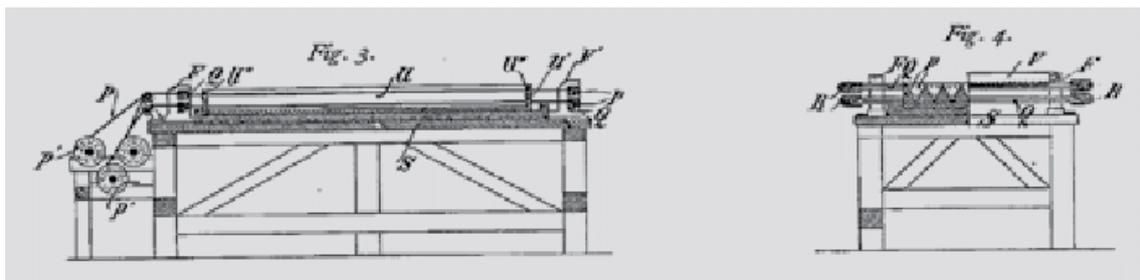


Ilustración 17 Patente de C.F.W. Doehring (1888).

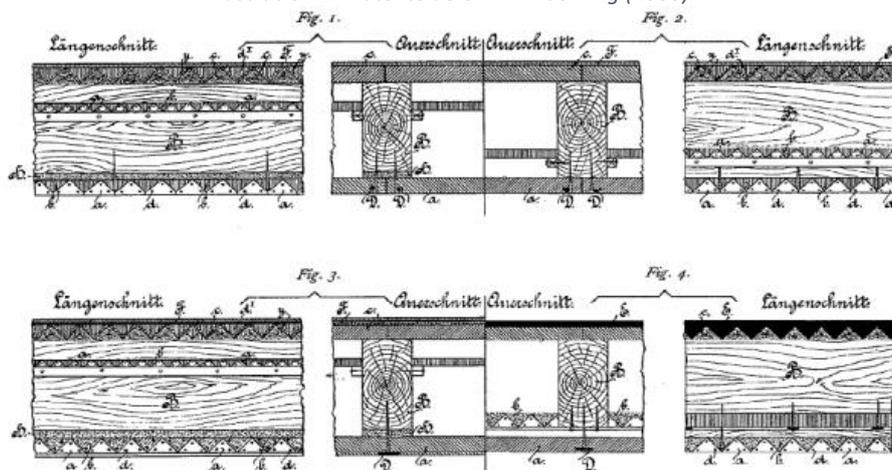


Ilustración 18 Patente de C.F.W. Doehring (1888).

(No Model.)

2 Sheets—Sheet 1.

C. F. W. DOEHRING.  
FIRE PROOF CEILING AND FLOOR.

No. 347,474.

Patented Aug. 17, 1886.

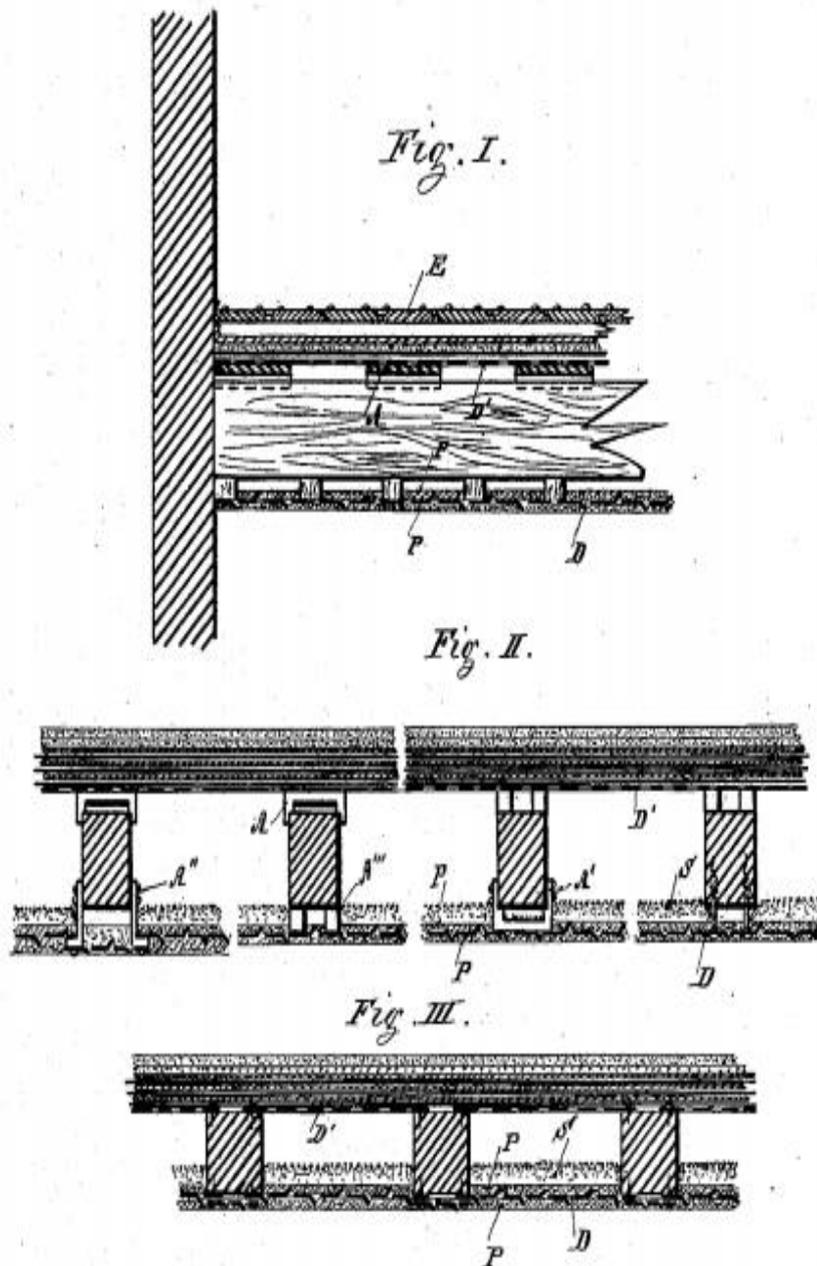


Ilustración 19 Patente de C.F.W. Doehring US 347474 (1886) pág.1

(No Model.)

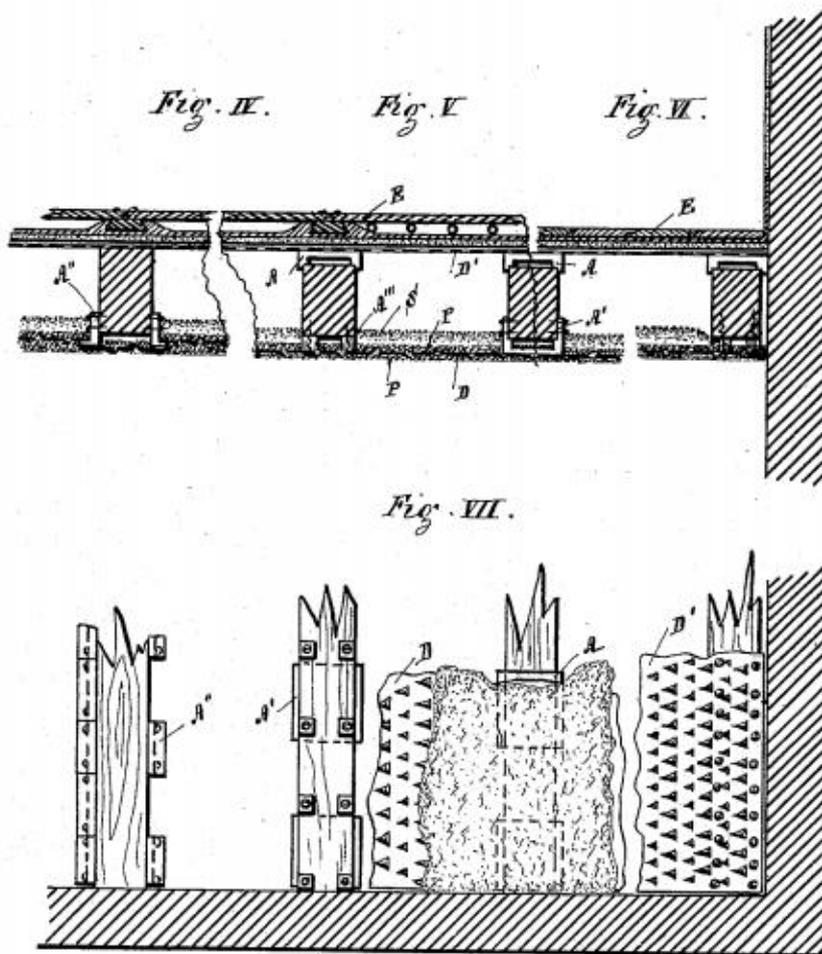
2 Sheets—Sheet 2.

C. F. W. DOEHRING.

FIRE PROOF CEILING AND FLOOR.

No. 347,474.

Patented Aug. 17, 1886.



*Witnesses.*  
*Robt. H. Roy,*  
*Thos. Turner*

*Inventor.*  
*C. F. W. Doehring,*  
*per Rooder & Priddy*  
*Attorneys*

H. PETERS, Photo-Lithographer, Washington, D. C.

Ilustración 20 Patente de C.F.W. Doehring US 347474 (1886) pág.2

### 7.3. Patente T. A. Lee US 461028 (1891).

La patente de Thomas A. Lee del estadounidense “Viga artificial a prueba de fuego para pisos y cubiertas”. También trata como la de Doehring de la protección contra el fuego un tema al orden del día seguramente por la proximidad de los años entre el gran incendio de Chicago 1871 y las patentes antes mencionadas 1888 y 1891 (ilustración 21). Pero en este caso la patente de Lee si es un elemento estructural concretamente es una viga pretensada.

La idea del invento es la de crear una vigueta ignífuga que traslade las cargas del forjado a la viga o muro portante. Entonces esta patente sería la primera idea que hubo para las viguetas pretensadas muy extendido en la construcción aun en la actualidad siendo este uno de los métodos más utilizados para construir forjados en España. Aunque en esta patente se utilizan bloques y en la actualidad son de hormigón prefabricado.

El invento consta de bloques como se puede observar en sección en la figura1 (ilustración 21), que están unidos entre ellos mediante un cemento y los bloques tiene una cavidad por donde pasa la varilla de tensión, esta cavidad funciona a modo de vaina, y luego esta cavidad es cementada.

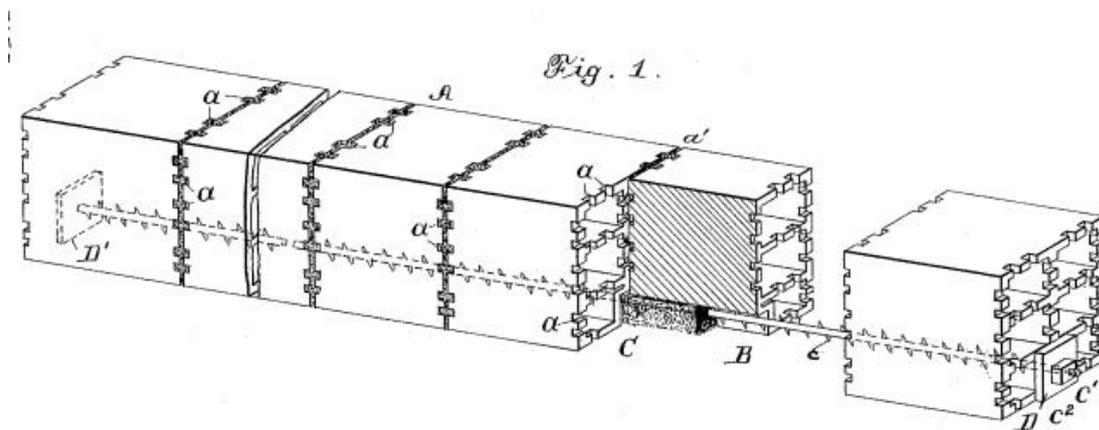


Ilustración 21 Figura 1 patente T.A. Lee US 461028 (1891).

Lee describe la forma de los bloques que son preferiblemente cúbicos con todas las caras opuestas paralelas entre sí. Las caras de contacto entre bloques se les hace unas hendiduras a-a' a todas las aristas para aumentar la superficie de contacto entre cemento y bloque. De esta forma se garantiza una perfecta unión entre los bloques.

Los bloques en la superficie inferior se le hace una cavidad para que pueda recibir cemento y la varilla de tensión. La cavidad se entiende por todos los bloques de la vigueta. Con este procedimiento la varilla de tensión es continua de extremo a extremo de la vigueta, sobresaliendo un poco en cada extremo de la viga.

La varilla de tensión es, salvando las distancias, lo que hoy día conocemos como barra corrugada, es decir, la varilla no es lisa, sino que tiene rugosidades o pequeños salientes para mejorar la adherencia con el cemento. Lee con este sistema garantiza la adherencia de la varilla con los bloques.

El proceso constructivo es que en la cavidad hecha en la serie de bloques se coloca la varilla, posteriormente se cementa la cavidad con la varilla que sobresale por los extremos en los

que se coloca una arandela. La barra de tensión tiene los dos extremos roscados, donde se colocan las tuercas de sujeción o de apriete.

Estas tuercas son las encargadas de traccionar la barra y al mismo tiempo comprimir los bloques. Es decir, pretensar la vigueta.

Esta misma patente Lee también dibuja y describe el mismo sistema de bloques y barra traccionada, pero en lugar de tener solo una barra traccionada tiene dos. En este sistema también coloca una especie de estribos entre la unión de los bloques para que las barras trabajen juntas.

También hace una recomendación del material que se debe de utilizar. Para los bloques destaca el uso de material ignífugo como los bloques de arcilla, aunque afirma que se puede sustituir por otro material, como bloques manufacturados de paja, papel, cemento, yeso, etc.(Lee 1891)

Según Sanabra Lee está muy influido por la patente de Jackson de 1872.

Su propuesta parece especialmente influida por la de Jackson de 1872, en que la elección del diseño se justifica por su resistencia al fuego y en que Jackson insiste en la posibilidad de emplear cualquier material no combustible y resistente para la formación de sus arcos pretensados.(Sanabra Loewe 2014)

Lee seguirá investigando y publicando varias patentes más, estas tendrán más atención sobre las armaduras. Una de las más interesantes en este aspecto es la que obtiene en 1894 (ilustración 22, 23 y 24) para formar cordones de 2 y 4 alambres para la armadura pretensada para sus sistemas de techos pretensados ignífugos (Lee T. A., Tension-rod, 1894).(Sanabra Loewe 2014)

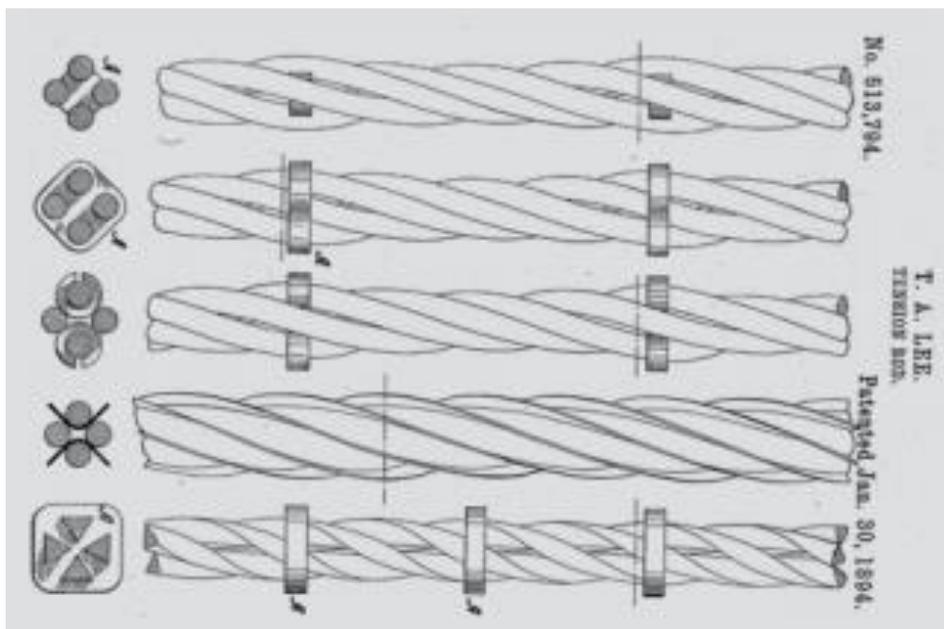


Ilustración 22 Patente T.A. Lee US 513794 (1894)

Lee innova utilizando por primera vez los alambres para pretensar, aunque los materiales de la época no son muy buenos ya que el límite elástico no es suficientemente alto para que el pretensado sea muy eficaz. A pesar de ello Lee empieza aumentar sustancialmente el límite elástico del acero utilizado para pretensar la estructura. Se estima que el nivel de pretensado de los techos de Lee es relativamente bajo, dado que las piezas solían ser huecas y que a menudo empleaba piezas cerámicas y no de hormigón. (Sanabra Loewe 2014)

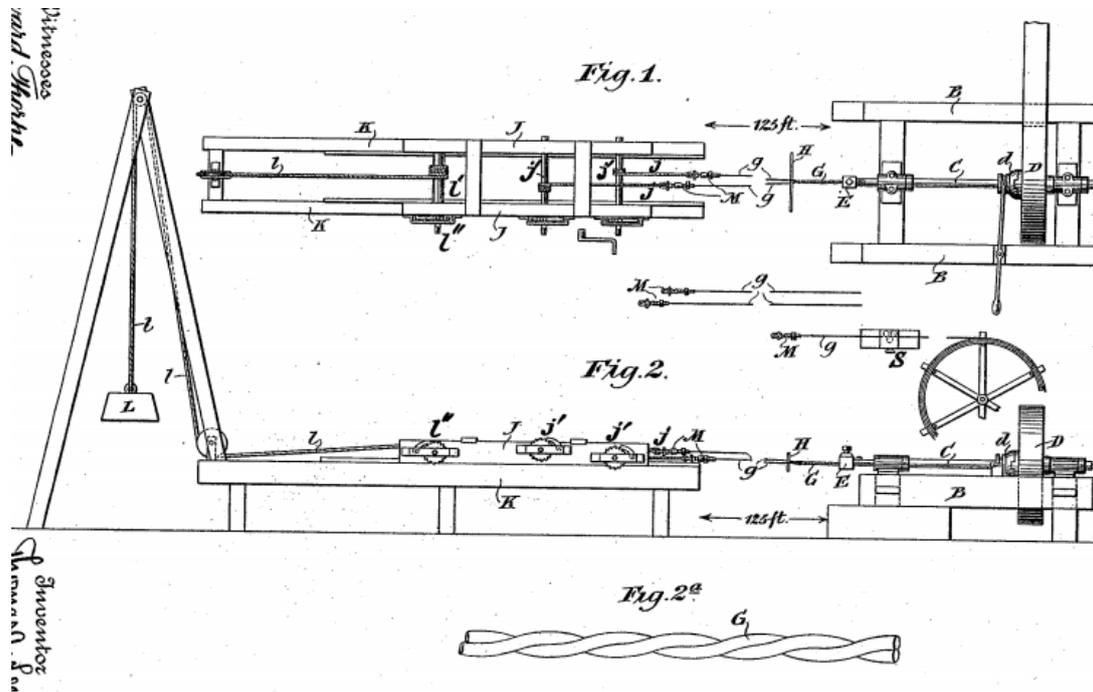


Ilustración 23 Patente T.A. Lee US 513794 (1894)

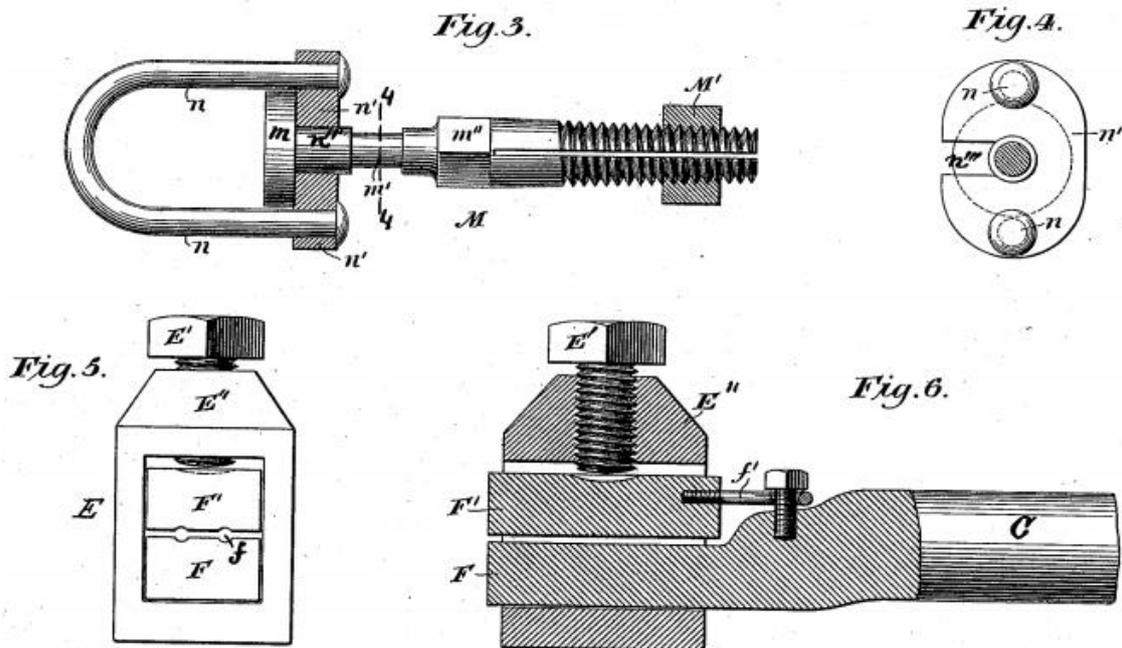


Ilustración 24 Patente T.A. Lee US 513794 (1894)

Las patentes de Lee al igual que las de Jackson recibirán reconocimiento y difusión gracias a la aparición de estas en los libros de la enciclopedia de Kidder, gracias a ello Lee fundará su propia empresa “Lee Fire Proof Construction Company”.

Ambas patentes pueden considerarse el ancestro de un tipo estructural que años más tarde, en las décadas de 1940 y 1950 tendría un éxito considerable. Esta tipología, conocida como Dox Plank (Vander Heyden, 1954) (Dolhon, 2008), llegaría a constituir un sector industrial en Estados Unidos con diversos productores, una asociación nacional y centros de distribución en casi todos los estados de la federación. Cabe destacar, que bajo la denominación Dox Plank se acogían un número bastante heterogéneo de productos, todos muy en la tradición de Lee. Una gran mayoría de ellos empleaban piezas cerámicas huecas y niveles bajos de pretensado, pero también había algunos sistemas de dovelas de hormigón con niveles mayores de pretensado (Sanabra Loewe 2014).

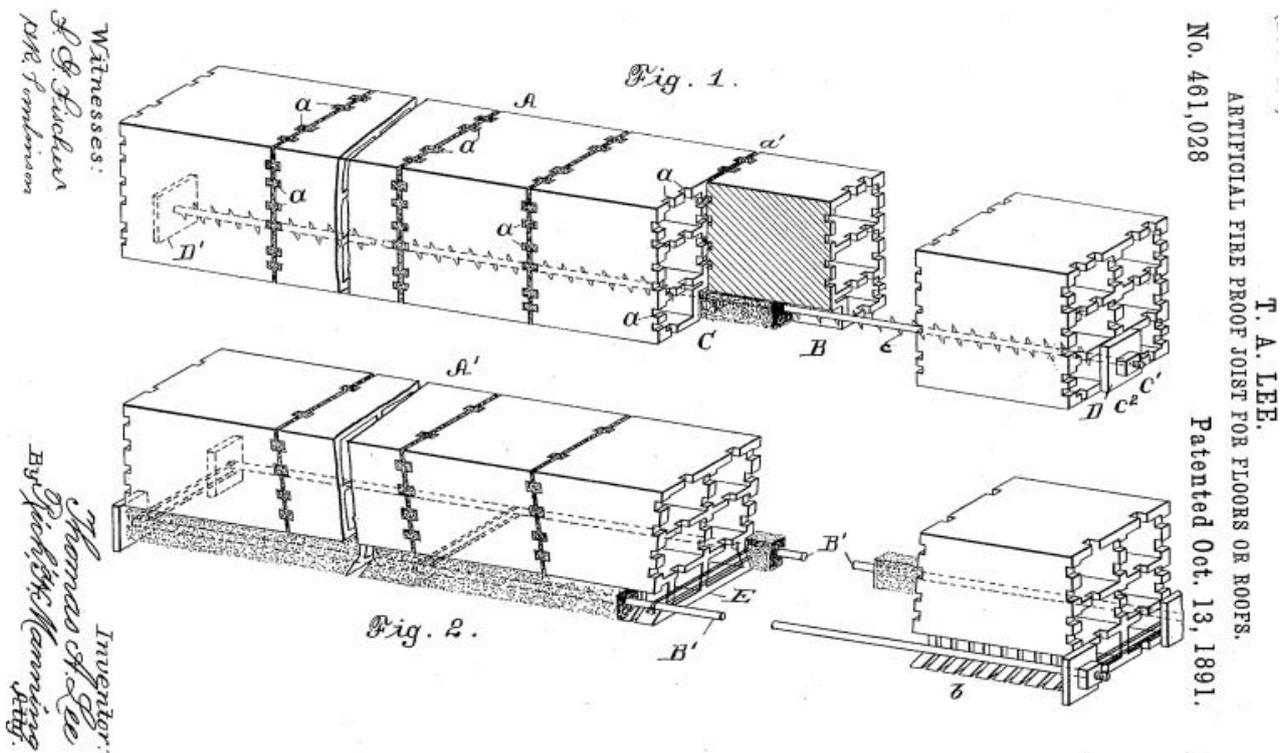


Ilustración 25 Patente T.A. Lee US 461028 (1891)

#### 7.4. Patente F. Chaudy (1894).

François Chaudy, un ingeniero francés, en 1894 (ilustración 26 y 27) desarrollará una viga de hormigón postensado, la viga consiste en un elemento de sección rectangular con una barra de acero colocada siempre por debajo del eje de simetría horizontal de la sección. La principal dificultad con la que se encuentra Chaudy es que los aceros utilizados en esa época no poseen un límite elástico lo suficientemente alto para que el pretensado aguante y no quede rápidamente anulado por las pérdidas.

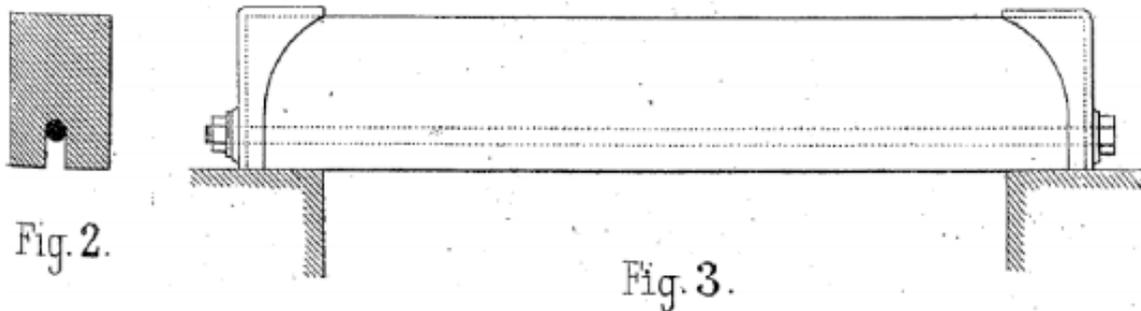


Ilustración 26 Patente de F. Chaudy (1894)

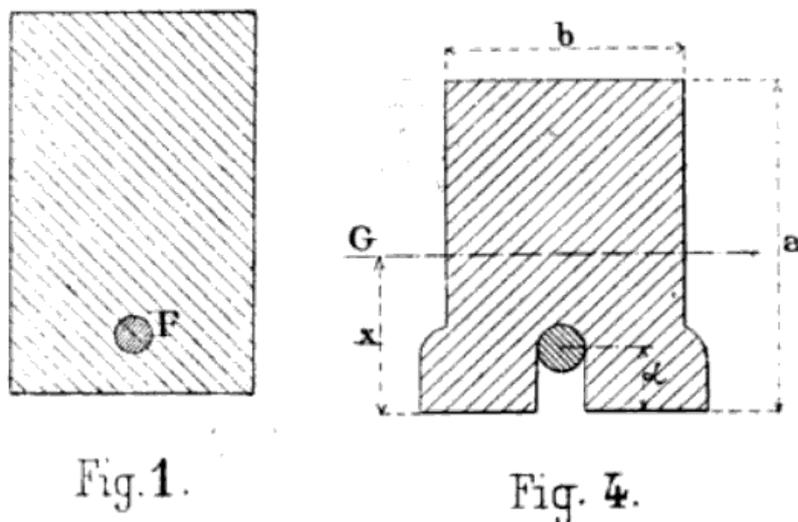


Ilustración 27 Patente de F. Chaudy (1894)

En una publicación de "Mémoires et compte-rendu des travaux de la Société des ingénieurs civils de France" aparece el artículo "Sur le calcul des plaques élatiques minces et le role des tirants dans les poutres en ciment armées" de F. Chaudy. Un artículo donde habla del cálculo de una viga de hormigón armado.

En el artículo habla sobre las armaduras de las vigas de cemento armado. Las armaduras que se incorporan en la parte inferior de la viga principalmente. Para Chaudy describe el problema que tiene el hormigón, debido al bajo coeficiente de elasticidad que posee, ya que

el acero tiene un coeficiente de elasticidad entre 10 y 40 veces superior al del hormigón. Dependiendo del acero y el cemento utilizado. Para ello propone su método o sistema que pretende minimizar este problema. Para el principal culpable es la colocación de la barra de acero, ya que afirma que hasta la fecha no se coloca la barra para que esta desempeñe todo su papel real. Para él, la forma correcta sería estirar la barra antes de que la viga reciba ninguna carga repartida que provocará una flexión, es decir, la parte inferior estaría traccionada y la parte superior comprimida. La barra sería la encargada de comprimir la parte traccionada de la viga mediante una muesca longitudinal para acomodar el hierro que así queda libre y ya no empotrado en los extremos auxiliares de masa sólida de la viga coloquemos dos tapas de hierro fundido que el hierro redondo cruzará. La barra en su extremo esta roscada por es permite apretando una tuerca, entre las cuales se ha colocado una tapa y una o más arandelas elásticas Grover Belleville, etc. Las tuercas se aprietan hasta que las arandelas se aplanan por completo. El efecto de apretar la tuerca se verá traducido al aplicar compresiones a la parte inferior de la viga de hormigón(des ingénieurs civils de France 1894).

Aunque la idea era buena no resulta muy eficaz debido a la baja resistencia del acero de la época. Ya que las pérdidas serán superiores al tensado conseguido(Sanabra Loewe 2014).

La patente antes explicada de Chaudy como la de Mandl no recibieron mucha difusión por eso son poco conocidas, pero ambas son de vital importancia al igual que la de Rabut.

El ingeniero Austriaco Julius Mandl en 1896 propondrá una invención que se parece mucho a la ya propuesta por Chaudy. Si las comparamos detalladamente podemos observar la influencia de la patente de Chaudy sobre la invención de Mandl. Por el contrario, también se pueden observar diferencias destacadas. Estas diferencias nos dan lugar a una mayor comprensión de los beneficios del pretensado por parte de Mandl.

El autor es el primero en sugerir la utilización de alambres de acero pretensados en elementos estructurales como son losas de hormigón. Además, apunta que la situación más óptima de colocación de dichos alambres es la parte inferior de la sección, es decir, la parte traccionada de la sección del elemento resistente.

Esta propuesta parece también estar influida por la patente realizada por Doehring 8 años anterior a la de Mandl, el primero no demostró en ningún caso una intención de diseño estructural en su propuesta, a diferencia del segundo(Sanabra Loewe 2014).

También estudia la pérdida del pretensado en los elementos pretensados tanto Mandl como Koenen. Pero su conclusión es errónea ya que atribuye la pérdida de pretensado debido al acortamiento elástico del hormigón sometido a esfuerzos de compresión.

7.5. Patente M. Koenen US 672379 (1901).

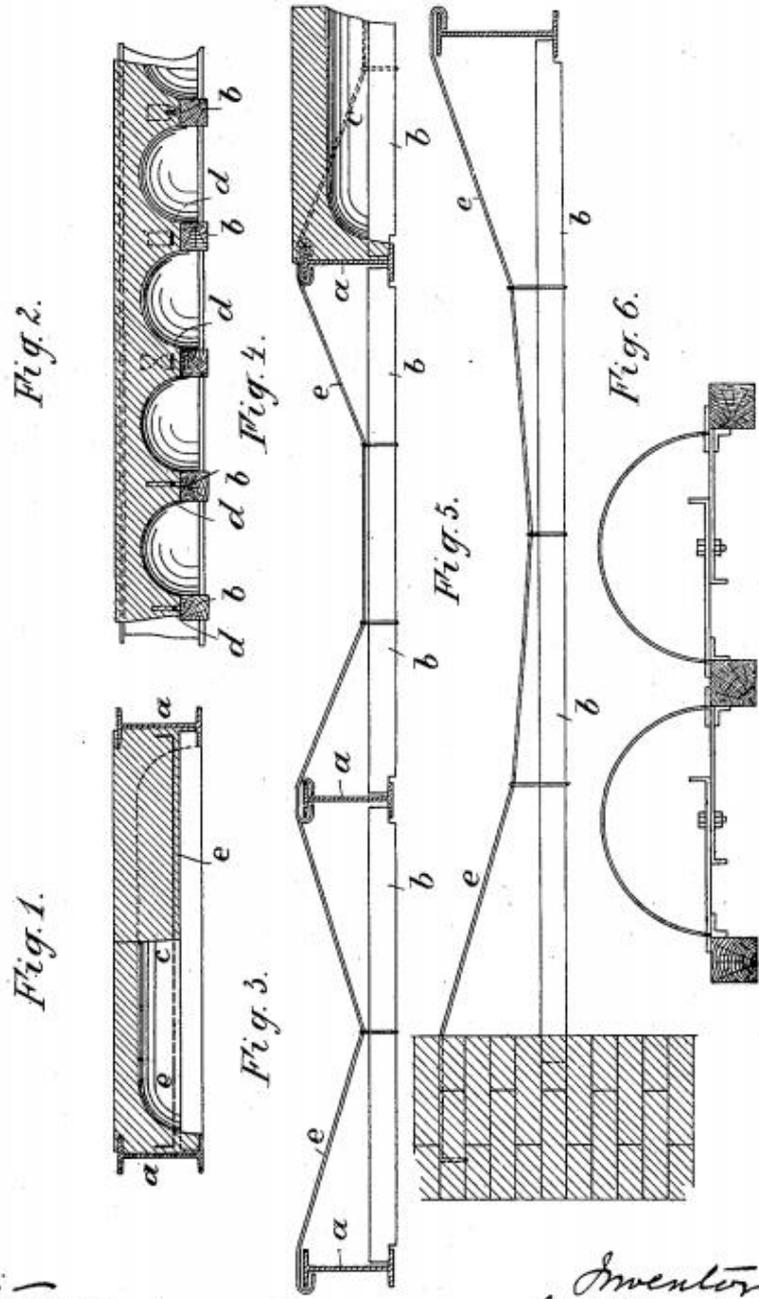
No. 672,379.

Patented Apr. 16, 1901.

M. KOENEN.  
MANUFACTURE OF FLOORS.

(Application filed Sept. 1, 1900.)

(No Model.)



Witnesses  
H. G. G. G.  
H. M. Gillman, Jr.

Inventor  
Matthias Koenen  
by John Freeman  
Attorney

THE MERRILL PETERSON CO. PHOTO-LITHO. WASHINGTON, D. C.

Ilustración 28 Patente M. Koenen US 672379 (1901).

Mathias Koenen es un ingeniero civil alemán que en 1886 publica un artículo donde describe un método de dimensionamiento de elementos a flexión de hormigón armado (Koenen, Grundgedanken der Bemessung, 1886)(Sanabra Loewe 2014). Después desarrollara un par de patentes en el campo del pretensado.

Koenen en la descripción de su patente cita tres patentes anteriores la primera la patente suiza nº 6533, que define como composición de suelo provista de nervaduras de refuerzo y vigas de madera en su base para la fijación del techo Koenen dice que esta patente no está diseñada para soportar la flexión y que aún necesita patrones de bóvedas y andamios especiales. La segunda que cita una patente de los Estados Unidos nº 520490 que trata de un suelo formado por vigas de hierro con nervaduras y cavidades. Ahora bien, afirma que el sistema no tiene ningún elemento que resista las deformaciones por flexión, ya que en la patente aparecen barras redondas de hierro incrustadas en el suelo. Estas barras según Koenen no resisten los esfuerzos a flexión, sino que solo trabajan al esfuerzo a tracción de la sección. La última que menciona es la patente Nº74937 de 1895 que describe el piso nervado Koenen. En esta patente se describe el uso de nervaduras macizas con soportes o vigas de hierro para compensar las tensiones de tracción, colocándose vigas de madera en los rebordes inferiores de dichos soportes para la fijación del techo y a través de las nervaduras. Una vez las nervaduras estén terminadas i endurecidas.

La patente de Koenen de 1902 (ilustración 28) consta de un forjado realizado en hormigón en el que se empotran vigas metálicas de la manera convencional el suelo posee nervaduras colocadas encima de las viguetas de madera como podemos observar en las figuras 1 y 2 de los planos que acompañan a dicha patente. Koenen afirma que las viguetas de madera, donde apoyan las nervaduras, son las encargadas de soportar las deformaciones por flexión.

En la descripción de la patente cabe destacar el análisis que hace sobre el fraguado y la pérdida de peso por el mismo proceso de endurecimiento del hormigón. Por el peso del suelo de composición fresca, las vigas o viguetas de madera se someten a una tensión de flexión elástica o similar a un resorte proporcional al peso que descansa sobre ellas(Koenen 1901). Luego prosigue explicando que la viga que antes estaba curvada por la tensión de flexión, remite por la pérdida de peso, debido a la pérdida de agua, durante el proceso de fraguado que da lugar a una tensión de flexión de la viga en sentido contrario que ejerce presión sobre el forjado ya fraguado, aunque no es de mucha importancia.

La figura 6 podemos ver un sistema que impide el movimiento horizontal de las viguetas de madera y los arcos un poco al estilo de la patente americana de Jackson. Donde impide que el arco incremente el diámetro al entrar en carga. Este dibujo de Koenen está formado por un arco semicircular que apoya en dos viguetas de madera, las cuales están unidas por dos piezas metálicas en forma de L que están atornilladas a las viguetas y entre sí.

Posteriormente en 1906, Mathias Koenen. A petición de Labes (Leonhardt, Spannbeton für die praxis, 1954), siguiendo el método descrito por Carl von Bach (Fernández Ordóñez, 1978), llevó a cabo en la Technische Hochschule de Stuttgart, una serie sistemática de ensayos para pretensar la armadura de elementos de hormigón. Los hizo en busca de una solución para la limitación de la fisuración (por motivos de durabilidad) que imponía la primera norma alemana de hormigón. La carga aplicada al acero era cercana a 600 kp/cm<sup>2</sup>, y quedaba prácticamente anulada por las pérdidas de pretensado tal y como explica el mismo Koenen (Leonhardt, Hormigón pretensado, 1967). Él pensaba que estas pérdidas eran

fundamentalmente debidas a la retracción tal y como explica en un artículo publicado al año siguiente (Koenen, 1907). Poco después la norma alemana eliminó la restricción de la fisuración en el hormigón, de modo que Koenen también acabó perdiendo el interés por el asunto.

Finalmente, Mathias Koenen en 1912. Propuso un método -ineficaz- para contrarrestar la retracción, basado en hormigonar el elemento estructural en 2 fases. Primero se hormigonaría la mitad inferior (pretensada) del elemento y luego la mitad superior, esperando que la retracción de la segunda fase causara una precompresión adicional sobre la primera fase que anulara los efectos de la retracción de la primera fase (Koenen, Verfahren zur Erzeugung einer Anfangsdruckspannung in der Zugzone von Eisenbetonbalken oder platten, 1912)(Sanabra Loewe 2014).

## 7.6. Patente C. R. Steiner (1908)

El ingeniero americano Charles R. Steiner obtendrá en 1908 una patente (ilustración 30) que permitirá aplicar pretensado en las zonas donde el hormigón se encuentra traccionado, su invento tendrá aplicación en múltiples sistemas constructivos sobre todo estructurales, ya sea en la realización de pórticos, techos planos, techos nervados, arcos atirantados, conductos, depósitos, muros de contención y multitud de elementos sometidos a flexión. La patente pretende la compensación de las tensiones de tracción producidas por la retracción.

C.R. Steiner es el primero en proponer un sistema en el cual se prevé aplicar pretensados según el hormigón se va fraguando para así compensar las tensiones de tracción por la retracción. Pretende conseguirlo aplicando un pretensado al poco tiempo de haber vertido el hormigón, un segundo pretensado a los pocos días del hormigonado y posteriores pretensados los días siguientes al segundo.

Steiner aplica el pretensado a una edad en que considera que la adherencia acero-hormigón es despreciable (resultando la armadura no adherente) pero en que la resistencia a compresión sería ya lo bastante apreciable como para soportar las cargas de compresión en los anclajes extremos. El resultado sería una armadura no adherente durante el tesado, pero sí adherente al completarse la adquisición de la resistencia del hormigón(Sanabra Loewe 2014).

En su invento aparecen dos nuevas ideas que hasta hoy en día son considerados validos como son por un lado el empalme solape de las armaduras como podemos apreciar en sus dibujos de la patente y el otro son las cabezas de los anclajes están ocultas o embebidas en el hormigón esto lo consigue ya que la cabeza del anclaje esta ligeramente rehundida respecto a la tabica. Este espació luego se rellenará con mortero así quedará completamente oculta(Sanabra Loewe 2014). Otro detalle que cabe destacar de la patente es el detalle sobre la poligonal de armadura pretensa para adaptarla al diagrama de esfuerzos (aunque comete errores en los pilares)(Sanabra Loewe 2014).

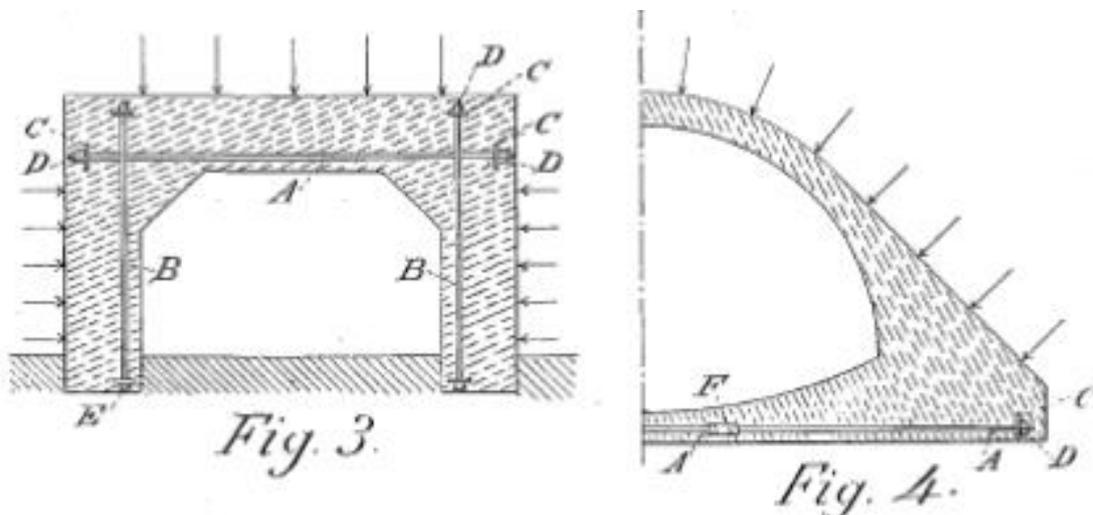


Ilustración 29 Patente C.R. Steiner

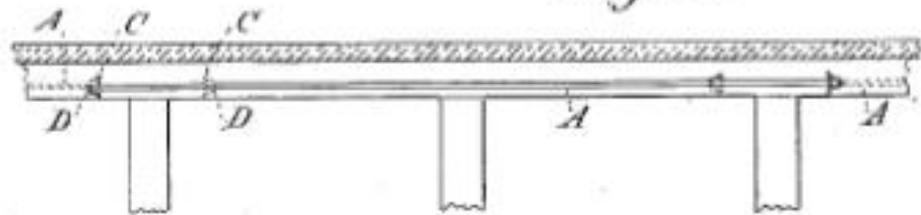
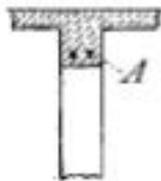
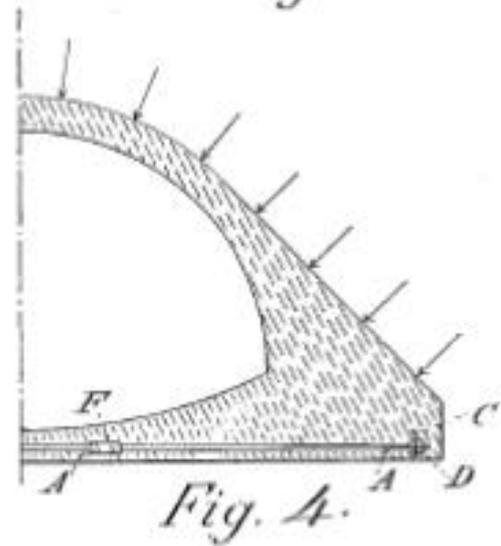
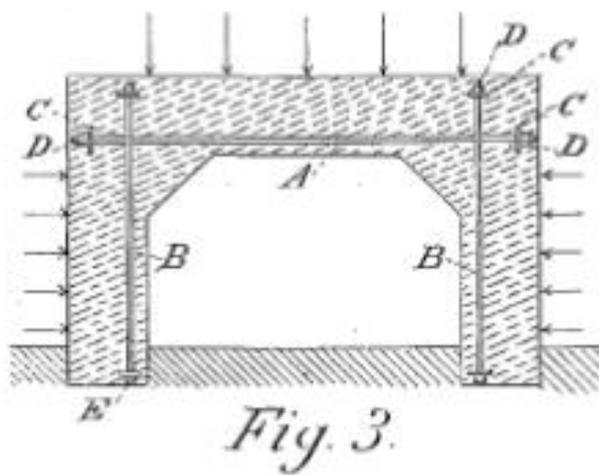
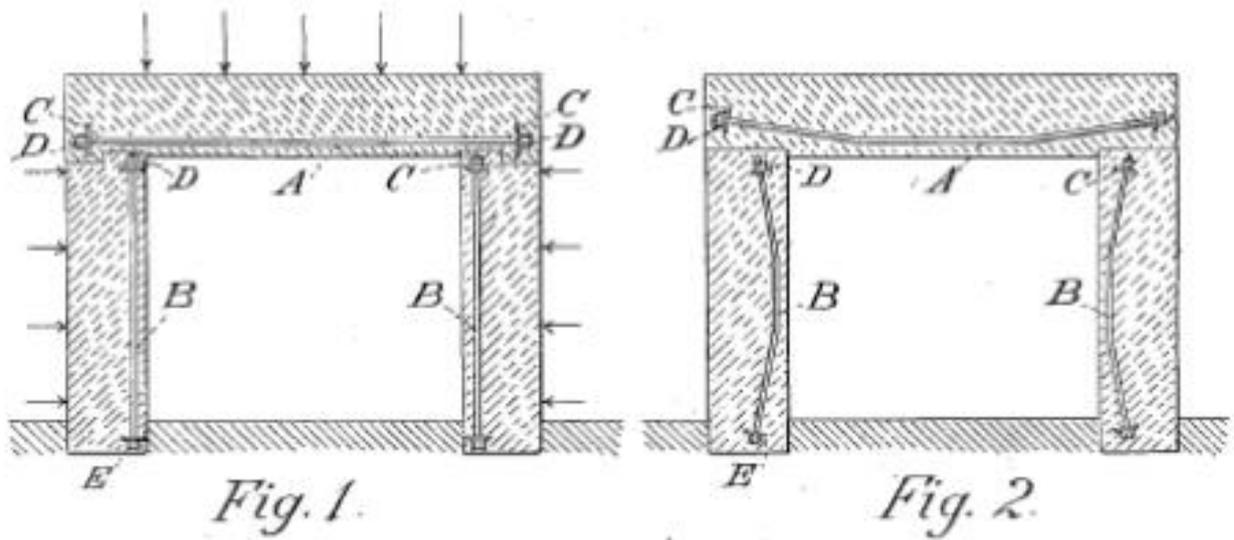
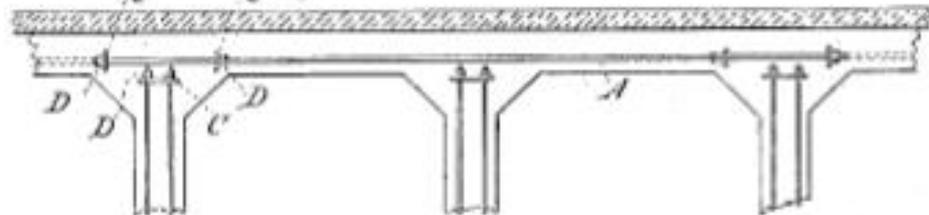


Fig. 6.

Fig. 5.



Witnesses:  
W. B. Williams

Fig. 7.

Inventor:  
Charles R. Steiner

Ilustración 30 Patente C.R. Steiner

### 7.7. Patente J.G.F. Lund US 1028578 (1908).

J.G.F. Lund es un ingeniero noruego que consigue una patente en 1908 (ilustración 31). La patente consta en una solución mediante piezas prefabricadas de hormigón que junto a un postensado permite realizar bóvedas rectas.

Lund tiene como objetivo en esta patente la reducción al mínimo de las fisuras producidas por las tracciones en el hormigón en la realización de bóvedas rectas. Para solucionar este problema se ha estudiado mucho en el hormigón armado, pero este necesita garantizar la durabilidad y seguridad del hormigón armado. Es necesario protegerlo de estas pequeñas fisuras, ya que para proteger el acero es de vital importancia cubrirlo con hormigón que lo protege del fuego, del aire y de la humedad que provocan un deterioro considerable de este material. Lund expresa en su patente que el refuerzo de acero no aumenta el límite elástico del hormigón armado, sino que las fisuras son más pequeñas, pero se siguen produciendo cuando se ha eliminado el centrado y la carga sobre el elemento empieza a actuar. Las fisuras se producen porque la sección de acero es mucho más pequeña que la del hormigón.

Tanto la bóveda como cualquier elemento estructural este sufre intervalos de carga descarga, los cuales incrementan estas pequeñas fisuras que se traduce en una menor durabilidad y resistencia al fuego del hormigón. Provocado por las fisuras cada vez más grandes el acero quedara expuesto tanto a la humedad como al aire comenzando un proceso de oxidación el cual ara que el volumen del acero se incremente provocando más tracciones al hormigón y comprometiendo la seguridad de la estructura. Lund apunta que para proteger debidamente el acero de estos fenómenos se ponen una sección de acero mayor a la necesaria al igual que la de hormigón para una correcta impermeabilización. Este factor da lugar a estructuras pesadas que se traduce en un mayor coste de ejecución y de materiales.

La invención de Lund es un método constructivo de bóvedas rectas, que puedan apoyarse libremente sin formar grietas y aprovechar al máximo la resistencia que ofrecen las barras de acero. Como describe en su patente hasta una tensión de  $1000/1200\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ .

Después de enumerar los defectos que localiza en el hormigón armado Lund empieza a describir su patente explicando los dibujos que se incluyen en ella. Prosigue diciendo en la figura 1 y 2 se puede observar una vista en alzado y planta de una bóveda recta construida de acuerdo con mi invención. La figura 3 y 4 son una sección transversal y otra vertical dibujadas a una escala ampliada. La figura 9 es una vista en perspectiva que muestra una piedra o un bloque modificado (ilustración 33).

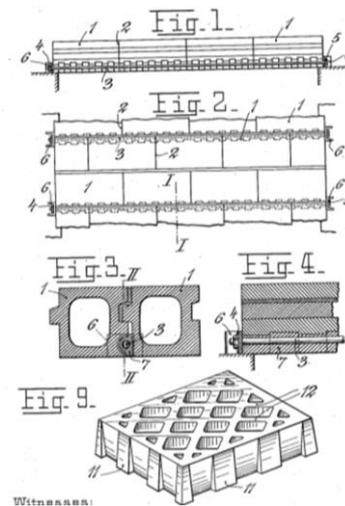


Ilustración 31 Patente J.G.F. Lund US  
1028578 (1908).

La Fig. 5 es otra vista en perspectiva de un bloque o piedra adecuadamente formado, en este caso parece tener un mayor canto según Lund se usa cuando la bóveda se va a reforzar en dos direcciones. Las figuras 6 y 7 son vistas en sección, de la figura 8, a través de una bóveda construida con piedras del tipo mostrado en la figura 5. La figura 8 es una vista en planta de una bóveda rectangular (ilustración 32), y Las figuras 10, 11, 12 y 13 de la ilustración 35, ilustran la forma del revestimiento de mortero y de las partes coactivas del bloque.

La bóveda recta esta realizada por varias piezas de hormigón o ladrillo con las formas similares a la de la figura 5. Los bloques se colocan en filas paralelas con el machihembrado de los bloques que se acoplan entre sí. Entre ellos se introduce un tirante también con lengüetas y ranuras con forma de tornillo-perno, que en su extremo tiene una tuerca esta se aprieta contra una placa en forma de U que hace de arandela que es la encargada de repartir el esfuerzo de la tuerca por una superficie más grande con el propósito de que la pieza no se rompa. Posteriormente se aplica un revestimiento de cemento.

En la descripción de la patente de Lund afirma que al ser piezas prefabricadas tensadas de hormigón o algún material similar como bloques cerámicos. Posteriormente revestidos este revestimiento no sufrirá grietas al no estar endurecido cuando se transmite las cargas de pretensado comprimiendo la parte inferior del bloque.

Lund coloca estribos en las dos direcciones es decir desarrollara un sistema de bóvedas rectas bidireccional. A demás de colocar ranuras y dientes en los cuatro lados de los bloques para la transmisión de los esfuerzos horizontales entre las piezas sin depender de la adherencia del revestimiento de mortero. Cuando se trata de bóvedas que deben apoyarse a lo largo de los cuatro bordes y que, en consecuencia, deben poder contrarrestar las fuerzas que se encuentran en dos planos relativamente perpendiculares, dichas bóvedas deben estar provistas de tirantes 8, ubicados en la dirección de ambos planos.

En definitiva, la patente de Lund consiste en la creación de un sistema para la construcción de un forjado mediante piezas prefabricadas con ranuras y dientes que encajan unas con otras. Estas piezas permiten la colocación entre ellas de un tornillo-perno en las dos direcciones. Este tirante será el encargado de tensar mediante el apriete de las tuercas que tiene en las 2 cabezas. Estas están en contacto con los bloques mediante una placa en forma de U. Cuando el conjunto de bloques está comprimido en las dos direcciones se rellena con mortero que estará sin tensar y no fisurará, de este modo pretende conseguir una mayor durabilidad de su invento.

Un qué Lund fuera uno de los primeros en patentar un invento de hormigón pretensado con armaduras postensas. Este no sería eficaz y su principal problema sería como afirma Sanabra. Los aceros tampoco eran los adecuados, la fuerza inicial de pretensado era demasiado baja y desaparecía al cabo de poco tiempo(Sanabra Loewe 2014).

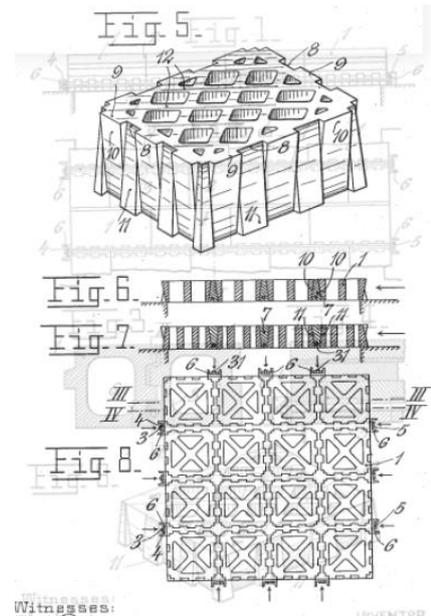


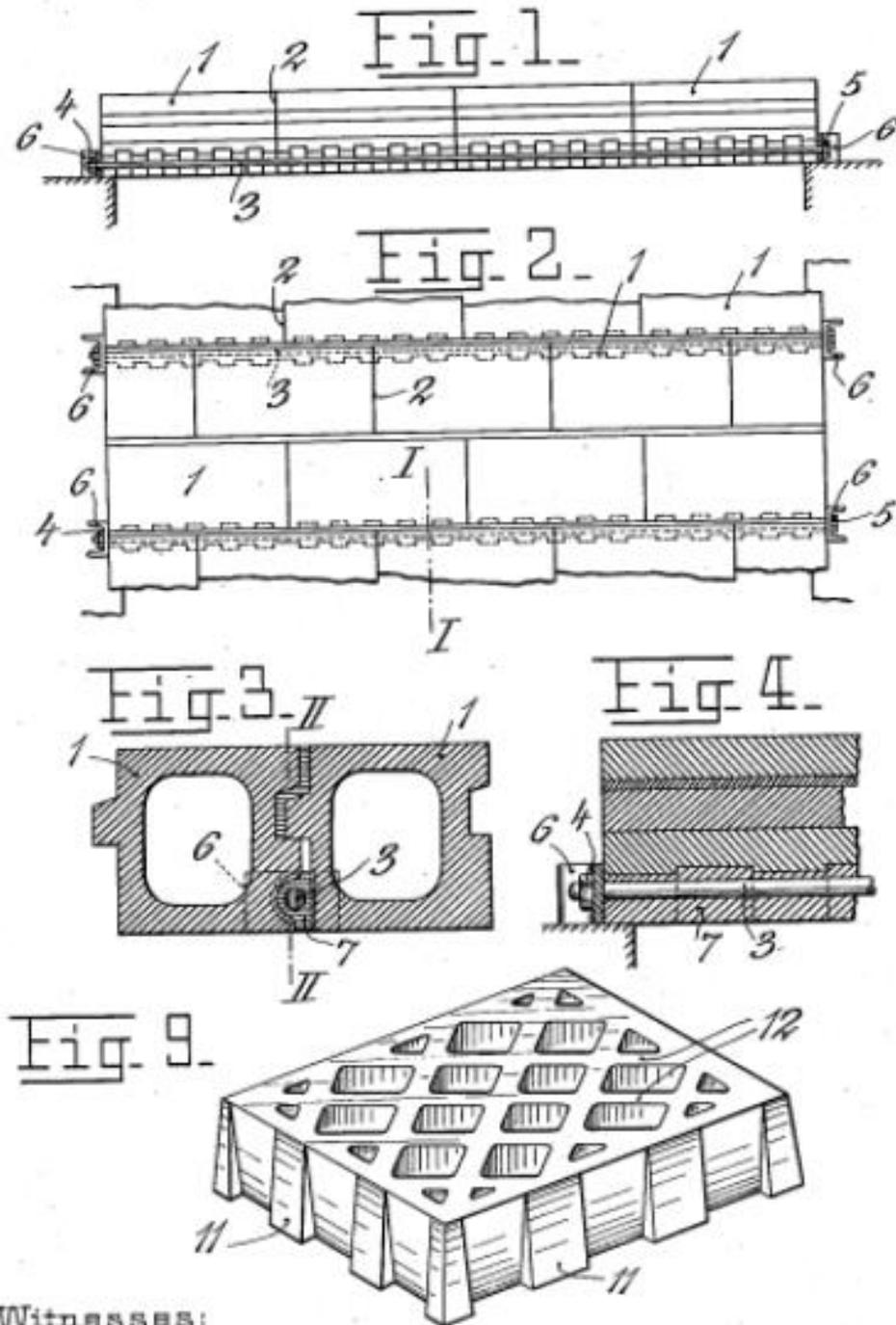
Ilustración 32 Patente J.G.F. Lund US 1028578 (1908).

J. G. F. LUND.  
STRAIGHT VAULT.  
APPLICATION FILED FEB. 10, 1908.

Patented June 4, 1912.

3 SHEETS-SHEET 1.

1,028,578.



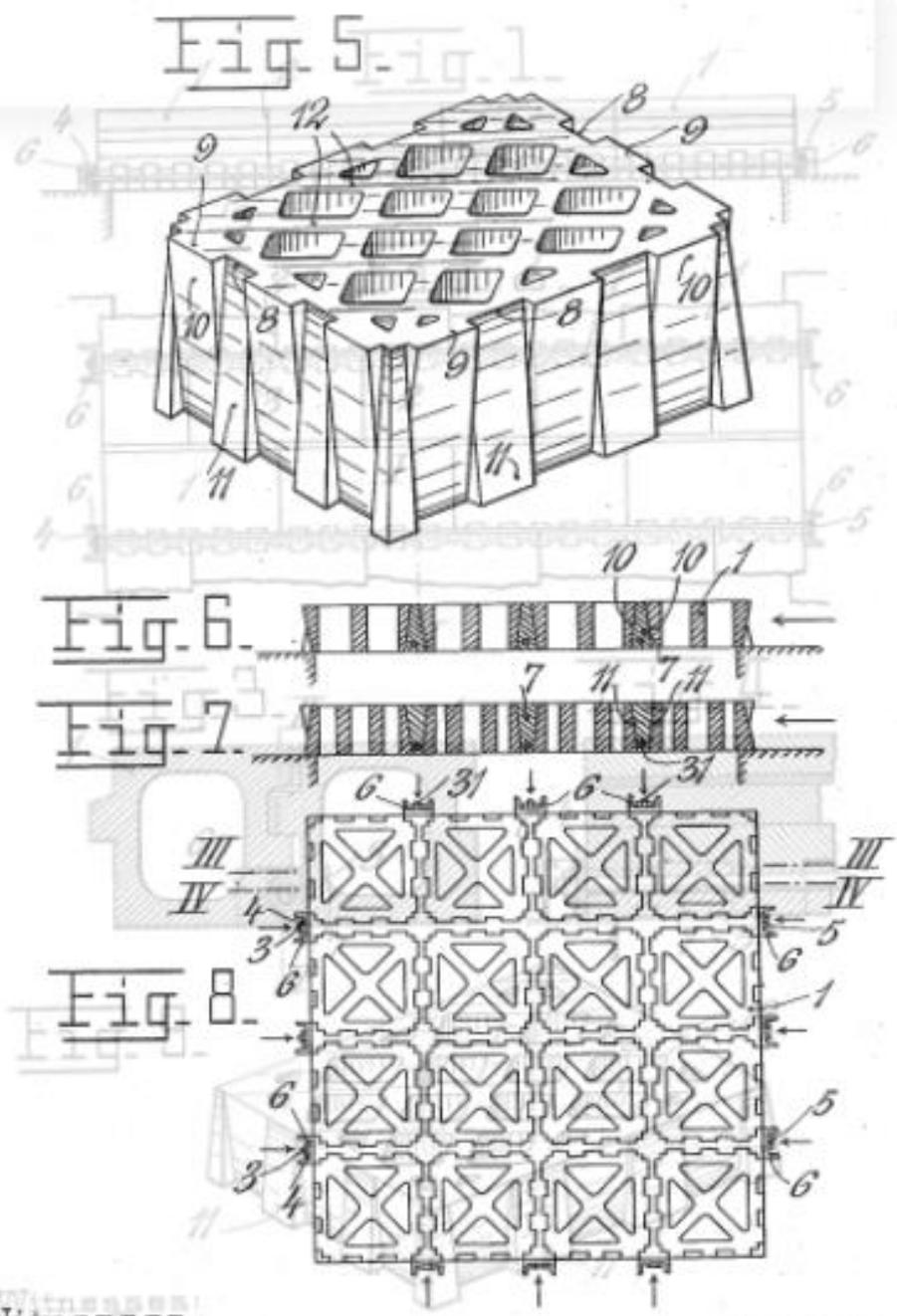
Witnesses:

*A. H. Berrigan*  
*John A. Horing*

INVENTOR,  
JENS GABRIEL FREDRIK LUND,  
by *Vandermere & Schmale*  
Attorneys.

Ilustración 33 Patente J.G.F. Lund US 1028578 (1908).

J. G. F. LUND.  
STRAIGHT VAULT.  
APPLICATION FILED FEB. 10, 1908.  
1,028,578.  
1,028,578.  
Patented June 4, 1912.  
3 SHEETS-SHEET 2.



Witnesses:  
*W. H. Carrigan.*  
*John H. Downing.*

INVENTOR,  
JENS GABRIEL FREDRIK LUND,  
by *Samuel Bernick & Son*  
Attorneys.

Ilustración 34 Patente J.G.F. Lund US 1028578 (1908).

J. G. F. LUND.  
STRAIGHT VAULT.  
APPLICATION FILED FEB. 10, 1908.

Patented June 4, 1912.  
3 SHEETS-SHEET 3.

1,028,578.

Fig. 10.

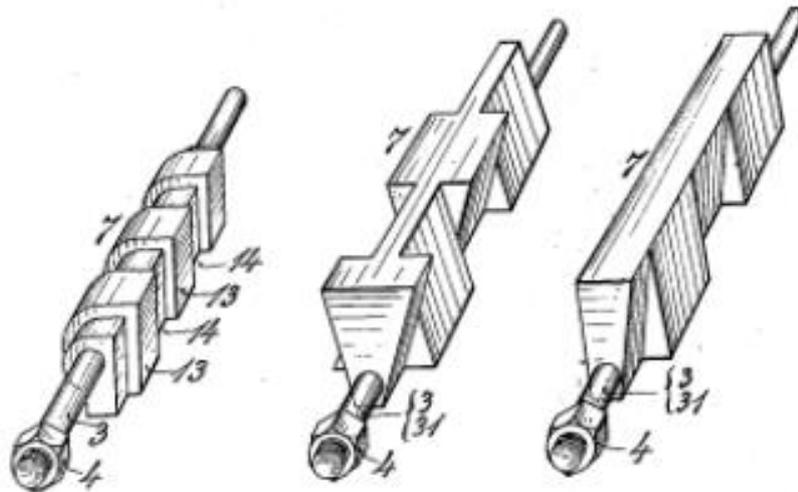
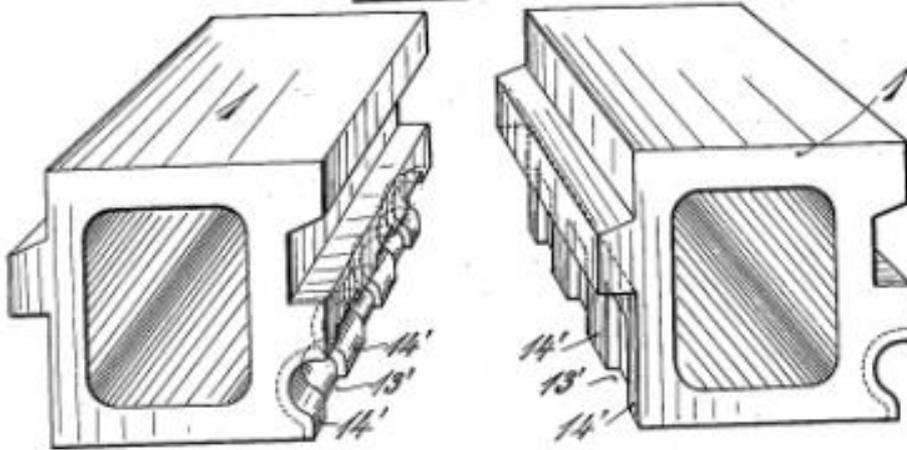


Fig. 11.

Fig. 12.

Fig. 13.

Witnesses:

*Cornelius Koring*  
*M. Kilpatrick*

Inventor:  
J. G. F. Lund

by *H. A. Olden*  
Attorney

Ilustración 35 Patente J.G.F. Lund US 1028578 (1908).

## 7.8. Patente W. Wilson US 1259698 (1918).

Wilson describe su patente (ilustración 36 y 37) diciendo que su invento consta de hormigón armado cuya función es estructural. Con su invención se puede fabricar bloques de hormigón, vigas, viguetas, losas y arcos. Los refuerzos de esta patente son uno o más cables tensados y anclados para intentar conservar el tensado. Wilson es conocedor de que esta idea ha sido utilizada tanto para tensar elementos de metal como de madera, así como para la fabricación de losas y bloques.

Ahora bien, Wilson opina que los procedimientos hasta la fecha han sido ideados para ser construido en obra provocando un sobre coste muy elevado debido al encofrado necesario para su fabricación. El defiende la idea de realizar las piezas en un lugar concreto, en la patente Wilson da como opción el patio, donde se procederá a la fabricación del molde, así como la pieza en si para posteriormente ser transportada y colocada en su lugar previsto.

En el siguiente párrafo extraído directamente de la patente de Wilson se explica cómo se fabrica las piezas de hormigón y como se pueden unir estas piezas entre sí.

Según esta invención, los bloques, losas, etc., no se fabrican de la manera habitual, sino que se moldean o forman cada uno en un molde que tiene el cable de alambre o cables de refuerzo asegurados en el mismo de manera que estén cerca del bordes del bloque o losa terminados que se hacen más o menos huecos en el centro, constituidos por una red o parte delgada, mientras que los lados o bordes están engrosados en la medida que se considere deseable o necesario para cubrir e incrustar adecuadamente el refuerzo , o cable de refuerzo principal, o cables. Estos bordes engrosados constituyen nervaduras o rebordes marginales reforzados que dan una gran resistencia a los bloques o losas al tiempo que sirven como un medio por el cual pueden fijarse fácilmente entre sí por medio de pernos o de otro modo. Preferiblemente, las bridas o nervaduras estarían reforzadas por un refuerzo de cable principal, mientras que la parte central delgada estaría reforzada por un refuerzo secundario compuesto de alambres pasados o unidos a los cables en los lados y (o) extremos del bloque o losa(Wilson 1918).

Wilson dice que con las losas y los bloques puede construir un edificio sin la necesidad de vigas metálicas o de madera y sin ladrillos o mampostería. En la descripción de la patente aparece que el proceso será más rápido, más barato y dice que la estructura será más resistente.

No solo propone la fabricación de elementos estructurales en la patente aparece que también se pueden fabricar tabiques y muros exteriores. Dice que los huecos tanto de puertas como de ventanas se fabricarán mediante la construcción de moldes en el lugar idóneo donde se fabricarán todos los elementos y también serán reforzados mediante cables tensados. Los muros se formarán mediante piezas de forma rectangular atornilladas entre sí.

Wilson propone una especie de prefabricado para reducir costes, pero con medidas que los elementos se hacen según la necesidad del edificio, es decir, las piezas están hechas a medida no hay la estandarización actual que las piezas son iguales.

También para abaratar costes propone la reutilización de los moldes para la fabricación de bloques y losas tensadas.

Para una perfecta comprensión de la patente el autor presenta junto a la misma unos dibujos los cuales ayudan a una mejor comprensión de la invención. Así como el proceso constructivo de la fabricación de las piezas de hormigón pretensado.

El primer dibujo lo describe como figura 1 donde aparece un molde donde se fabricará el elemento de hormigón cuya fabricación se dará en un lugar idóneo. La figura 1 aparece cortada en el dibujo dejando ver que el largo puede variar (ilustración 36).

Le sigue una imagen, figura 2, en la que se puede observar una sección donde aparece una porción del marco. La figura corresponde a un detalle a una escala mayor para poder apreciar con mayor detalle un ejemplo de marco que cumple con la patente realizada. La sección esta realizada por la línea m de la figura 1 (ilustración 36).

Las siguientes figuras, concretamente las figuras 3, 4 y 5 (ilustración 37) muestran con detalle una pieza de hormigón pretensado fabricada según la patente de Wilson. En las vistas se puede ver en líneas discontinuas tanto el mecanismo de tensado como el propio acero tensado (ilustración 36).

La figura 6 es un detalle donde se puede observar con mayor claridad del mecanismo de tensado (ilustración 36).

Seguidamente después de hacer una breve explicación de sus dibujos Wilson en su patente indica como se debe realizar el proceso de fabricación.

Proporciono una base de metal u otra base 1 sobre la cual moldeo o coloco un bloque de matriz 3, de una forma adecuada para dar la formación hueca deseada a la losa terminada. Preferiblemente, este bloque de matriz está hecho de cemento. Alrededor de este bloque, ya una distancia adecuada del mismo, como se muestra, coloco un marco rectangular de madera o metal 2 que constituye los lados y extremos del molde. Luego fijé en la base cuatro pasadores verticales o anclajes 4, uno de los cuales está ubicado cerca de cada esquina del marco. Estos pasadores se pueden sujetar en receptáculos en la base 1 o se pueden sostener rígidamente de otro modo. Una vez erigidos estos pasadores, se desliza sobre cada uno de ellos un manguito metálico 5 (ver figura 2 ilustración 36) de la misma altura que el marco 2, aunque los ins 4 pueden sobresalir por encima de él. Ahora tomo un tramo de cable o cable de acero principal (indicado en 6, figuras 2 y 3, ilustraciones 36 y 37) y lo paso alrededor de las cuatro partes internas y externas de los manguitos de este, los extremos se unen y se aseguran mediante un acoplamiento roscado 7, o de otra manera. Se prefiere un acoplamiento de tornillo, ya que se puede ajustar fácilmente y el cable arriostrado tensa alrededor de los pasadores verticales. Preferiblemente, el cable, después de ser estirado, se dobla hacia abajo en el centro y se aprieta más como se muestra en la figura 3, por medio de tubos transversales 8, lastrado por medio de pesos pesados aplicados al mismo o forzado hacia abajo por medio de tornillos. aplicado adecuadamente, la idea es estirar el cable 6 y mantenerlo bajo una fuerte tensión. También puedo pasar alrededor de los lados de los montantes un cable de acero superior 9 y un cable de acero inferior correspondiente 10, estando cada uno de estos cables unidos por anclajes o similares de manera que sean sin fin y se coloquen paralelos entre sí y la parte superior del marco, como se muestra claramente en la Fig. 2 y luego tenso. A continuación, aprieto los lados del cable de acero 9 por medio de alambres transversales 11 dispuestos en diagonal que se tensan

y luego se atan en su posición y constituyen un refuerzo subsidiario para la parte central delgada de la losa. Las cuerdas 9 y 10 son o también pueden ser 9 y 10 pueden estar temporalmente arriostradas lateralmente a la estructura de madera por medio de tornillos y tuercas 14.

Cuando la armadura se ha dispuesto correctamente en el molde, el hormigón se rellena y se empaqueta a fondo para llenar los espacios entre el cemento 3 y el armazón de madera 2, y, cuando el hormigón fragüe, tendrá los cables de alambre o cuerdas y alambres incrustados en el mismo en un estado de tensión. Cuando el hormigón ha fraguado completamente, se retiran los pasadores 4 y se saca la losa del molde con las cuerdas y alambres incrustados en ellos y también los manguitos 5 incrustados en ellos. Estos manguitos aparecen como agujeros en el bloque moldeado, ver Figs. 3 y 4 (ilustración 37). Los tubos transversales 8 también están empotrados en el bloque y están indicados por los agujeros 8, Figs. 3 y 5 (ilustración 37).

El bloque, como aparece en las Figs. 3 y 4 (ilustración 37), tiene dos nervios transversales 16 que dividen la parte inferior hueca en tres partes, como se indica en las líneas de puntos. Se cree que es preferible tener estas dos nervaduras transversales 16, ya que dan mayor resistencia al bloque bajo esfuerzos de compresión.

En la sección, Fig.5 (ilustración 37), se ve un manguito 5 y también el cable principal 6 y los cables o alambres auxiliares 9, 10, junto con el entramado de alambre 13 y uno de los tubos 8.

La figura 6 (ilustración 37) muestra claramente los dos cables o alambres auxiliares 9, 10 y los alambres de celosía 13 y los alambres longitudinales 12. 18 muestra una parte del espacio hueco en la parte inferior del bloque.

Se verá por las líneas punteadas, Figs. 3 y 4 (ilustración 37), el refuerzo es muy completo y que los alambres y cables se extienden por el material en todas direcciones. Los manguitos 5 son muy útiles, como también lo son los tubos 8, ya que forman un medio por el cual la losa se puede levantar o levantar fácilmente con una grúa o de otro modo, y también en algunos casos para atornillar las losas al éter.

En las losas que pueden estar enclavadas o encajados juntos cuando se colocan en posición para un piso o una pared, o similar, están hechos, preferiblemente, con ranuras en cola de milano en los lados y extremos. Una de estas ranuras en cola de milano se indica en 17, Fig.5, y en 17, placas 19 incrustadas en los extremos y (o) lados y a través de las cuales se pueden pasar los pernos 20, lo que también proporciona un refuerzo continuo (ilustración 37).

Si se desea, las piezas de distancia 21 se pueden colocar en posiciones adecuadas entre las cuerdas 9 y 10 para mantenerlas separadas (Wilson 1918).

Wilson termina explicando que al ser piezas prefabricadas el encofrado, utilizado para la realización de elementos estructurales como muros o forjados, es muy inferior y por tanto supone un ahorro significativo. El proceso al llevarse a cabo en un lugar adecuado es más rápido e interfiere menos en el avance de la puesta en obra, eso provoca una mayor rapidez en la ejecución que también se traduce en un ahorro significativo.

W. WILSON.  
REINFORCED CONCRETE.  
APPLICATION FILED JAN. 27, 1917.

1,259,698.

Patented Mar. 19, 1918.  
2 SHEETS—SHEET 1.

Fig. 1.

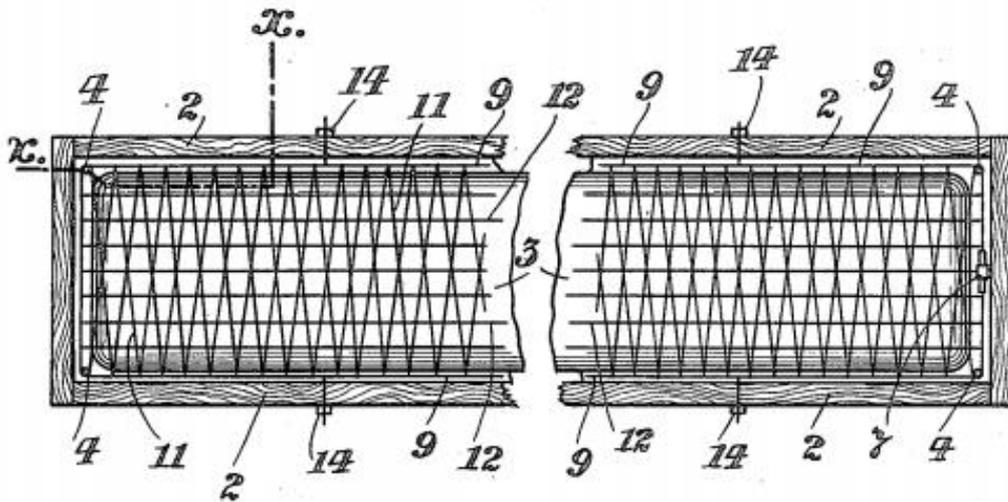
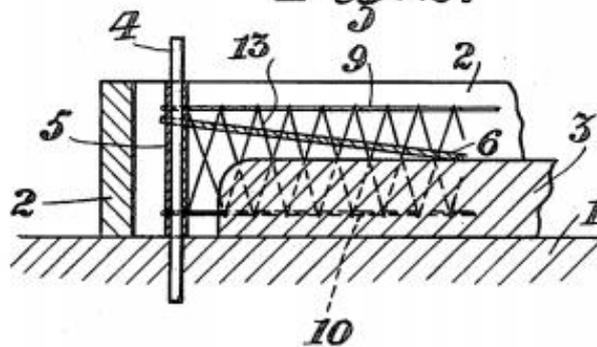


Fig. 2.



Witnesses:  
Elsie Willocks.  
Geo Marshall Mackenzie

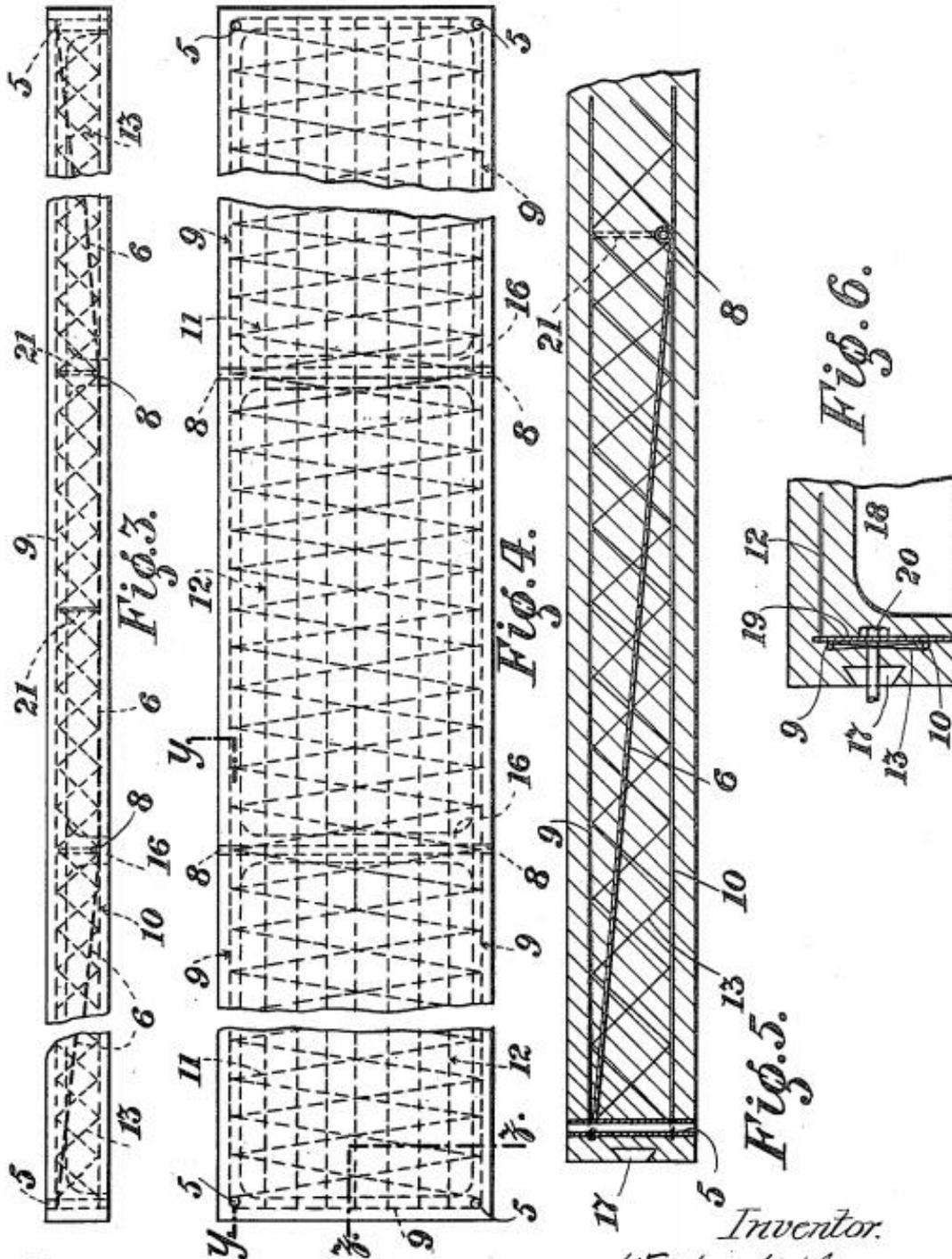
Inventor:  
Walter Wilson  
by H. D. [Signature]  
Atty.

Ilustración 36 Patente de W. Wilson US 1259698 (1917)

W. WILSON.  
REINFORCED CONCRETE.  
APPLICATION FILED JAN. 27, 1917.

1,259,698.

Patented Mar. 19, 1918.  
2 SHEETS—SHEET 2.



Witnesses:  
Elie Willocks.  
Geo. Marshall Mackintosh.

Inventor.  
Walker Wilson  
by H. D. Fitzpatrick  
Attu.

Ilustración 37 Patente de W. Wilson US 1259698 (1917)

### 7.9. Patente W. S. Hewett (1922).

El ingeniero estadounidense William Sherman Hewett en 1919 intenta la construcción de depósitos para la contención de líquidos de hormigón armado, pero estos presentan un sinnúmero de patologías notables debidas a la fisuras y posteriores fugas de los líquidos que deberían contener. En busca de una solución a su problema lee los estudios sobre la retracción y el comportamiento a largo plazo del hormigón de Franklin R. McMillan (Sanabra Loewe 2014).

Al cabo de 3 años patentará un sistema de silos y depósitos de agua cilíndricos de hormigón pretensado, un sistema que consiste en barras lisas y una especie de tensores ("turnbuckles"). Presenta dos variantes de su pretensado circular: con armadura no adherente y con armadura adherente (Hewett, Reinforced Concrete Structure, 1922) (ilustración 38). A pesar de que se sabe que Hewett conocía el problema de la retracción (Balcom, 1984), no lo evidencia en su patente (Sanabra Loewe 2014).

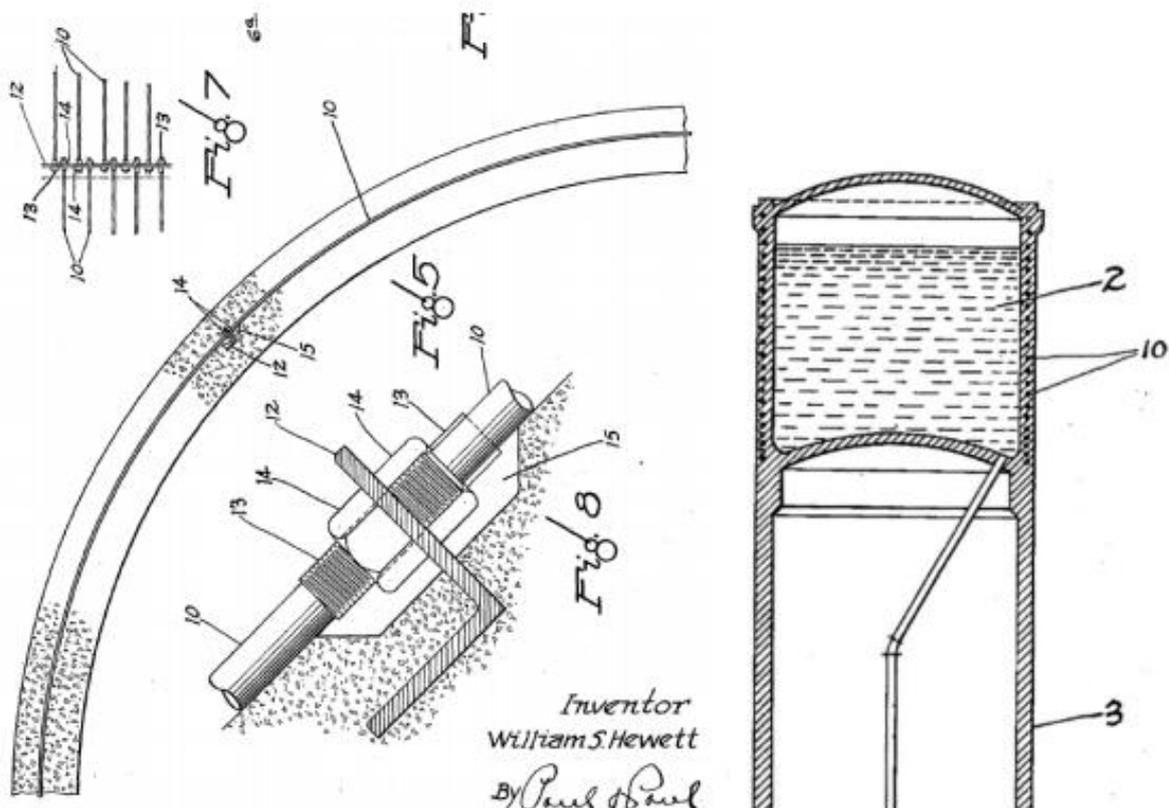


Ilustración 38 Patente de Hewett US 1413404 (1922).

La primera patente de Ilustraciones W. S. Hewett es para la construcción de depósitos circulares postensos la patente es solicitada en 1921 y concedida en 1922 (ilustración 38). En ella se describe el proceso de fabricación y se aporta material gráfico para la comprensión de dicha fabricación. El proceso que sigue Hewett en la patente es el de hormigonar en dos veces primero hormigona la parte interior donde deja unos anclajes en forma de L anclados a esta primera parte interior del depósito anclados por adherencia. Estos anclajes son los encargados de sujetar los tensores que no son más que dos tuercas y la barra roscada. Luego se aplica el pretensado apretando las dos tuercas, finalmente se hormigonará la segunda capa está más fina que la primera, de este modo la barra tensionada queda más cerca de la parte más traccionada del hormigón. Con el sistema de hormigonado en dos partes se evita

el problema propio de la adherencia acero-hormigón durante el postensado.

Intentará desarrollar la patente anterior variando la forma de ejecución debido a la necesidad de su invento a ser retensado, imposible en la primera patente ya que las armaduras quedaban embebidas dentro de la segunda parte del hormigonado, está se convierte en una armadura adherente. Por consiguiente, desestimará esta opción.

Por ello en 1931 patenta, influenciado por las patentes de Dill (1925), inventa un sistema nuevo de pretensado donde centra su principal atención en que las armaduras se puedan retesar (ilustración 39). En los planos de detalle de la patente se ve claramente la influencia de Dill sobre Hewett. También podemos observar que aparece una viga seccionada que muestra la barra pretensada y es que en esta patente Hewett no solo habla de depósitos o silos, sino también de elementos rectos o vigas pretensadas. La patente recibe el nombre de, "Method and means for tying concrete".

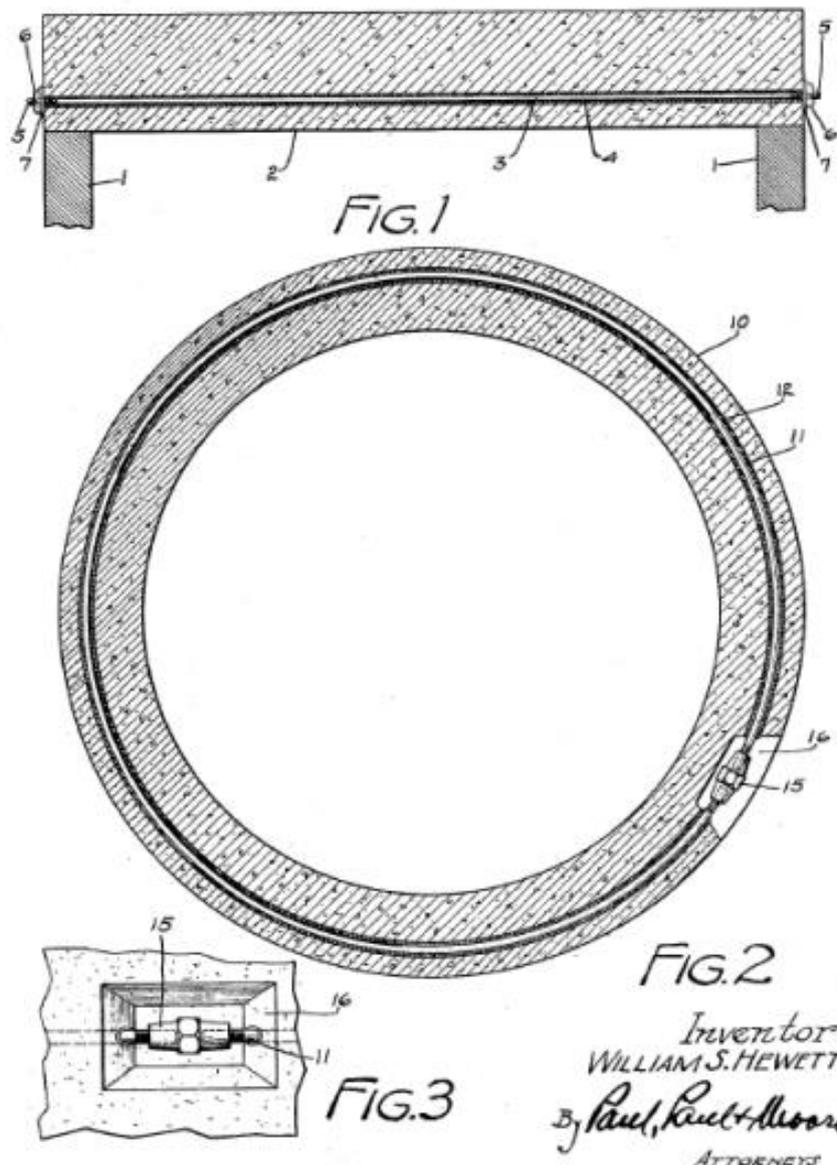


Ilustración 39 Patente de Hewett de (1931)

Hewett en la patente de 1931 soluciona el problema aplicando una sustancia que impida que las armaduras se adhieran al hormigón. Esta sustancia como cuenta el mismo Hewett es un recubrimiento de betún a las armaduras.

Una nueva patente de Hewett relacionada con el pretensado es la patente (Hewett, Building structure reinforcement, 1937) (ilustración 40). En ella describe un gato con barómetros para controlar perfectamente la fuerza de tensado que se aplica a las armaduras.

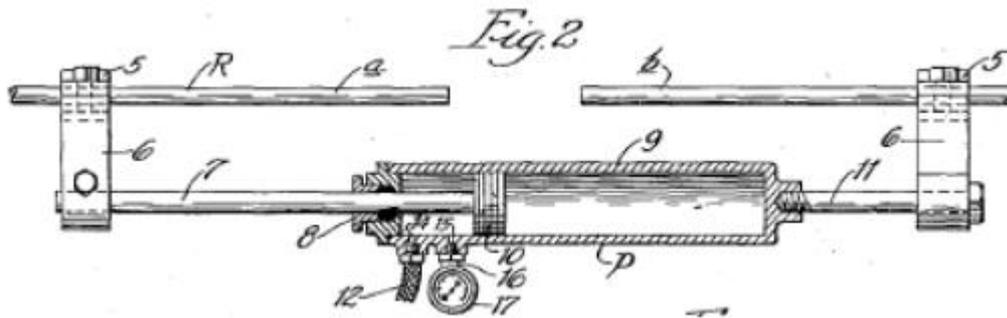


Ilustración 40 Patente de Hewett (1937)

Hewett como casi todos los anteriores ingenieros, se basa más en la experimentación practica que en el cálculo riguroso. Se puede ver fácilmente dando un vistazo a las varias patentes antes mencionadas. Donde muchos carecen del conocimiento de factores que influyen en el hormigón que hoy en día son básicos. Como podrían ser la fluencia del hormigón.

### 7.10. Patente K. Wettstein US 1626318 (1924).

El ingeniero nacido en la República Checa patentará un sistema con el armado dispuesto en las dos caras y pensado para aplicar a losas, listones, viguetas, traviesas, etc., con armado tanto unidireccional como bidireccional (ilustración 41). La peculiaridad de esta patente es la enorme delgadez de los alambres propuestos (1 mm en la patente francesa, 0,1 mm en la patente austríaca). Leonhardt dice que Wettstein es el primero en proponer el uso de alambres de piano para el pretensado (Wettstein, *Procedé de fabrication de plaches, lattes, entretoises et traverses armées en ciment et autres matières en prise*, 1922) (Leonhardt 1986). El diseño de estos elementos, con armadura en dos caras, los sitúa también en la categoría de hormigón armado, más que en la de pretensado.

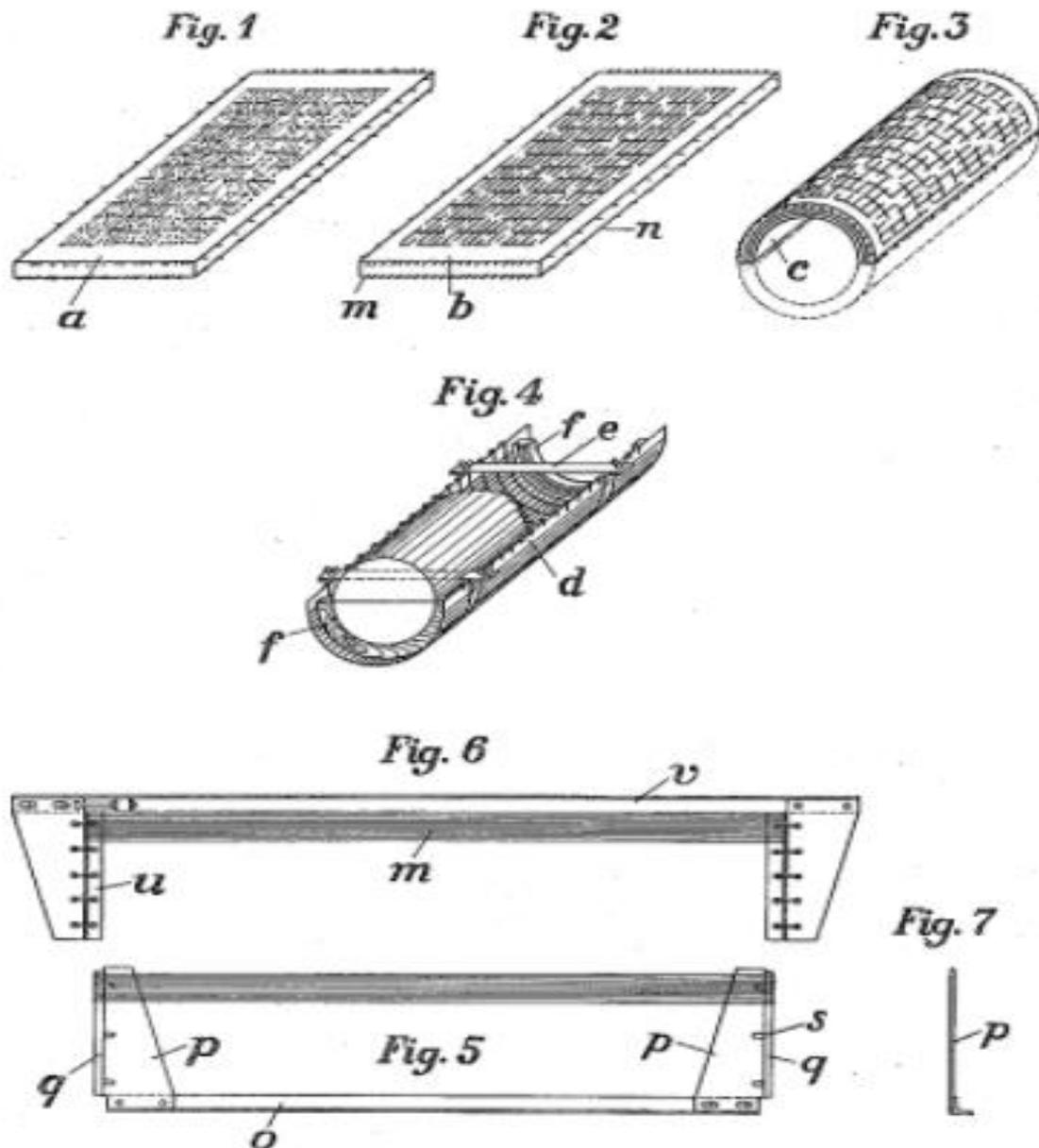


Ilustración 41 Patente K. Wettstein US 1626318 (1924)

April 26, 1927.

K. WETTSTEIN

1,626,318

METHOD OF MAKING REENFORCED BUILDING ELEMENTS

Filed July 18, 1924

4 Sheets-Sheet 1

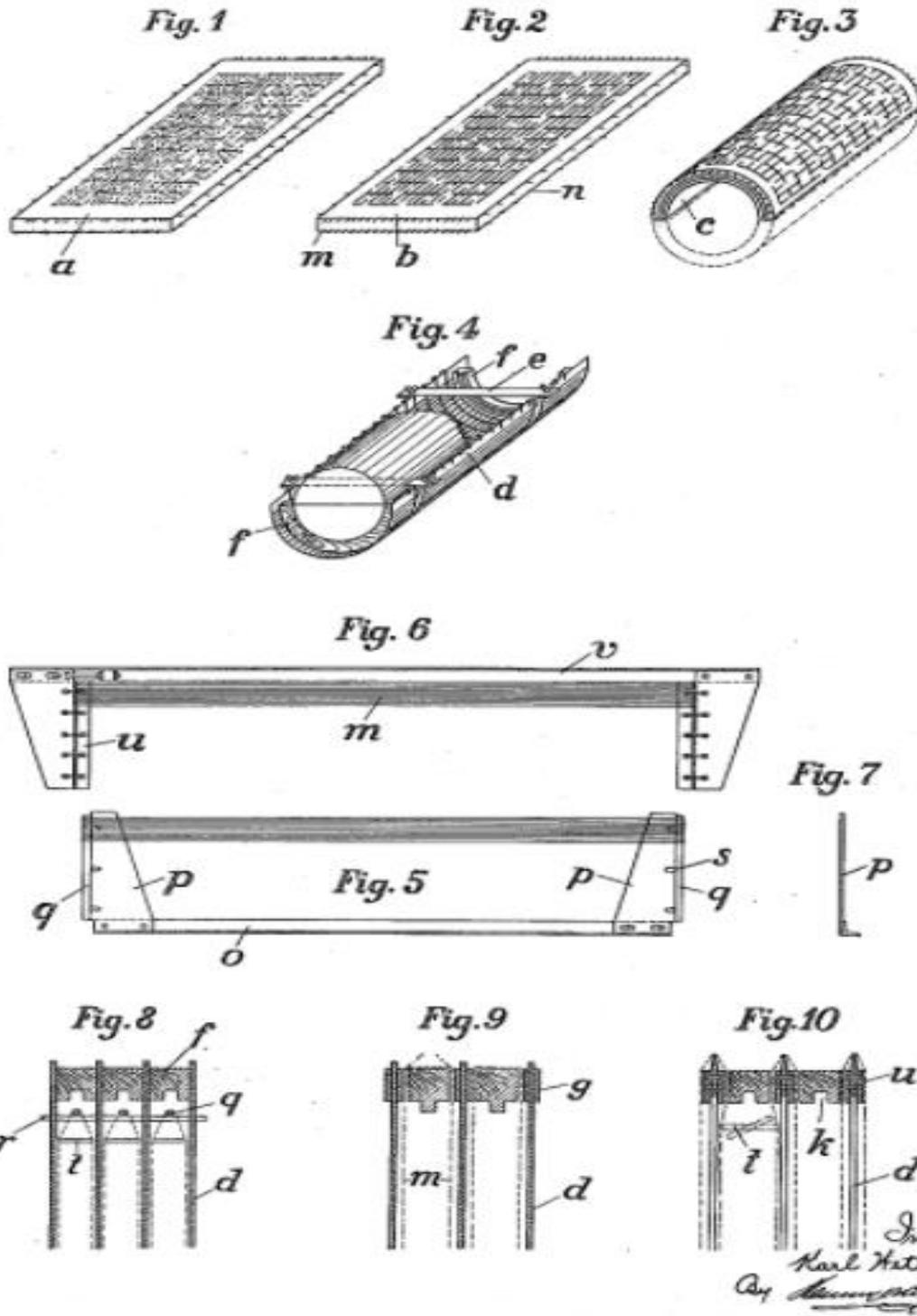


Ilustración 42 Patente K. Wettstein US 1626318 (1924).

April 26, 1927.

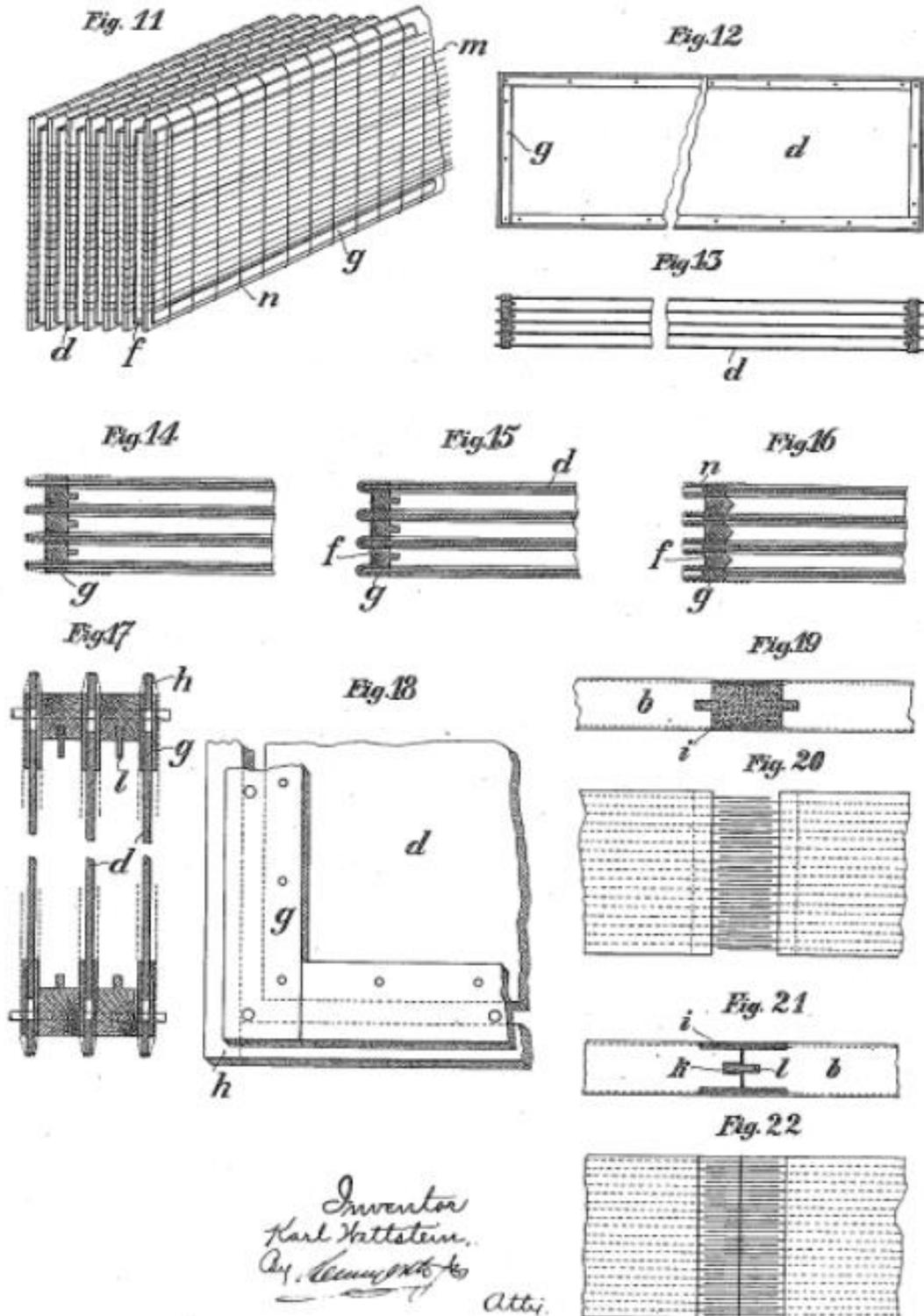
K. WETTSTEIN

1,626,318

METHOD OF MAKING REINFORCED BUILDING ELEMENTS

Filed July 18, 1924

4 Sheets-Sheet 2



Inventor  
Karl Wettstein.  
Atty. *[Signature]*

Ilustración 43 Patente K. Wettstein US 1626318 (1924).

April 26, 1927.

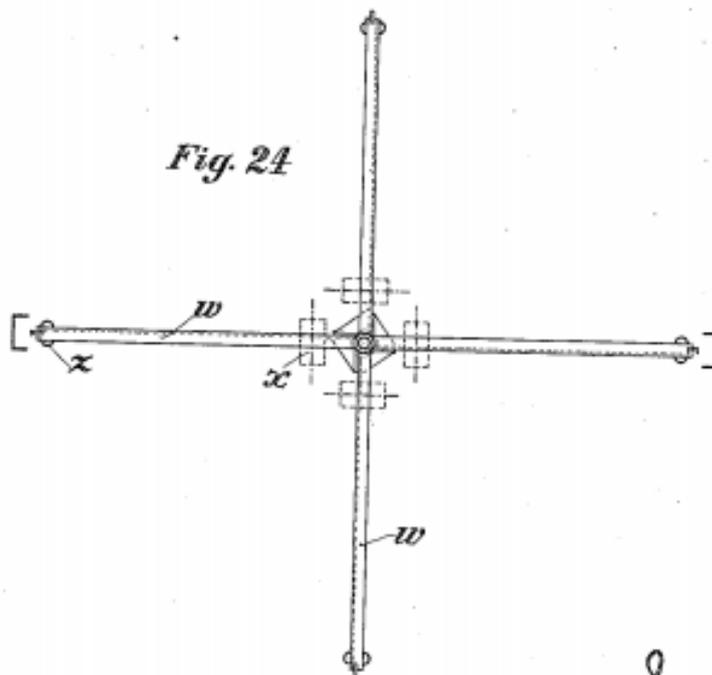
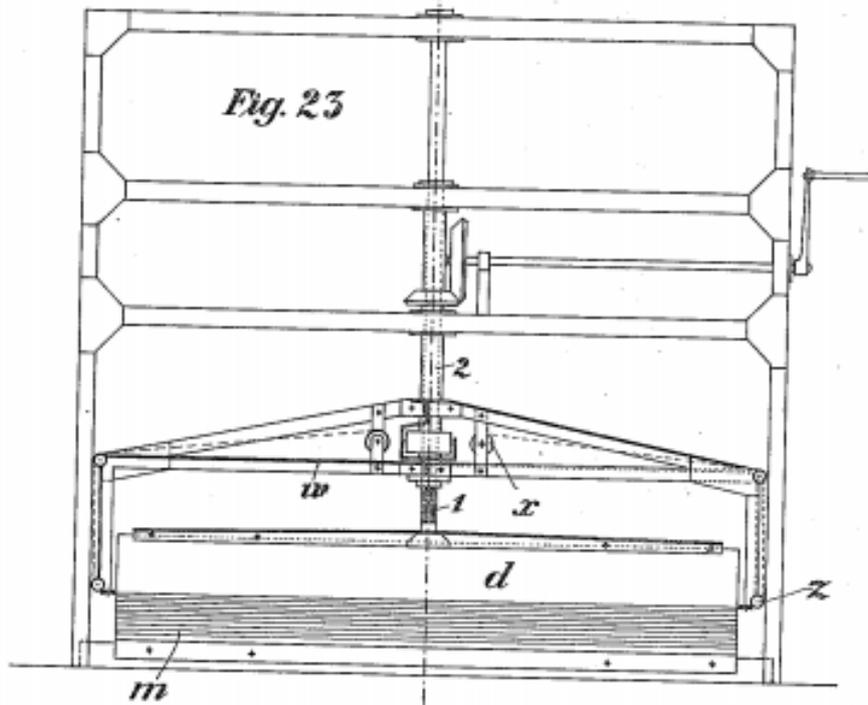
K. WETTSTEIN

1,626,318

METHOD OF MAKING REENFORCED BUILDING ELEMENTS

Filed July 18, 1924

4 Sheets-Sheet 3



Inventor,  
Karl Wettstein,  
By *[Signature]* attn.

Ilustración 44 Patente K. Wettstein US 1626318 (1924).

April 26, 1927.

K. WETTSTEIN

1,626,318

METHOD OF MAKING REENFORCED BUILDING ELEMENTS

Filed July 18, 1924

4 Sheets-Sheet 4

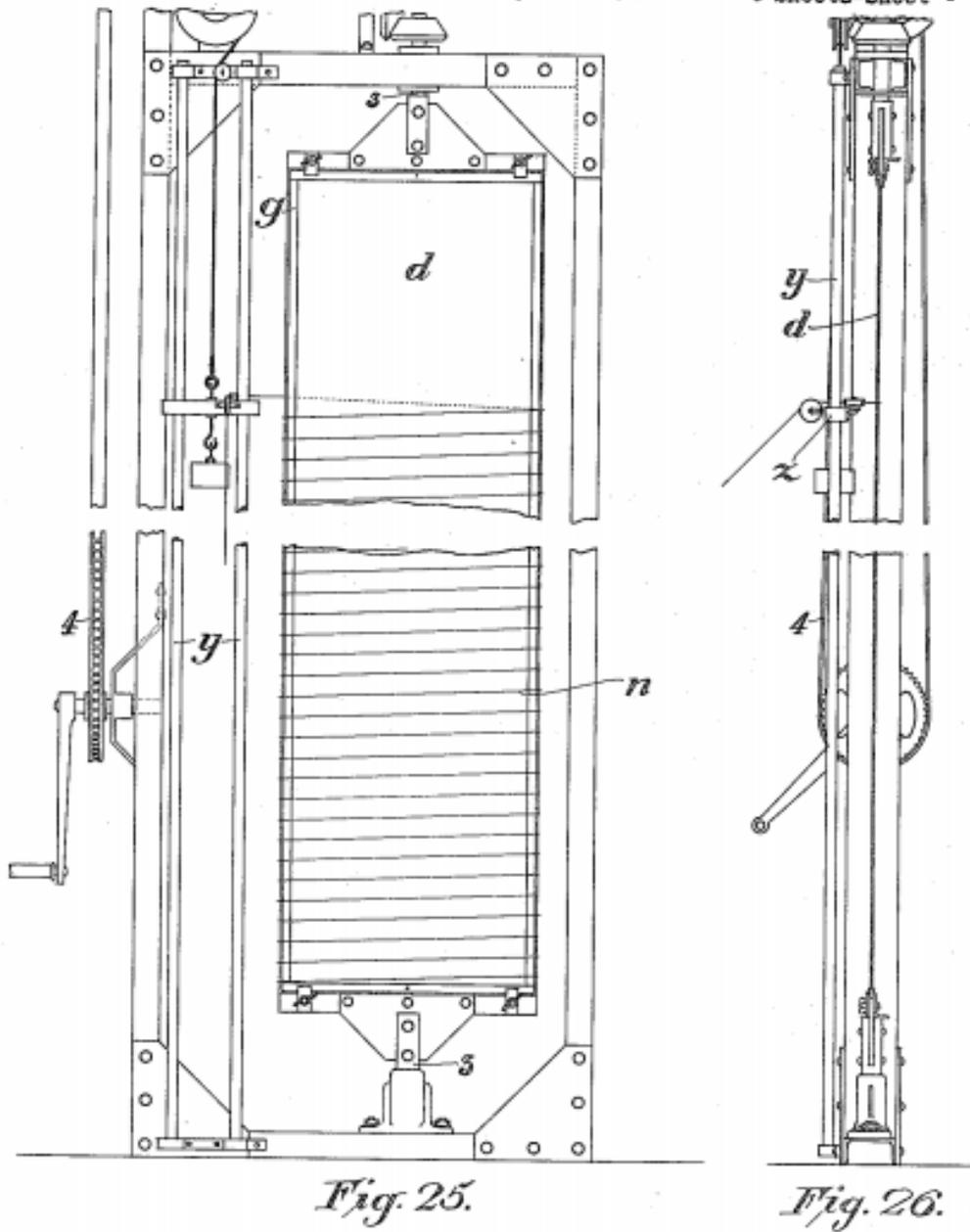
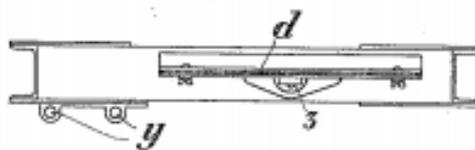


Fig. 27



Inventor  
Karl Wettstein,  
By *[Signature]* Atty.

Ilustración 45 Patente K. Wettstein US 1626318 (1924).

La patente de K. Wettstein habla sobre la fabricación de placas planas o curvadas de hormigón sometidas a tensión, lo consigue gracias a un armado con elementos muy finos y colocados muy cerca de la superficie de la placa.

Los elementos que pueden obtenerse con la patente son muy variados como placas, losas, listones, tuberías y más. La fabricación de estos puede darse gracias al fraguado de materiales plásticos como todo tipo de hormigones o elementos cerámicos.

La patente pretende la creación de un nuevo sistema de elementos tanto curvos como planos donde su realización puede producirse tanto en planta como in situ. En la descripción de la patente podemos leer que Wettstein no especifica bien los materiales que usar en la creación más bien enumera muchas posibilidades, pero sí que menciona los alambres de 3-6 mm de diámetro o barras de hierro o acero las cuales están sometidas a tensión.

Esos elementos de refuerzo que proporcionarán tensión a todo el cuerpo realizado con un material plástico están distribuidos por toda la cara exterior a fin de hacer mayor el brazo mecánico y por tanto este trabaje mejor. También argumenta que deja los filamentos de refuerzo que sobresalen de los límites del cuerpo de hormigón para facilitar la unión entre piezas, ya que la unión se produce mediante el solape de estos filamentos y la aplicación de mortero de cemento.

Wettstein pretende patentar un método que pueda realizarse tanto en obra como en fabrica como se describe en la patente, así como utilizar varios moldes para fabricar la pieza necesaria en cada ocasión.

La presente invención da como resultado un completo método y medio para el refuerzo de cuerpos planos y curvos, en planta o en obra, con el material de refuerzo más adecuado para cada caso particular mediante placas de molde o placas de molde, preferiblemente provistas de repisas o tiras espaciadoras en los márgenes. Antes de usarlos como un solo molde o revestimiento de moldes, o antes de ensamblarlos en un molde múltiple, el material de refuerzo se coloca directamente sobre o a una pequeña distancia de la superficie(Wettstein 1927).

Afirma que no es necesario unir los alambres o elementos de refuerzo entre sí. Basta solo con el solape de los alambres para garantizar una buena unión entre las piezas con la junta realizada con mortero de cemento.

Wettstein parece conocedor de las patentes de Lund y de Hewett ya que en su patente escribe.

Soy consciente de que se han realizado placas de materiales plásticos en las que los refuerzos se incrustan en el medio de las placas y se proyectan desde los bordes para conectar con la placa adyacente, llenándose la junta de cemento, se han conectado de forma similar tuberías de hormigón. Esta es una conexión puramente de tensión(Wettstein 1927).

Luego en la patente explica lo que diferencia su patente de las otras. Afirma que la principal innovación es la de colocar alambres finos bastante cercanos unos de otros a modo de una capa de refuerzo hecha de alambre. También recalca que esta capa de refuerzo esta cerca de la superficie de la pieza, pero que no sobresale. Otro punto que destaca de su patente es como realiza las juntas dejando en los extremos de las piezas los alambres para poder unir

con la otra pieza mediante el solape de estos alambres y la aplicación de mortero de cemento. También destaca la forma especial de usar hilos sin fin o alambres finos en las losas o encofrados, y la manera de usar los alambres cruzados o mallas tejidas (Wettstein 1927).

Su invención no solo se limita a el proceso de fabricación de las piezas de hormigón reforzado tanto planas como curvas, sino a la forma de cómo se unen las piezas.

Su invención está enfocada a piezas de hormigón con una cierta elasticidad. Las placas son muy delgadas de unos 10 y 8 mm de espesor y 2 o 3 m de largo. Wettstein indica un par de posibles funciones para sus placas como por ejemplo cañerías, columnas, tuberías para el tendido eléctrico y para cubrir cubiertas continuas, techos y muros armados.

Posteriormente, en la patente se describen las imágenes que aparecen en ella (ilustración 42, 43, 44 y 45). En las figuras 1 y 2 se pueden observar los moldes o planchas para sujetar el refuerzo de alambre o fibra por las dos caras (ilustración 42).

A continuación, podemos observar la vista en perspectiva de una pieza con forma de canal cilíndrico también con refuerzo de alambre fino en la cara superficial exterior. Esta vista se corresponde con la figura 3 (ilustración 42).

En la figura 4 podemos observar el molde para fabricar las piezas semicilíndricas para luego formar cilindros completos (ilustración 42).

Observamos también una vista de una herramienta que su función es obtener la colocación de los alambres en el lugar idóneo para colocarlos en el molde. Corresponde a la figura 5 (ilustración 42).

En la figura 6 se muestra un instrumento que su función es la de quitar del molde los alambres cuando se fabrican piezas especiales (ilustración 42).

Después la figura 7 muestra una sección transversal de la figura 5 (ilustración 42).

En la figura 8 también se corresponde a una sección de la esquina con los alambres colocados en el molde gracias a la herramienta que aparece en la figura 5 (ilustración 42).

Las figuras 9 y 10 son distintos ejemplos de una sección parcial del molde donde podemos observar que el molde esta provisto de lengüetas o bordes acanalados que sirven para sujetar el bastidor de encordado que tiene colocados adecuadamente los alambres de refuerzo (ilustración 42).

La figura 11 es una vista en perspectiva de como quedaría un molde compuesto para la fabricación de losas según la patente de Wettstein (ilustración 43).

En los dibujos aparecen las figuras 12 y 13 que representan secciones la primera en alzado y la segunda transversal que mediante un conjunto de placas forman un molde (ilustración 43).

Así como las figuras 14, 15 y 16 muestran la misma sección transversal, pero con espaciadores diferentes (ilustración 43).

En las figuras 17 y 18 Wettstein nos muestra una forma fácil de reforzar los listones que sirven para espaciar las placas de los moldes, consiste en la colocación en los bordes de placas de acero (ilustración 43).

Las figuras 19 y 20 son alzados donde nos enseñan como Wettstein plantea la unión entre

piezas de todo tipo, ya sean planas como semicilíndricas (ilustración 43).

Las figuras 21 y 22 nos muestran un detalle en los bordes de una pieza que está conectado mediante una lengüeta y la unión realizada con los solapes de los alambres cubiertos con cemento (ilustración 43).

El próximo dibujo corresponde a la figura 23 que es un alzado de la máquina que enrolla los alambres de refuerzo en la posición correcta y con un espaciado exactamente igual entre todas las vueltas. Le sigue la figura 24 que es una planta del mismo dispositivo capaz de enrollar cuatro alambres al mismo tiempo (ilustración 44).

Las figuras 25, 26 y 27 son vistas de dos alzados y una planta de un dispositivo diferente para enrollar el alambre al encofrado (ilustración 45).

Wettstein sigue la descripción argumentando las ventajas de su invención respecto las demás invenciones que son anteriores.

La primera es que su patente evita que los refuerzos de alambre para las placas se rompan o se suelten.

La segunda es que en las uniones entre piezas son muy fáciles gracias a su fabricación dejando en los bordes los alambres más largos, para posteriormente realizar la unión mediante el solape de los alambres y el rellenado de cemento.

Los refuerzos se encuentran cerca de la superficie del elemento de hormigón o cualquier material plástico. Las superficies sobre todo la exterior es la zona donde se dan las tensiones mayores. Por eso la pieza presentará un buen comportamiento estructural. Además, dice que el núcleo de la pieza será más homogéneo y que se comportará mejor a esfuerzos de compresión que las piezas que tienen los refuerzos por el centro.

En la figura 1 y la figura 2 se diferencian en que una contiene como refuerzo fibras. Estos refuerzos, cuando se componen de fibras cortas, como cáñamo, pelo de animal, amianto, fibra de coco, líber y fibras similares, que se utilizan habitualmente con fines aislantes, se colocan a lo largo del lateral del molde a medida que avanza el llenado (Wettstein 1927). Mientras que la segunda contiene alambres de acero que sobresale en los extremos de las losas.

Wettstein diseña un sistema el cual se puede combinar las placas de encofrado para realizar el molde deseado como detalla en el siguiente párrafo que aparece en la descripción de su patente.

Los moldes para fabricar tales losas se pueden ensamblar de varias formas, y como se muestra en las Figs. 8 a 11 y 17 comprenden láminas delgadas y planas de madera o metal alrededor del saliente n desde los bordes de la losa. Los bordes de los cuales y alternando con las placas se colocan elementos espaciadores de lengüetas o ranuras f. Las placas con los elementos espaciadores entre ellas se colocan verticalmente sobre sus bordes longitudinales (Wettstein 1927).

Antes de colocar el alambre de tensado recubre el molde con una fina capa de cemento con fibras que finalizara el fraguado junto con el hormigón vertido una vez las láminas de molde estén ensambladas.

Los refuerzos, si son de longitud individual adecuada o de malla de alambre, pueden ensamblarse con el molde colocando tiras espaciadoras g preferiblemente, pero no necesariamente, aseguradas a las láminas o placas alrededor de sus márgenes y entre estas tiras o repisas distanciadores y las partes con lengüeta o ranura f del molde. Si los alambres o la malla m están sueltos, es decir, no están bien estirados, la mezcla de cemento cuando se vierte en el molde los pondrá en contacto con las láminas del molde, de modo que en la losa terminada quedarán en la superficie, excepto en los márgenes. de la losa, donde se mantienen debajo de la superficie de la losa por las tiras espaciadoras g.

Si los refuerzos están bien estirados, utilizo una camilla que consiste en una lámina de metal t para sujetar temporalmente los refuerzos en o contra los lados del molde, y que se retira antes de que fragüe el material de la losa.

En lugar de enrollar la placa de encofrado directamente en direcciones cruzadas, esta placa se puede enrollar en una dirección y el alambre o cordón fino para la otra dirección enrollar bajo tensión en un dispositivo especial, las Figs. 5 y 6, y esta forma enrollada se inserta entre los dos devanados adyacentes realizados en el dispositivo especial al ensamblar el molde(Wettstein 1927).

Para agilizar el proceso de colocación del alambre de refuerzo utiliza una maquinaria ideada por el mismo Wettstein. Esta máquina permite enrollar en el molde los alambres y permite el ajuste tanto para el uso de placas diferentes como la distancia entre los alambres.

Las barras q se colocan contra los bordes externos de los brazos py el alambre se enrolla y se espacia adecuadamente alrededor de los dos brazos y barras como se ilustra. Luego, el marco se enrolla de arriba hacia abajo, o viceversa, con alambre o cordón de refuerzo y se coloca en una cavidad del molde, y las varillas se pasan a través de las placas del molde dy las ranuras 8. El brazo móvil p se suelta y se retira ligeramente y se quitó el marco, dejando las barras a sujetando las barras g. que soportan los cables. Las placas de molde d enrolladas o no, se ensamblan con los devanados m, como se muestra en las Figs. 5-10. Las barras también sirven para sujetar juntas las secciones del molde; una vez que los alambres se han colocado en la cavidad del molde, se inserta un esparcidor t para sujetarlos contra los lados del molde. Después del vertido y antes de que fragüe la mezcla, se retiran los esparcidores ty las varillas g(Wettstein 1927).

Las formas curvas se realizan mediante moldes metálicos muy finos que se podían doblar para que adopte la forma adecuada. Luego se coloca los refuerzos y después de colocar los extremos semicirculares de lengüeta y ranura como en la Fig. 4, se coloca un núcleo semicilíndrico o cilíndrico en estos extremos circulares y se vierte el material plástico. Esto da como resultado una tubería o una forma curva reforzada en la superficie externa, en lugar de que el refuerzo esté incrustado dentro del espesor de la tubería(Wettstein 1927).

Una de las principales novedades de la patente de Wettstein es la utilización de alambres muy finos que mejoran la adherencia y por tanto mejora la transmisión de la fuerza de tensado entre acero y hormigón, aunque el pretensado aplicado por Wettstein demasiado flojo que desaparecía al poco tiempo de entrar en carga el bloque.

### 7.11. Patente R.E. Dill US 1684663 (1925).

En 1923 Richard E. Dill, ingeniero estadounidense, solicitará una patente que no será aprobada seguramente porque contenía errores en el diseño o en su descripción. Lo sabemos porque la cita en la descripción de su patente definitiva solicitada en 1925 (ilustración 46).

En la patente de 1923 menciona la importancia en el hormigón pretensado de utilizar acero de alta resistencia según menciona el propio Dill los aceros de alta resistencia de la época estaban en 30.000 psi o 207 MPa. Esta primera patente es una patente de hormigón pretensado donde las armaduras trabajan mediante la adherencia entre hormigón acero. Dill creía que se debía someter al acero a cargas ligeramente inferiores a su límite elástico.

En la descripción de la patente definitiva de 1925 cambia el funcionamiento de las armaduras que en la anterior patente trabajaban por adherencia, eran pretensadas. En la de 1925 son armaduras postensas, no adherentes, lo consigue aplicando un recubrimiento a las armaduras de betún. El cambio es debido al hecho que Dill quiere solucionar los problemas de retracción y el acortamiento elástico, que considera superior al hormigón con armaduras pretensas adherentes (ilustración 46).

En el texto de patente describe también la posibilidad de formar armaduras postensas con adherencia indirecta mediante la adición de mortero después del tesado de armaduras alojadas en huecos que permitan su postensado. También destaca su propuesta de unir en seco piezas prefabricadas (esto segundo con menos claridad), pero no protege ninguna de estas dos últimas innovaciones propuestas (Dill 1928).

Dill, de un modo semejante a Steiner, reconoce el hormigón pretensado como un material (o solución técnica) apta para todo tipo de estructuras: puentes, techos de edificios, vigas, postes, silos, tubos a presión, etc. De hecho, hay diversos detalles de la patente de Dill que hacen pensar que conocía la de Steiner i que ésta le había influido (Sanabra Loewe 2014).

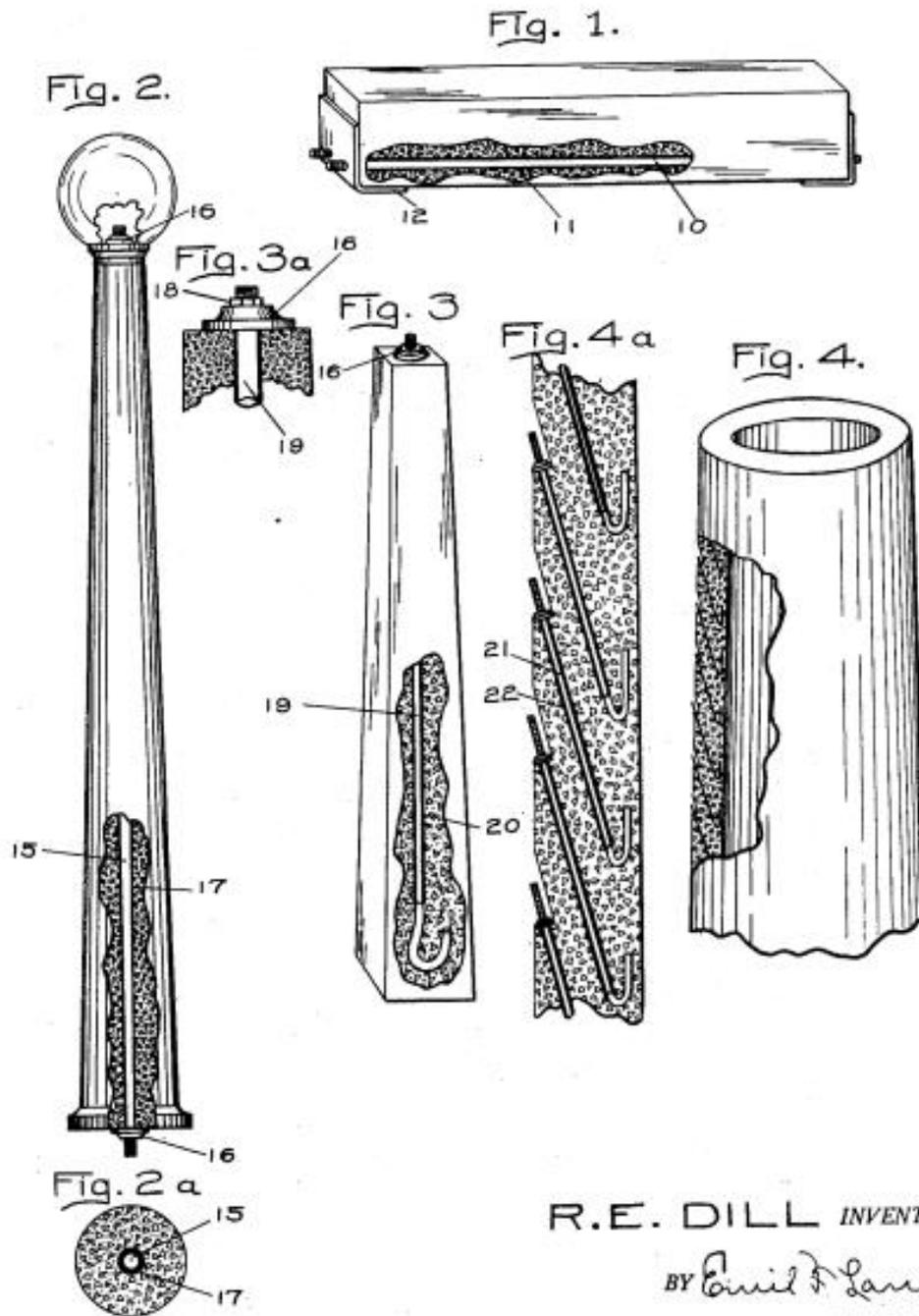
Sept. 18, 1928.

R. E. DILL

1,684,663

MANUFACTURE OF REINFORCED CONCRETE

Filed Feb. 7, 1925



R. E. DILL INVENTOR.

BY *Emil D. Lange*  
ATTORNEY

Ilustración 46 Patente R.E. Dill US 1684663 (1925).

En la descripción de su patente Dill afirma que es una invención aplicable al hormigón armado en general. En ella quiere conseguir que el hormigón y el acero combinen y que sea razonable científicamente es decir la parte práctica o de experimentación sea corroborada por un fundamento teórico o una base de cálculo ampliamente aceptada. Su invención es proporcionar una herramienta entre el hormigón y las armaduras para que este pueda ser tensado.

En los planos aportados en la patente podemos observar:

La figura 1 (ilustración 46) se corresponde a una vista en perspectiva de una viga la cual deja al descubierto el sistema utilizado para comprimir el hormigón. En esta figura 1 podemos deducir que las armaduras transmiten parte de su tensado por adherencia de las armaduras y parte por las placas de anclaje que hay en los extremos de la viga.

La figura 2 (ilustración 46) es el dibujo de una farola de hormigón pretensada en planta y alzado, donde también deja ver el sistema de tensado mediante una barra de acero en este caso hueca que es donde se introducirán los cables para suministrar energía eléctrica. De este ejemplo podemos deducir que Dill no se limita a elementos estructurales, sino que pretende hacer del pretensado de hormigón un elemento con multitud de funciones. En la patente no lo dice, pero se intuye que Dill también recubre el tubo con betún para impedir la adherencia entre acero y hormigón.

Dill describe la figura tres como un poste o pilar con el tirante incrustado y anclado en el hormigón además de aportar una planta y un alzado que también se puede ver el tirante. En esta ocasión podemos ver el tirante que está sujeto en el hormigón por un anclaje en gancho que funciona por adherencia, pero solo actúa por adherencia la superficie del gancho ya que la barra esta recubierta de betún a excepción de la zona del gancho. En el otro extremo aparece el sistema de tensado tradicional de que la barra de acero o tensor sobresale y a esta se le enrosca una tuerca para aplicar las tensiones de compresión al hormigón.

La figura 4 (ilustración 46) es un alzado de un cilindro de hormigón pretensado con un detalle de la sección donde vemos el pretensado. Aunque Dill afirma que este cilindro pertenece a la parte superior de una chimenea. Donde el sistema de pretensado es muy similar al del pilar con armaduras ancladas con anclajes de gancho funcionan una vez fraguado el hormigón es decir son postensas. El sistema pone muchas armaduras paralelas entre sí y recorriendo toda la superficie del cilindro.

Dill era plenamente módulo que el principal problema de la combinación entre hormigón era su diferente coeficiente de elasticidad como lo describe en la patente. Donde afirma que el módulo de elasticidad del acero es 10 veces más grande que el del hormigón. Eso implica que el hormigón fisurara mucho antes que el acero provocando un acortamiento en la durabilidad del material debido a que las armaduras no estarán protegidas frente a la humedad y el fuego.

La invención de Dill se basa en la fabricación de un elemento de hormigón y acero que no permita la fisuración del hormigón, hasta que el acero alcance su límite elástico.

El mismo Dill detecta un par de problemas que intentará resolver en su patente los enumera antes de contar en que consiste su invento.

La primera de ellas es la pérdida de volumen del hormigón producida durante el proceso de fraguado de este.

El segundo es que el hormigón se contrae durante el proceso de fraguado y no solo eso, sino que Dill también detecta que como más cantidad de cemento lleve el hormigón mayor serán las tensiones internas del hormigón debidas al fraguado.

La última es al aplicar compresión al hormigón este reduce su tamaño a la misma velocidad y se expande bajo tensiones.

Debido a estas tres razones, cuando el hormigón es vertido sobre el acero tensado. El hormigón empieza el proceso de fraguado, donde este se contrae. Después de haber finalizado el proceso de fraguado continuará el proceso de endurecimiento donde el hormigón seguirá tensionándose. Por culpa de estos procesos el elemento de acero y hormigón perderá parte o la totalidad de la tensión colocada en el acero. Este proceso puede llegar al punto de agrietar el hormigón por sí solo sin este haber recibido ninguna carga exterior. Y en el hipotético caso de que el hormigón sea muy fino se deje húmedo y no pierda volumen. Al aplicar una carga de compresión sobre el hormigón se va a comprimir perdiendo parte de la tensión.

La principal innovación de Dill se basa en el razonamiento sobre la aparición de las grietas anteriormente explicado y su convicción de que el hormigón no se encuentra en reposo. Según Dill solo aparecen las grietas cuando el hormigón se encuentra tensionado. Lo que provoca que la barra de tensiones ya este tensionada antes incluso de aplicarle ninguna fuerza. El invento de Dill intenta solucionar este problema para ello propone el recubrimiento de las armaduras de tensión o el hormigón de una sustancia que impida la adherencia del uno con el otro.

He inventado el uso de cualquier sustancia o combinación de elementos que, en primer lugar, impidan la adherencia del acero al hormigón y, en segundo lugar, posteriormente al fraguado del hormigón, proporcionen suficiente elasticidad o flujo o deslizamiento para permitir la extensión del acero sin material dañando el acero o el hormigón en el que está incrustado. He inventado el uso de una sustancia, o una combinación de sustancias que permitirán un flujo tan fácil que el hormigón al encogerse mientras fragua o seca, se encogerá a lo largo de la línea del refuerzo sin ayuda exterior. El uso del calor como factor de aumento de la movilidad u otros medios físicos o químicos para asegurar el mismo resultado se incluye expresamente como parte de mi invención(Dill 1928).

Afirma que hay muchas sustancias que pueden conseguir este propósito una de ellas y la que recomienda Dill es el asfalto líquido.

En la patente Dill hace hincapié a las posibilidades que tiene su invento por ello en los dibujos y en las descripciones de estos pretende hacer ver la funcionalidad de su patente. Parte de su invento para crear elementos de hormigón armado. Dill afirma que las construcciones en hormigón armado constan de muchas secciones esbeltas, las armaduras están recubiertas y sumergidas por el hormigón. Con el revestimiento plástico de las armaduras permitirá la merma de volumen del hormigón donde esta será más significativa es decir en el lado longitudinal de cualquier pieza de hormigón pretensado. Eso evitara la aparición de grietas.

Según como describe la patente Dill hay dos formas de construir elementos de hormigón

pretensado uno el que no aparece en los dibujos que es el que va uniendo secciones de hormigón ya endurecido y lo va uniendo mediante pasta de cemento y pretensado los tirantes donde los mismos se colocan en la unión entre las piezas. Otro método que define es el que las piezas están unidas por uniones sólidas y se introduce los tirantes por un orificio que coincide en todas las piezas dándole continuidad. Los tirantes son tensados y así la pieza es un elemento de hormigón postensado.

Como se ha explicado, el uso de mi invención permite la construcción de productos de hormigón armado en los que el hormigón no está en piezas, ni en tensión en su totalidad o en parte, como es el caso del hormigón armado como se construye habitualmente, pero está libre de tensión o está en compresión y el acero en tensión como suele ser la relación deseable o cuando ambos elementos están en reposo. Además, el uso de mi invención permite la producción de hormigón sin fisuras en forma cilíndrica para su uso como cisternas o tuberías de presión. En general, se reconoce que una mezcla de hormigón densa que no tiene grietas es impermeable a una presión moderada de agua o aire. Es obvio que el uso de mi invención en la producción de tales productos es muy importante(Dill 1928).

En este texto extraído de la patente de Dill intenta explicar el funcionamiento de su patente y que puede realizar piezas continuas y cilíndricas como tuberías o cisternas.

Dill detecta un problema con el acero utilizado, ya que para que el efecto del pretensado sea notorio la fuerza aplicada al acero es tal que se llega al límite elástico del acero dulce. En la patente se narra porque falla la sección de acero diciendo que esta falla porque por la deformada de la barra de acero cuando está traccionada la sección se debilita debido a que sufre una reducción en su sección provocando en estos puntos que la sección sea más débil. Por eso insiste en que la compresión al hormigón debe lograrse antes de que el acero llega al límite elástico.

Una de las principales innovaciones atribuidas a Dill la podemos observar en el siguiente texto extraído también de su patente en el cual afirma que la utilización de acero de alta resistencia supone que el pretensado sea mayor, repercutiendo en un mejor comportamiento del hormigón, y que el precio no se dispare debido a la cantidad de acero utilizado si este fuera un acero dulce.

Una ventaja adicional en el uso de mi invención consiste en la utilización de acero duro, o acero de alto límite elástico y alto límite elástico de hormigón de compensación con la resistencia reforzada. Es la práctica actual utilizar acero. La deformación de una estructura de hormigón reforzado suficiente para desarrollar la fuerza completa del acero dulce es suficiente para arruinar por completo el hormigón. Con el uso de mi invención, la resistencia a la tracción requerida se puede obtener mucho más barata mediante la sustitución de acero duro, ya que la resistencia que se puede obtener mediante la sustitución de acero duro por acero blando aumenta mucho más rápidamente que el aumento de costo(Dill 1928).

Dill en sus dibujos deja ver los típicos sistemas de tensado de la época como son los formados por varillas roscadas, tuercas y arandelas, pero el inventor en la descripción deja intuir que es un punto donde se puede innovar y deja esta afirmación no reclamo ese método, ni me limito a ningún método específico para producir tensión(Dill 1928).

Los materiales utilizados en la invención son productos de hormigón de cemento de umnita o cemento Portland y acero. Aunque el material más innovador de esta patente es el asfalto líquido que es un material plástico que se puede aplicar fácilmente para dar un recubrimiento a las armaduras que impide la adherencia hormigón acero.

En el final de la descripción de la patente Dill enumera las invenciones que reclama como propias. La primera es la creación de un método para reforzar hormigón que permite el fraguado y evita la unión entre armaduras y hormigón durante el fraguado, finalmente este permite tensar las armaduras. La segunda invención que reclama como suya es el recubrimiento de las armaduras o aditivo que impide la adherencia entre acero y hormigón, permitiendo que el hormigón fragüe. La tercera y última es un método donde se aplica el revestimiento el cual permite un retesado de las armaduras una vez fraguado debido a que no hay adherencia entre hormigón y las armaduras.

## 7.12. Patente E. Freyssinet GB 338864 (1928).

El ingeniero civil francés Eugène Freyssinet 1879-1962 en 1902 asistirá a las lecciones de hormigón armado de Charles Rabut en "l'École des Ponts et Chaussées" de Paris. La visita a las obras de Rabut para la construcción del voladizo de la calle Rome sobre la estación de Saint Lazare, parece que fueron una de las influencias más importantes para Freyssinet en esta época (Fernández Ordóñez 1978), así como el hecho de asistir a sus lecciones sobre los efectos de aplicar deformaciones impuestas a las estructuras (Billington 1997). Desde el momento en que asistió a aquellas lecciones se le ocurre la posibilidad de introducir acciones de pretensado en las armaduras del hormigón armado y la posibilidad de introducir deformaciones impuestas en las estructuras (Freyssinet and Seailles 1929).

Freyssinet es considerado el padre del hormigón pretensado, ya que es uno de los primeros en utilizarlo en construcciones civiles. Además de perfeccionar su uso y abaratar costes en su uso. Caben destacar antes de resumir la patente de 1928 "Process for the Manufacture of Reinforced Concred" (ilustración 55) que en 1907 utilizó un nuevo sistema de descimbrado en el Puente Praireals-Sur-Bresbe mediante gatos hidráulicos conectados a la misma presión que permitían un ahorro en mano de obra y los gatos hidráulicos eran reutilizables. Descubrió las deformaciones diferidas en el hormigón armado. Este descubrimiento fue posible debido a que el Puente de Veudre sufrió una gran deformación con el paso de los años en la clave de sus arcos de gran luz unos 72m. Después de un estudio intensivo de lo sucedido en el Puente de Veudre comenzó a proyectar las estructuras con contra flechas que contrarrestaban las deformaciones diferidas. También estudio como mejorar la resistencia del hormigón, la mejora implementando una buena compactación logrará hormigones con resistencias de 50Mpa lo normal en la época era de 20Mpa, y una mejor colocación de las armaduras que las posicionaba normales a las tensiones producidas por el hormigón. Posteriormente, con el afán de abaratar costes en las obras civiles innovará en el cimbrado con el desarrollo o la introducción del clavo de cabeza plana en las obras haciendo posible que mediante paneles de madera rígidos y flexibles se pudieran producir en la obra los encofrados sin la necesidad de mano de obra muy especializada.

En la patente inglesa (ilustración 55) Eugène Freyssinet junto con Jean Seailles describirán su invento tanto de forma escrita como con la aportación de dibujos o planos que aclaren o completen la información para la comprensión de su invención.

La invención pretende la creación de un nuevo método para la fabricación de piezas de hormigón armado prefabricado los cuales serán moldeados y adaptados para su utilización en sus diferentes funciones. Unos ejemplos que pone Freyssinet son postes, vigas, placas, vías de ferrocarril, traviesas, canalones, vallas, paneles o similares (Freyssinet and Seailles 1929).

Freyssinet tiene pleno conocimiento que después del fraguado y posterior endurecimiento. El hormigón se va a contraer de una manera significativa por la acción de contracción por esta causa las armaduras también se comprimen. Debido a este proceso de fraguado y endurecimiento del hormigón pueden aparecer las fisuras por contracción que en el peor de los casos pueden aparecer fracturas. Freyssinet sabe de la importancia de un buen fraguado y endurecimiento del hormigón armado para evitar en la medida de lo posible este fenómeno.

Freyssinet es conocedor de propuestas para evitar esas fisuras como tensionar elementos de refuerzo y cuando sueltan los elementos de refuerzo sirven para compensar el acortamiento del hormigón por culpa de la contracción.

También son conocedores de la diferencia en la deformación entre hormigón en masa y el hormigón armado ya que afirma que si el hormigón armado fuera un material homogéneo tendría la misma resistencia a tracción que a compresión. Característica desfavorable cuando la tensión impuesta al hormigón es grande.

Freyssinet afirma en la patente haber descubierto que es posible contrarrestar todos los inconvenientes antes presentados. Así como dotar a los artículos de hormigón resistencias propias del hormigón armado, dándoles propiedades propias de los materiales homogéneos con una resistencia igual en tracción y compresión. Pretende conseguirlo aplicando ciertas deformaciones permanentes en el hormigón antes de que la pieza en cuestión reciba cargas debidas a su función.

En la descripción de la patente se dice porque las armaduras se deben tensar más de que las pérdidas sufridas en por la contracción del hormigón durante el proceso de fraguado y endurecimiento, las pérdidas de tensión por compresión elástica del hormigón cuando está sometido a fuerzas de compresión y por último el acero tiene que conservar tensión para aguantar las fuerzas debidas a su función o de servicio de la pieza de hormigón pretensado.

Freyssinet es conocedor de patentes que como la de Chaudy, Dill y más que proponen formar postes, vigas y más elementos con barras y alambres. Él en la patente propone la utilización de acero de alta resistencia porque este acero tiene un límite elástico más elevado que el utilizado en el hormigón armado.

Esta invención según Freyssinet que las deformaciones son calculadas por métodos teóricos o empíricos que donarán los resultados a las tensiones que debe ser sometido el acero para resistir todas las perdidas antes descritas.

Es decir, la invención consiste en someter las armaduras a una tensión inicial igual a la suma de las caídas de tensión y a la tensión permanente necesaria para establecer tensiones en el hormigón(Freyssinet and Seailles 1929).

Freyssinet argumenta que esto supone una tensión muy elevada para las armaduras y para ello es necesario la utilización de acero de muy alta resistencia y la necesidad de aumentar el límite elástico supone utilizar trefilado o alambre. Para que el acero pueda resistir las tensiones requeridas. Para tensarlos dice que se pueden conseguir mediante potentes medios mecánicos o los gatos hidráulicos.

En la patente también se detalla que en algunas ocasiones son necesarios la utilización de anclajes para que el acero conserve la tensión, en otras ocasiones, es suficiente con la adherencia entre el acero/hormigón.

En los dibujos aparece un ejemplo de cómo se realizaría una pieza de hormigón. Aparece dibujadas 8 figuras que ilustran mediante secciones, plantas y detalles con una escala mayor para que la invención pueda ser entendida por cualquier técnico.

En la figura 1 (ilustración 47) podemos observar un ejemplo de viga o elemento de hormigón, de ser con armaduras en la cara superior e inferior. Donde se aplica la invención de Freyssinet la vista es una sección longitudinal donde podemos observar el molde y el sistema de tensado junto con el sistema de anclado.

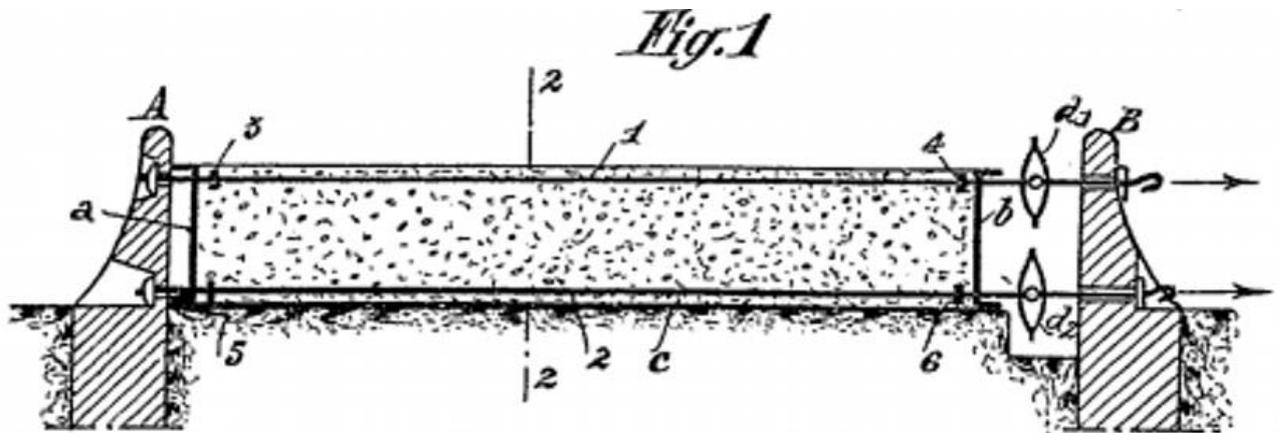


Ilustración 47 Patente E. Freyssinet GB 338864 (1928).

La figura 2 (ilustración 48) se corresponde a una sección transversal del bloque de hormigón de la figura 1 que tiene forma de rectángulo. En la figura 2 podemos observar el molde y las armaduras tensadas tanto en la parte superior e inferior.

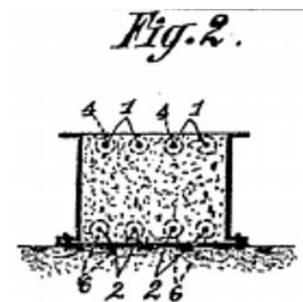


Ilustración 48 Patente E. Freyssinet GB 338864 (1928).

Freyssinet nos muestra en la figura 3 (ilustración 49) una sección que recorre todo el largo del bloque de hormigón. En este caso el bloque

según la descripción de la patente es un dibujo de un ejemplo para moldear bloques cónicos y piramidales alineados (Freyssinet and Seailles 1929). También como en la figura 1 (ilustración 47) se pudo observar la colocación de los refuerzos, así como los elementos de anclaje de estos y donde se aplica la tensión a los refuerzos.

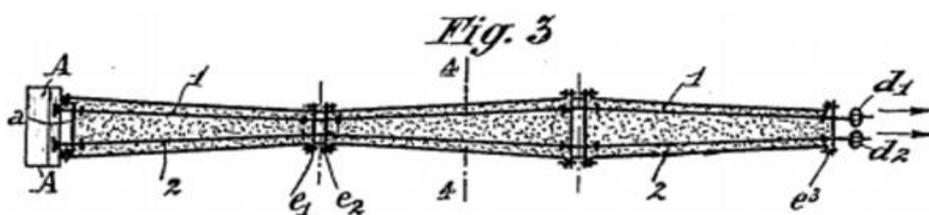


Ilustración 49 Patente E. Freyssinet GB 338864 (1928).



Ilustración 50 Patente E. Freyssinet GB 338864 (1928).

La figura 4ª (ilustración 50) es una sección si la figura 3 (ilustración 49) fuera un bloque piramidal donde vemos los elementos de refuerzo, así como el molde. La figura 4b (ilustración 50) es unas secciones transversales de la figura 3, que corresponde a un bloque de hormigón cónico. El molde es un molde que está compuesto por 2 piezas para facilitar el vertido del hormigón.

En el dibujo de la figura 5 (ilustración 51) podemos ver como con un solo molde fabrica un par de bloques de hormigón. Es una sección donde vemos los refuerzos y el sistema de tensado, así como las separaciones entre los distintos bloques.

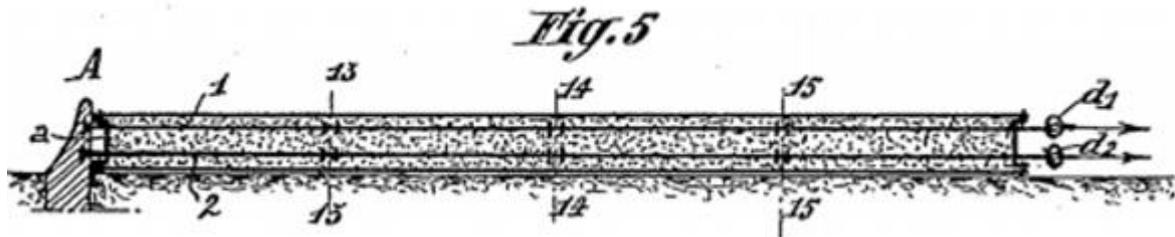


Ilustración 51 Patente E. Freyssinet GB 338864 (1928).

La figura 6 (ilustración 52) muestra el sistema para anclar el refuerzo una vez tensado, se trataría de un caso donde la adherencia entre el hormigón y el acero no fuera suficiente.

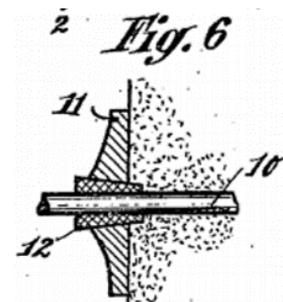


Ilustración 52 Patente E. Freyssinet GB 338864 (1928).

Finalmente, en los dibujos de la patente aparecen las dos últimas figuras la 7 y la 8 (ilustración 53 y 54), estas la primera es la sección longitudinal de un cilindro hueco con un sistema de tensado y moldes bastante más complejos que el resto, ya que el sistema de tensado se produce mediante gatos hidráulicos. Aunque la sección muestra exactamente lo mismo que las anteriores un ejemplo de sistema de tesado, anclado y barras de refuerzo. En la figura 8 (ilustración 54) podemos ver la sección transversal donde observamos que el molde está formado por 3 piezas para facilitar el vertido del hormigón. La disposición de los elementos de refuerzo y la supuesta colocación de los gatos hidráulicos.

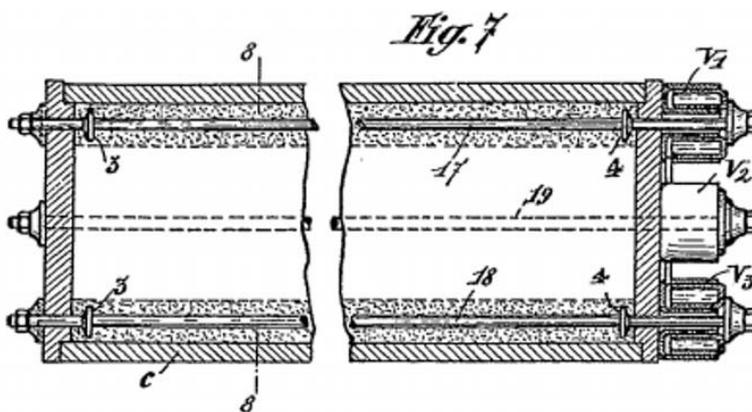


Ilustración 53 Patente E. Freyssinet GB 338864 (1928).

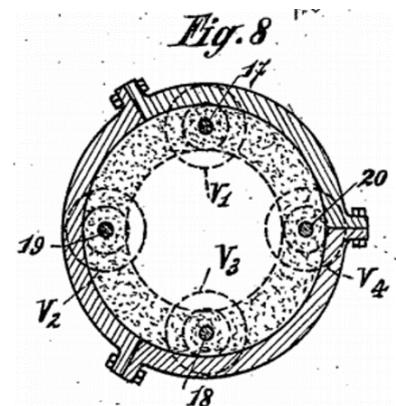


Ilustración 54 Patente E. Freyssinet GB 338864 (1928).

En el método es necesario un dispositivo capaz de tensar los refuerzos de acero. Estos dispositivos pueden anclarse en el molde o ser independiente de él, al igual que los anclajes de las armaduras con el hormigón.

El molde variara de forma según cambie la forma del bloque de hormigón a fabricar al igual que variaran el sistema de tensión y anclaje según la forma o grado de tensión que se desea aplicar al bloque en cuestión.

Freyssinet intenta que su patente sea lo más general posible no se limita a patentar el sistema más innovador de los gatos hidráulicos, sino que introduce en su patente cualquier sistema que produzca la tensión necesaria.

El dispositivo adaptado para impartir la tensión inicial al miembro de refuerzo antes de la fundición puede ser de cualquier naturaleza deseada; sólo es necesario que sea capaz de producir la fuerza de tensión requerida. Por ejemplo, o un dispositivo de tuerca y perno (siendo el perno independiente o no del miembro de refuerzo a estirar), o un sistema de palancas, tornos, levas, cuñas o similares (Freyssinet and Seailles 1929).

También sugiere un sistema que juega con la dilatación del metal cuando este se calienta. Sugiere calentar el metal anclarlo y luego enfriarlo a adecuadamente para que este quede tensionado al contraerse.

Freyssinet argumenta dos soluciones según la naturaleza del molde:

La primera es si el molde y la superficie de apoyo son una misma pieza en esta situación propone el uso de una placa que cierre los extremos del molde, la placa llevará incorporado el dispositivo de tensado.

La segunda es si el molde y la superficie de apoyo son diferentes piezas en ese caso se encargará de los puntos de anclaje que estos serán fijos, también de los sistemas para tensar las armaduras. Freyssinet propone que las superficies de apoyo estén fabricadas de hormigón para que estas resistan fuerzas producidas durante el proceso de fabricación, así como en los elementos huecos puedan servir para la realización de los huecos en los bloques ya sean tubulares o no. Estas superficies estarían recubiertas de hormigón con refuerzos tensados y un molde que da forma a la pieza.

Los anclajes deben garantizar la perfecta transmisión de las fuerzas de tensiones de las armaduras tensas al hormigón para que este se comprima adecuadamente una vez el hormigón haya terminado el proceso de fraguado.

Freyssinet en su patente de 1928 ya enumera un gran número de sistemas para conseguir un anclaje que garantiza, la perfecta compresión del hormigón por medio de las tensiones transmitidas por los tensores metálicos.

Por ejemplo, cada varilla de metal podría ubicarse en un miembro cuya superficie de apoyo sobre el hormigón sea de dimensiones adecuadas, y que se integraría a la varilla ya sea por soldadura, bien por medio de un hilo de rosca, o por medio de una llave (la figura 6 muestra el miembro de refuerzo 10 conectado al dispositivo de anclaje 11 por medio de una llave ahusada 12), o por medio de cuñas, o por cualquier otro dispositivo adecuado (Freyssinet and Seailles 1929).

También destaca la idea de que un mismo anclaje se puede encargarse de transmitir las tensiones al hormigón de más de un elemento tensor. Además, las cabezas de anclaje pueden estar formadas por placas metálicas o piezas de hormigón.

Freyssinet destaca la importancia sobre todo de utilizar el acero de alta resistencia y también destaca el hecho de poder obtener un hormigón de mejor calidad, ya que el hormigón recibirá las fuerzas de compresión antes incluso de entrar en servicio. Por eso Freyssinet aconseja utilizar estos métodos para mejorar las características del hormigón.

La primera es calcular la composición granular más adecuada.

El hormigón vertido en el molde debe ser vibrado para la eliminación de oquedades y una perfecta distribución del material con el mínimo de aire en su interior.

Un proceso de centrifugado que permita que el material sea lo más homogéneo posible, este proceso consiste en variaciones de inercia del elemento durante el vertido del hormigón en el molde. Esto ayuda a tener un bloque donde la resistencia a la compresión sea la misma en todo el bloque y no haya puntos más débiles que serán zonas que tenderán a agrietarse más.

Por último, un proceso que permite un aumento de la resistencia a compresión del hormigón como es la compactación.

Estos procesos en la patente aparecen como procesos que se pueden hacer en bloques de hormigón armado, es decir, sin tensión en los elementos de refuerzo porque los elementos traccionados son correas.

Un intento para optimizar la fabricación de piezas de hormigón pretensado es el de fabricar varias piezas simultáneamente los bloques están dispuestos en línea los moldes tienen agujeros por donde se introduce los elementos de refuerzo. Posteriormente, estos elementos se tesan y se vierte el hormigón una vez fraguado el hormigón estos cables se cortan. Si la adherencia entre hormigón y acero es suficiente no se ponen, antes del proceso de fraguado los anclajes. Aparecen dos ejemplos dibujados que se identifican con esta patente son la figura 3 donde aparecen bloques de sección igual, es decir, los moldes solo varían en longitud y la figura 5 donde los moldes varían tanto en longitud como en sección.

Cuando la forma de los moldes no es igual el sistema de tensado varía un poco y en lugar de tensarlo todo de una sola vez, como se hace cuando los moldes son iguales en sección, se tensa por partes y anclando cada tramo al molde.

Cuando se van a producir postes cónicos o con forma de cuña, los miembros de refuerzo de varios postes consecutivos se someten en primer lugar a tensión, luego los miembros de refuerzo se sujetan en la parte más estrecha contra un miembro que al mismo tiempo forma un tope para el molde. (c1, c2, c3), las correas, los dispositivos de anclaje y, en su caso, los elementos de refuerzo suplementarios se colocan en su lugar, y estando los lados del molde en su lugar, se vierte el hormigón y preferiblemente se hace vibrar. Una vez que ha tenido lugar el endurecimiento, los miembros de refuerzo se cortan en cada extremo de cada poste; Los artículos podrían igualmente ser fabricados de manera integral mediante el proceso sin dividir el molde en compartimentos como si se produjera un solo artículo de considerable longitud, y el hormigón y el metal serían aserrados o divididos en secciones en los lugares requeridos, las secciones se forman como se muestra a 13-13 'o 14-14' en la Fig.5(Freyssinet and Seailles 1929).

En las figuras 7 y 8 se muestra un ejemplo de producción centrífuga, un proceso que consiste en hacer girar un molde cilíndrico con cuatro gatos hidráulicos encargados de dar tensión a las armaduras. El cilindro está formado por tres piezas que se atornillan entre sí. El cilindro puede girar a una velocidad controlada que permita resolver los inconvenientes de la falta de homogeneidad del hormigón y las fisuras producidas por el cambio de volumen durante el proceso de fraguado. Las armaduras en este proceso se someten al tesado antes del fraguado del hormigón.

Freyssinet seguramente conocedor de la patente de Steiner o Hewett propone hacer un rehundido en el hormigón para albergar el anclaje para luego ocultarlo mediante mortero de cemento.

En la patente se señala la principal ventaja que posee el hormigón pretensado la capacidad de trabajar a flexión, es decir, que una parte del hormigón debería estar traccionada, pero esta es contrarrestada por la fuerza de tesado de las armaduras.

Cabe señalar que el proceso descrito produce productos que tienen propiedades completamente nuevas en el sentido de que la compresión del hormigón y el tensado de los miembros de refuerzo de acero se pueden combinar de tal manera que el hormigón, que nunca se estira más allá de los límites dados, no es susceptible de tener fisuras cuando se somete a carga (Freyssinet and Seailles 1929).

Freyssinet insiste en la utilización de hormigón de alta resistencia a la compresión y de acero de alta resistencia con un alto límite de elasticidad. Propone incrementar el límite elástico del acero utilizado mediante proceso artificial, un trefilado.

También se detalla que se puede llevar a la tensión adecuada de las armaduras de varias formas siempre que sea la tensión que se demanda. Se aconseja una de ellas que es la utilización de gatos hidráulicos regulados automáticamente con dinamómetros.

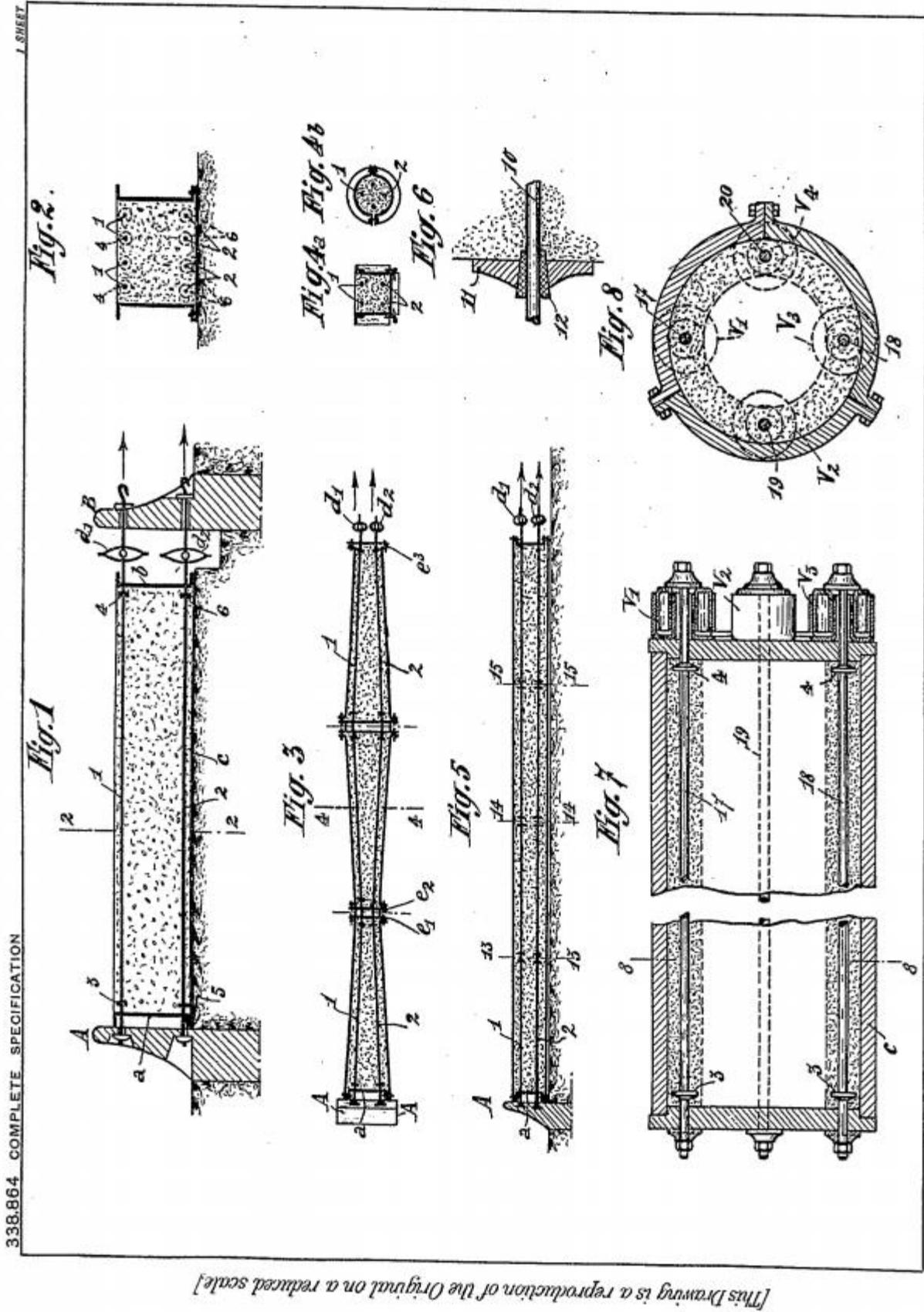


Ilustración 55 Patente E. Freyssinet GB 338864 (1928).

Freyssinet no será el único que investigará las propiedades del hormigón pretensado para solucionar la pérdida del pretensado. En este campo cabe destacar la figura de Oscar Faber un ingeniero y profesor inglés. Este profesor inglés realizara importantes estudios en el campo de las deformaciones diferidas del hormigón como dice Sanabra.

*Este ingeniero y profesor se había convertido en una autoridad en el campo del hormigón, de sus propiedades y sus aplicaciones desde que en 1912 publicó la primera edición de su famoso libro, que pronto se convirtió en obra referencia en muchas universidades del Reino Unido, y del que se han reeditado muchas versiones actualizadas. En 1920 investiga sobre el hormigón pretensado y observa la existencia de deformaciones diferidas (Grote & Marrey, 2000). En 1927, publicó un artículo (Faber O. , 1927) ante la Sociedad de Ingenieros en que trataba el fenómeno de la plastificación del hormigón, así como la retracción y la fluencia, pero sus ideas apenas fueron escuchadas (Fernández Ordóñez, 1978)(Grote & Marrey, 2000)(Sanabra Loewe 2014).*

O. Faber será uno de los principales junto a Freyssinet en los fenómenos de plastificación del hormigón, la fluencia y la retracción gracias a sus publicaciones anteriores a la patente de Freyssinet.

### 7. 13. Patentes F. Dischinger US 1940401 (1933).

Franz Dischinger ingeniero alemán se asociará con Ulrich Finterwalder y trabajaran juntos en la empresa constructora de Dyckerhoff y Widmann, en el periodo comprendido entre 1927 y 1938 inventaron y diseñaron diversos sistemas de estructuras de hormigón pretensado, pero su conocimiento insuficiente del comportamiento a largo plazo de los materiales les impidió que el pretensado de sus diseños fuese verdaderamente eficaz en el tiempo (Sanabra Loewe 2014).

La primera obra construida con hormigón pretensado es el puente de Saale en Alsleben. Lo construye en 1927 este puente es muy parecido sobre todo en geometría a los puentes diseñados por Whipple y WildStephenson sobre el Arno (ilustración 56).

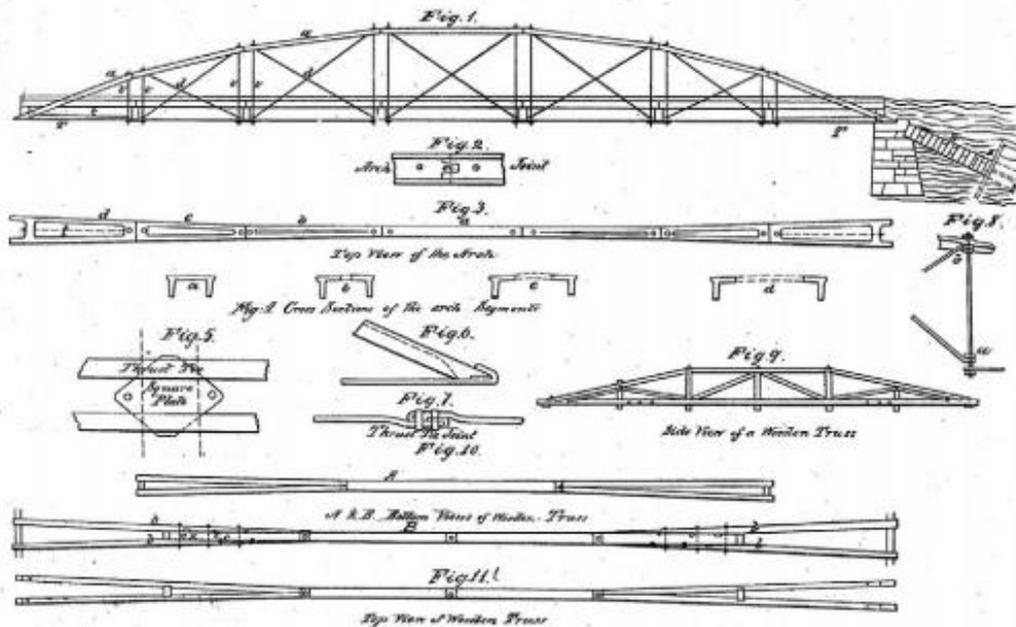


Ilustración 56 Patente Whipple US 2064 (1841).

El puente de Saale en Alsleben está formado por dos cerchas que están formadas por el cordón comprimido tiene forma de parábola mientras que el cordón comprimido es recto este diseño facilitaría el pretensado. Franz Dischinger patentará su idea bajo el título (Dischinger, Herstellung von Eisenbetonbogenbrücken mit angehängter Fahrbahn und Zugbändern aus Eisenbeton, 1931).

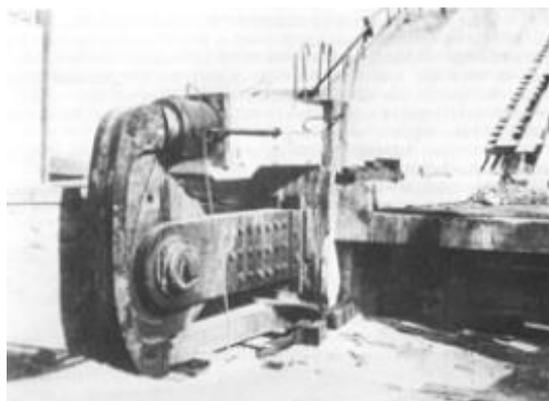


Ilustración 57 Sistema de anclaje del puente de Saale.

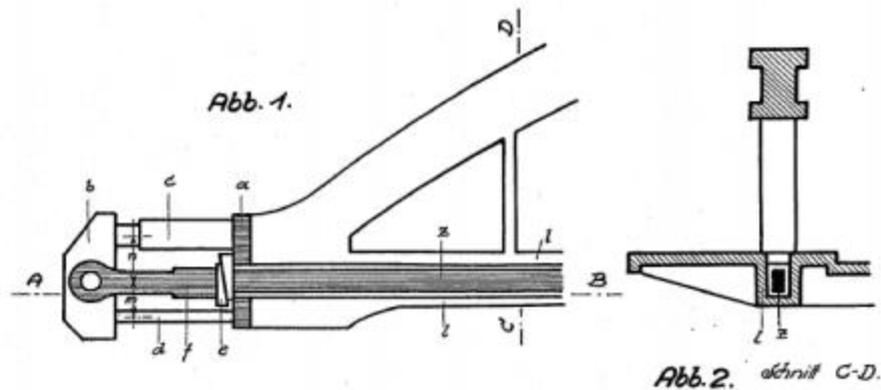


Ilustración 58 Patente de F. Dischinger (1931).

Posteriormente, patentará otra patente de hormigón pretensado esta vez para la creación de puentes postensados sin adherencia entre hormigón y el refuerzo postensado, en ella se utiliza tendones desviados por las costillas de hormigón verticales unidas al tablero (Sanabra Loewe 2014).

Dischinger consigue materializar en hormigón las ideas de Whipple gracias a un mayor conocimiento del material, así como también consigue perfeccionar las patentes de Wilson gracias al gran desarrollo que tuvo el hormigón pretensado. Lo deducimos con el pequeño texto extraído del libro de Sanabra.

*El aspecto que tienen estos puentes en alzado recuerda al de los forjados propuestos por Wilson, pero en realidad, Dischinger comprende mucho mejor la lógica del pretensado y le saca mucho más provecho. La propuesta de Dischinger es la aplicación al hormigón de las técnicas que Whipple había empleado con éxito en los puentes de fundición y acero cerca de 100 años antes. Dischinger ancla los tendones antes de completar su tesado. Dicho tesado se lleva a cabo mediante la deformación a posteriori del trazado, alejando el tendón de las costillas e interponiendo un elemento separador. Este método de tesado le permite un fácil retesado de las armaduras manteniéndolas ancladas. En la misma patente, propone una interesante variante de la propuesta para aplicarla a puentes colgantes, en que a base de acortar los tensores verticales, aplica pretensado tanto al tablero como a las catenarias principales (Dischinger, *Système porteur, en particulier por ponts à poutres*, 1936)(Sanabra Loewe 2014).*

Las invenciones de Dischinger tienen un indudable valor gracias a la gran innovación que aparece en ellas, pero era desconocedor de los artículos o libros publicados por Faber y las innovaciones y estudios de Freyssinet. Esto le hace desconocedor del verdadero comportamiento del hormigón como por ejemplo las deformaciones a largo plazo. Eso a pesar de la utilización de acero de alta resistencia sus estructuras debido a un tensado muy menor del debido y al desconocimiento del comportamiento del hormigón hace que el tensado no dure un periodo grande de tiempo.

Como afirma Sanabra al descubrir los artículos de Freyssinet proto se interesa por ellos y los campos que los artículos desarrollan.

Probablemente por este motivo, y porque pronto conoce los adelantos de Freyssinet y otros ingenieros y académicos en el comportamiento del hormigón, Dischinger se interesa profundamente en conocer el del comportamiento a largo plazo del hormigón, y lleva a cabo estudios sobre este campo que llegarán a ser muy influyentes.

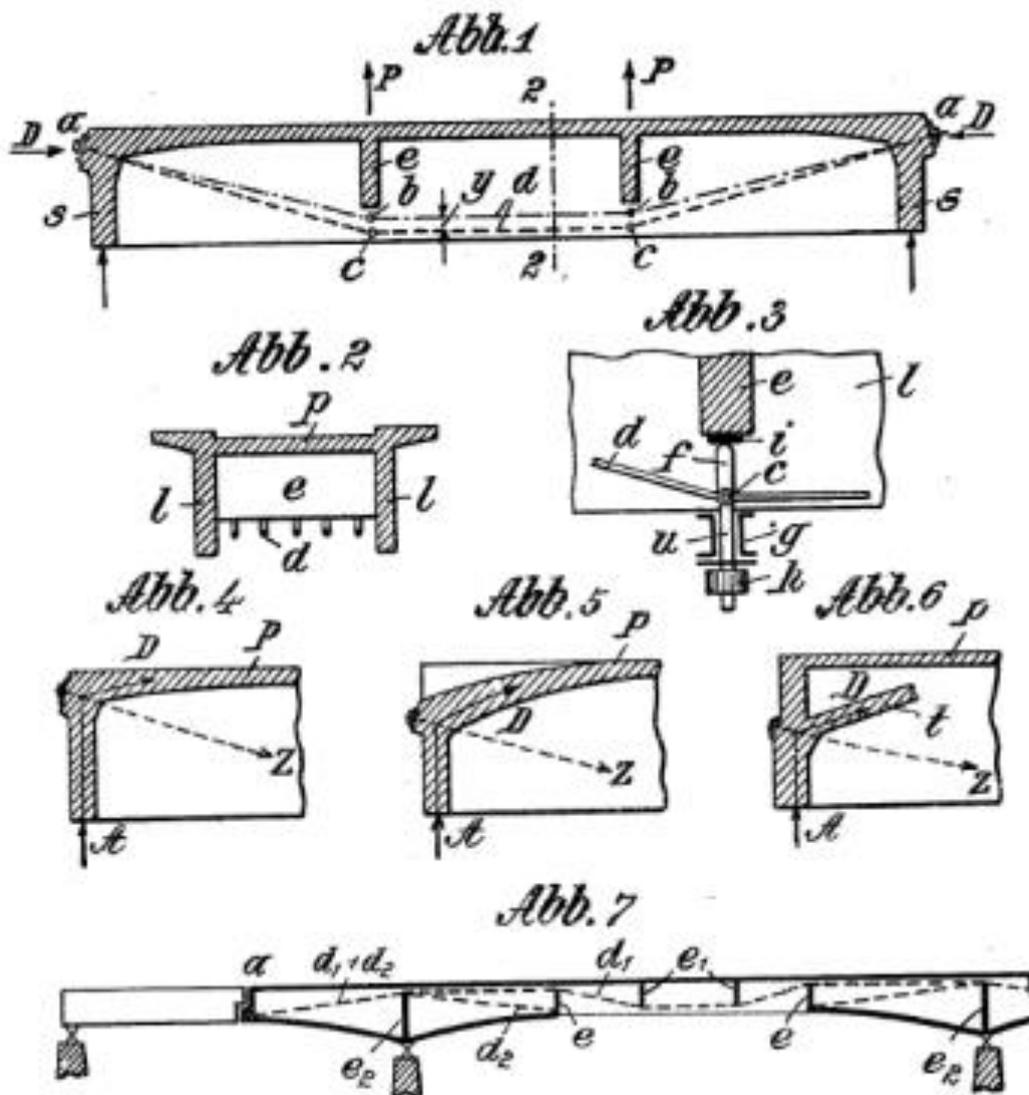


Ilustración 59 Patente de F. Dischinger (1936).

Dischinger también es muy conocido por sus cupulas laminares a continuación presentaré la primera patente de elementos lineales formados con hormigón armado. Que la consigue en el año 1932. Justo después de conseguir otra patente (Dischinger, Herstellung von Eisenbetonbogenbrücken mit angehängter Fahrbahn und Zugbändern aus Eisenbeton, 1931).

Dec. 19, 1933.

F. DISCHINGER

1,940,401

SHELL CUPOLA

Filed March 17, 1932

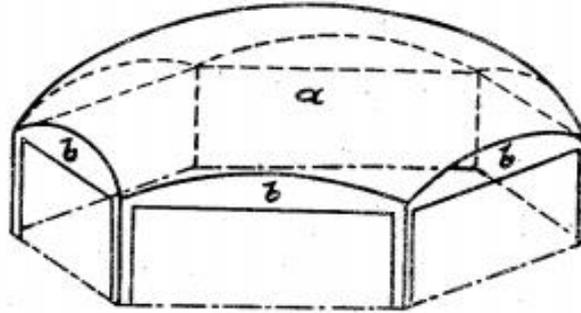


Fig. 1.

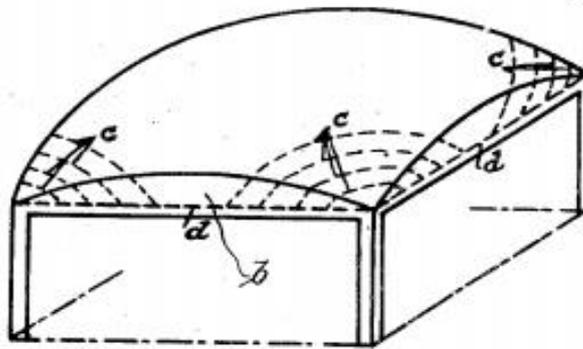


Fig. 2.

**Inventor:**

*F. Dischinger*

Ilustración 60 Patente de Dischinger US 1940401 (1932).

El ingeniero alemán Franz Dischinger patenta en 1932 una invención. La patente de número 599525 y por título "Shell Cupola" (ilustración 60).

La invención de Dischinger pretende crear una carcasa que, junto con elementos de refuerzo, forme un cuerpo capaz de canalizar las cargas hacia los pilares. El menciona desde el principio que su invento debe ser capaz de trabajar como una estructura de flexión unificada y debe cubrir grandes luces.

Como describe en el siguiente párrafo Dischinger pretende dos mejoras principalmente para la cúpula conseguir plantas que se ajusten a polígonos o rectángulos. Y por otra parte que no sean necesarios muros de carga que se puedan construir solo con pilares separados una distancia considerable uno del otro.

Es bien sabido que las carcasas de rotación, es decir, las carcasas como la carcasa de una cúpula, generadas al girar una línea, generalmente una línea curva, alrededor de un eje central, se pueden utilizar para grandes luces con gran economía. Hasta ahora, tales conchas o cúpulas doblemente curvadas podían usarse para grandes edificios de planta circular o elíptica, pero no podían usarse para edificios de otra planta, como poligonales o rectangulares. No se podrían utilizar para la construcción de grandes edificios ordinarios sin muros de soporte intermedios. Otra desventaja de la forma de la cúpula antigua es que no era posible un espaciado amplio de las columnas, porque el anillo de tensión en los aleros del armazón no era lo suficientemente fuerte para soportar la carga de la cúpula en tramos largos. Con esta invención es posible una separación amplia entre columnas(Dischinger 1933).

El autor afirma que su invento consigue sus objetivos gracias a que la cúpula lleva un refuerzo en el borde de elementos integrales verticales que actúan juntamente con todo el refuerzo de la cúpula y forman una especie de vigas uniformes.

El autor argumenta su patente e intenta justificar la, ya que esta no te limita a la creación de espacios con planta circular y puedes espaciar los pilares esto permitirá juntar varias cupulas para crear un mismo espacio.

Los elementos verticales por los que se bordea el caparazón permiten construir estructuras de planta poligonal o rectangular. Se puede realizar cualquier plan deseado de una sala. La unión de los miembros marginales con la carcasa para obtener una acción uniforme de la viga hace que la cúpula sea capaz de transportar las cargas a través de grandes luces a columnas distantes(Dischinger 1933).

En la patente aparece aparecen dos figuras la 1 y la 2 (ilustración 60).

La figura 1 (ilustración 60) se corresponde con la vista en perspectiva de una cúpula diseñada según la invención de Dischinger con planta hexagonal.

La figura 2 (ilustración 60) se corresponde también con la vista en perspectiva de una cúpula, pero esta de planta rectangular.

Dischinger describe que, en el dibujo de la cúpula de planta hexagonal, donde los bordes a de la cúpula se encuentra en un plano vertical entre dos pilares están conectados entre sí mediante elementos marginales. Así es capaz de formar un cuerpo que permite transportar las acciones debidas a la flexión a los pilares.

### 7.14. Patente G. Magnel (1940).

El ingeniero y profesor belga Gustav Magnel estudia los descubrimientos de Freyssinet y posteriormente publicará en 1948 “Le Béton Précontraint” en francés y “Prestressed Concrete” en inglés. El libro es básicamente las enseñanzas que imparte en diversas universidades sobre el hormigón pretensado. Adquiere un papel fundamental en la divulgación del hormigón pretensado en Estados Unidos y Inglaterra (Billington, 2004)(Sanabra Loewe 2014).

Magnel desarrollará años antes junto a Blaton un sistema donde innovará en tres puntos imprescindibles para el pretensado. Estos puntos son los anclajes, el cable, los machos de goma y el dispositivo de tensado. Este sistema se refleja en las patentes que inició los trámites para lograr su propia patente -a través es la sociedad de los hermanos Blaton-, el mismo año que Freyssinet conseguía la patente para su anclaje (1942) (Blaton & Blaton, Procédé et dispositif destinés a exercer et a maintenir une traction sur des fils métalliques, 1944). Magnel logró su patente de anclaje en 1944. Cuando Freyssinet finalmente obtuvo su patente completa en 1947, Magnel apenas tardó 2 años en iniciar la solicitud de su patente para vainas de postensado (Blaton & Blaton, Procédé pour la formation de conduits dans le béton, 1952)(Sanabra Loewe 2014).

En el artículo publicado por May en 1950 explica perfectamente en que consiste el sistema ideado por Magnel.

Primero se explica cómo son, funcionan y que ventajas tienen los espaciadores ideados.

En los conjuntos de alambres que llamaremos cables, aquellos están dispuestos en capas horizontales (cuatro en cada capa) lo que da al cable forma rectangular. La separación entre los alambres es de 4,76mm lo que se logra por unas piezas separadoras o “espaciadores”. La fig. 1 (ilustración 61) muestra una sección del cable, así como la posición y forma de los espaciadores. Estos últimos están hechos de chapa de 25mm lo que hace barata su fabricación en serie.

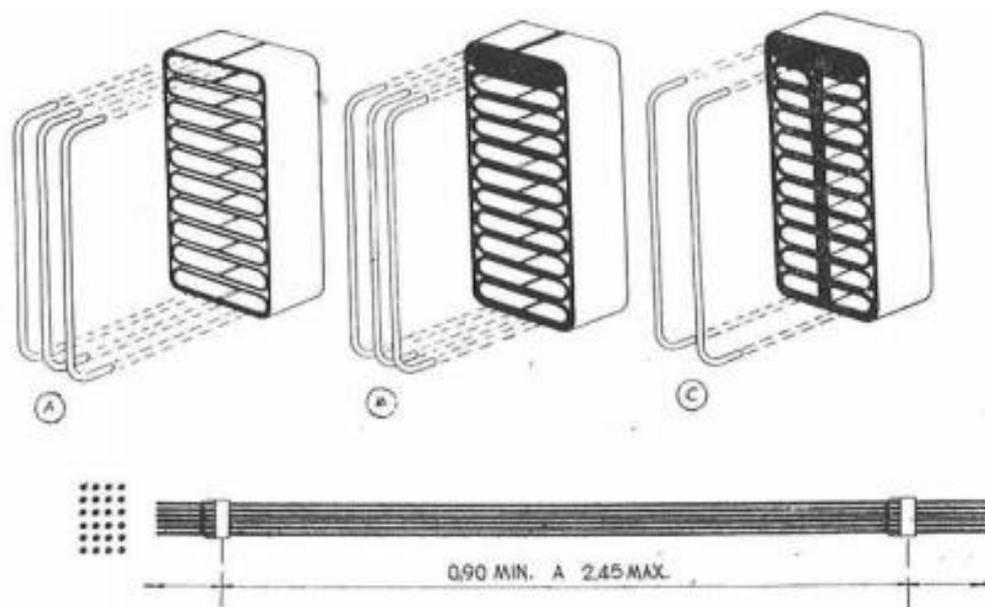


Fig. 1.

Ilustración 61 Espaciadores del sistema Blaton/Magnel.

El tipo de separador varía según los casos. Por ejemplo, si los alambres han de disponerse rectos se emplean espaciadores del tipo A separados entre sí 2,5m. En cambio, si el cable fuese parabólico el tipo de espaciador que se emplearía sería el B. Como puede verse en la figura, es más robusto para que pueda soportar las tenciones que se producen sobre él los alambres al tesarlos, debido a su forma parabólica. La separación, en estos casos, depende de la curvatura. El objeto del espaciador superior macizo es evitar que los alambres de capa superior queden en contacto con el hormigón.

Como hemos dicho, con estos espaciadores los alambres permanecen en su posición correcta, con lo cual se alcanzan dos objetivos:

1. Las pérdidas por rozamiento que aparecen durante el pretensado se reducen a un mínimo.
2. Esta disposición permite que el mortero fluya libremente y asegure una protección completa de los alambres(May 1950).

Después se explica cómo están hechos los anclajes, el tipo de material utilizado y el modo de empleo de los anclajes además de decir la principal ventaja de su sistema que es la de aportar 1,5 veces de tensión de trabajo en el hormigón en elementos sometidos a esfuerzos de flexión.

El anclaje consta de dos unidades fundamentales, la placa de distribución y la placa sándwich. En las figuras 2 y 2a (ilustración 62) se aprecian las dimensiones de la placa sándwich y la dimensión del anclaje con su placa de distribución, placa sándwich, cuñas, y láminas de separación. Estas últimas son simplemente unas láminas de acero colocadas entre cada dos placas sándwich con objetos de que no estén demasiados juntos los cables correspondientes.

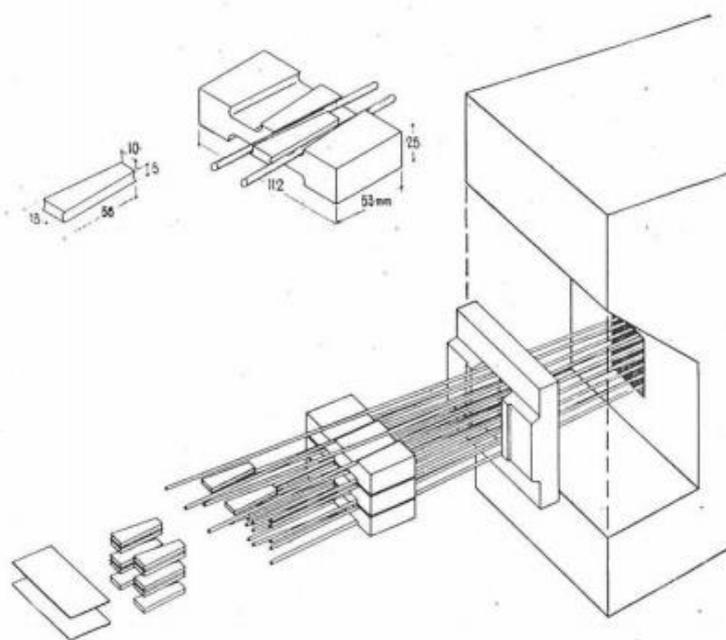


Fig. 2.

*Ilustración 62 Anclaje Sistema Balton/Magnet.*

Las placas sándwich son de acero al carbono y sus dimensiones son: 11,5 cm de longitud x 2,5 cm de espesor x 5,4 cm de anchura. Cada una sujeta cuatro pares de alambres por medio de cuatro muescas trapezoidales en las que luego se introducen sendas cuñas que fijan los alambres. Las cuñas son también de acero al carbono.

La placa de distribución, también de acero, va empotrada, con mortero de cemento en el exterior de la viga. Su misión es repartir la tensión en la zona de anclaje. El área de apoyo de esta placa es tal que produce una compresión local en dicha área de contacto, de 1 ½ veces de tensión de trabajo admisible en el hormigón de la viga a flexión(May 1950).

También desarrolla unas vainas fabricadas en plástico un gran avance, ya que antes de esto todas estaban fabricadas en un metal ligero, pero de esta nueva forma se reduce de forma substancial el coste y también se aligera el peso de la estructura, aunque este peso sea insignificante respecto al peso total de la estructura.

Hasta hace poco los cables iban encerrados en unos tubos ligeros de metal que quedan embebidos en el hormigón. Además de su elevado coste y otros inconvenientes técnicos, este sistema presentaba grandes dificultades para introducir los alambres en caso de cables parabólicos. Se dio un primer paso en la eliminación de estos tubos con la utilización de machos metálicos que podía extraerse después de hormigonar. Esto tenía el inconveniente de no ser aplicable al caso de cables parabólicos.

Por este motivo, en la actualidad se hacen estas fundas de goma (ilustración 63). Después de hormigonar y una vez fraguado el hormigón puede sacarse aquéllas y procederse al tesado de los alambres. Se han fabricado estas fundas de dos secciones tipo: una de 50 x 54 mm y otra de 76 x 54 mm con agujero en la parte central de un diámetro de 30 mm. Para darlas la mayor rigidez necesaria van atravesadas por un tubo de acero(May 1950).

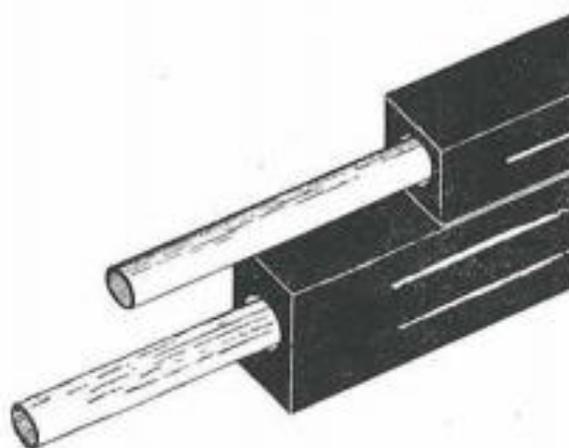


Fig. 3.

*Ilustración 63 Vainas de goma diseñadas por Magnel.*

Con este procedimiento se han construido con éxito vigas hasta de 50 m habiéndose extraído con toda facilidad las fundas de goma, 2 semanas después de hormigonar (May 1950).

Por último, Magnel diseña al igual que Freyssinet, su propio sistema para aplicar el pretensado es decir diseña su propio gato hidráulico.

El dispositivo de tesado (ilustración 65) consta de un gato hidráulico con dos muelles de recuperación sobre un bastidor que en una de las cabezas lleva, para sujetar dos cables, una muesca y su cuña correspondiente, del mismo tipo que las de las placas sándwich. Tesa dos cables cada vez. La tensión se mide por el alargamiento de los cables y comprueba con un manómetro dispuesto sobre la bomba que suministra la presión. El peso aproximado del aparato es de 50 kg (May 1950).

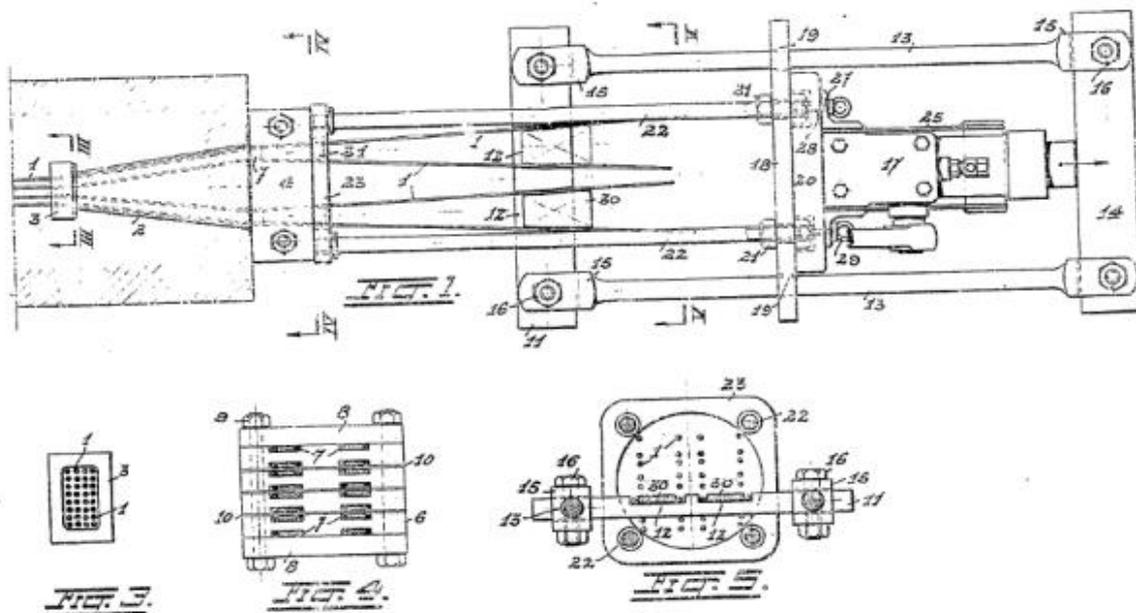


Ilustración 64 Patente del gato hidráulico de Magnel.

Recientemente, se han introducido algunas innovaciones y modificaciones en el proceso de pretensado, particularmente relación con la operación de rellenar de mortero los conductos para los cables. En el procedimiento que ahora se emplea se inyecta el mortero a presión utilizando una máquina que introduce el material en forma coloidal. Se ha visto que este da resultados satisfactorios y proporciona al cable el alto grado de protección que tanto necesita. La disposición que se da a los alambres en el método Magnel/Blaton, facilita en extremo esta operación (May 1950).

Magnel es considerado justo después de Eugène Freyssinet como el padre del pretensado. Además de su labor como divulgador hay que añadir sus grandes innovaciones en el postensado mediante un sistema que la adherencia se consigue mediante el anclaje en los extremos del elemento gracias a la invención de unos sistemas de anclaje innovadores.

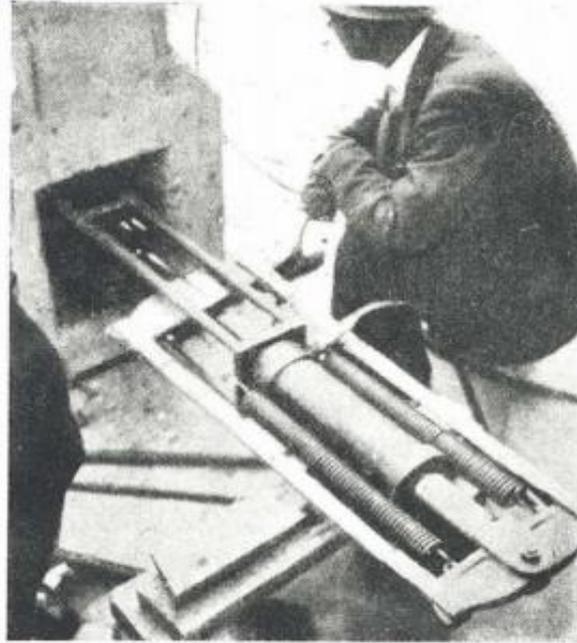
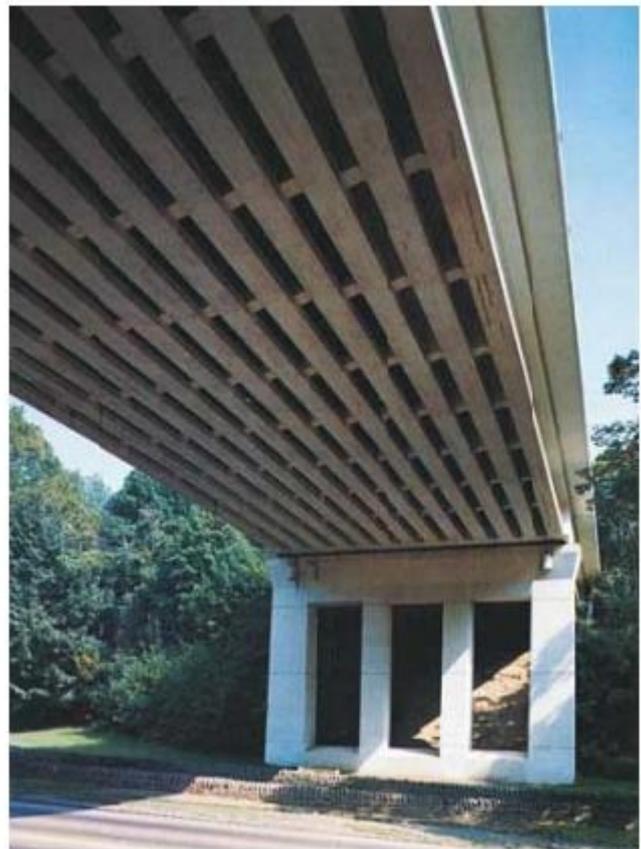


Fig. 4.

*Ilustración 65 Patente del gato hidráulico de Magnel*

Este mismo año diseña y dirige la construcción del Walnut Bridge (Philadelphia, Pennsylvania) (ilustración 66), primer puente pretensado en Estados Unidos. Como demostración de la alta resistencia de las vigas prefabricadas pretensadas empleadas, Magnel realiza un ensayo hasta rotura a escala real de una viga de 48,5 m de luz ante una audiencia de al menos 500 ingenieros (Billington, 2004). La construcción de este puente y el ensayo ante los ingenieros significó un primer impulso muy importante para el pretensado en Estados Unidos.



*Ilustración 66 Walnut Bridge (Philadelphia, Pennsylvania) de Magnel*

### 7.15. Patente E. Hoyer (1940).

El primer contacto que tiene el ingeniero alemán Ewald Hoyer con el hormigón pretensado es en 1925 cuando lleva a cabo un ensayo pagado por el ayuntamiento de Madgebourd para pretensar placas de hormigón mediante alambres tensados, Los ensayos resultan no dan resultados efectivos y Hoyer abandona la idea (Fernández Ordóñez, 1978)(Sanabra Loewe 2014).

Al igual que Freyssinet, Hoyer después de su fracaso con el pretensado de placas de hormigón en 1937 vuelve a intentar al descubrir y estudiar los trabajos realizados por Freyssinet.

A pesar de que algunas de sus propuestas son originales, una parte muy significativa del contenido de sus patentes contienen plagios de la patente de pretensados prefabricados de Freyssinet, que éste ya había obtenido en Alemania en 1935. En un juicio sobre patentes entre Freyssinet y Hoyer, los jueces alemanes consideraban que la patente de Freyssinet tenía primacía sobre la de Hoyer, pero las de este último no fueron anuladas, a causa de la intervención del gobierno alemán, que ya empezaba a actuar con lógica de guerra. Gracias a la guerra, las patentes de Hoyer se hicieron enormemente famosas en toda Europa y la invadieron completamente(Fernández Ordóñez, 1978)(Sanabra Loewe 2014).

Hoyer a pesar de plagiar muchos puntos de las patentes de Freyssinet logra sus patentes debido a que los tribunales están muy condicionados a los dirigentes políticos y a la situación en que se encuentra el país en plena guerra. Aun así, se puede destacar algunos aspectos de la patente de Hoyer que resultan nuevos e innovadores. Un aspecto a destacar es la preocupación de Hoyer para aumentar la adherencia entre el hormigón y los refuerzos de alambres de acero de alta resistencia (Hoyer, Procédé pour augmenter la résistance d'adhérence de fils d'acer dans la confection de pièces en béton à tension préalable, 1943)(Hoyer, Procédé pour l'ancrage et la liaison de fils d'acier à tension préalable élevée dans la confection de béton à tension préalable, 1943), (ilustración 67), (Sanabra Loewe 2014).

Otro aspecto que se diferencia, pero no mucho es la implantación de un sistema de bancada que el hormigón es vertido encima de los moldes que tienen los alambres tensados mediante una vagoneta así se agiliza mucho el proceso de fabricación

También destacan los trabajos de Hoyer para la producción de enormes cantidades de vigas producidas sobre bancadas de más de 100 m y posteriormente cortadas(Einrichtung zur gleichzeitigen Herstellung einer groesseren Zahl langer Betonkoerper mit vorgespannter Bewehrung, 1941)(Leonhardt, Hormigón pretensado, 1967)(Sanabra Loewe 2014).

Este sistema de bancadas ya es mencionado con anterioridad en alguna patente de Freyssinet, pero es Hoyer el primero en realizarlo.

Hoyer fue probablemente el primero en implementarlo a gran escala: entre 1941 y 1944 Hoyer y la empresa Wayss & Freytag construyen gran cantidad de vigas prefabricadas pretensadas (Leonhardt, Hormigón pretensado, 1967)(Sanabra Loewe 2014).

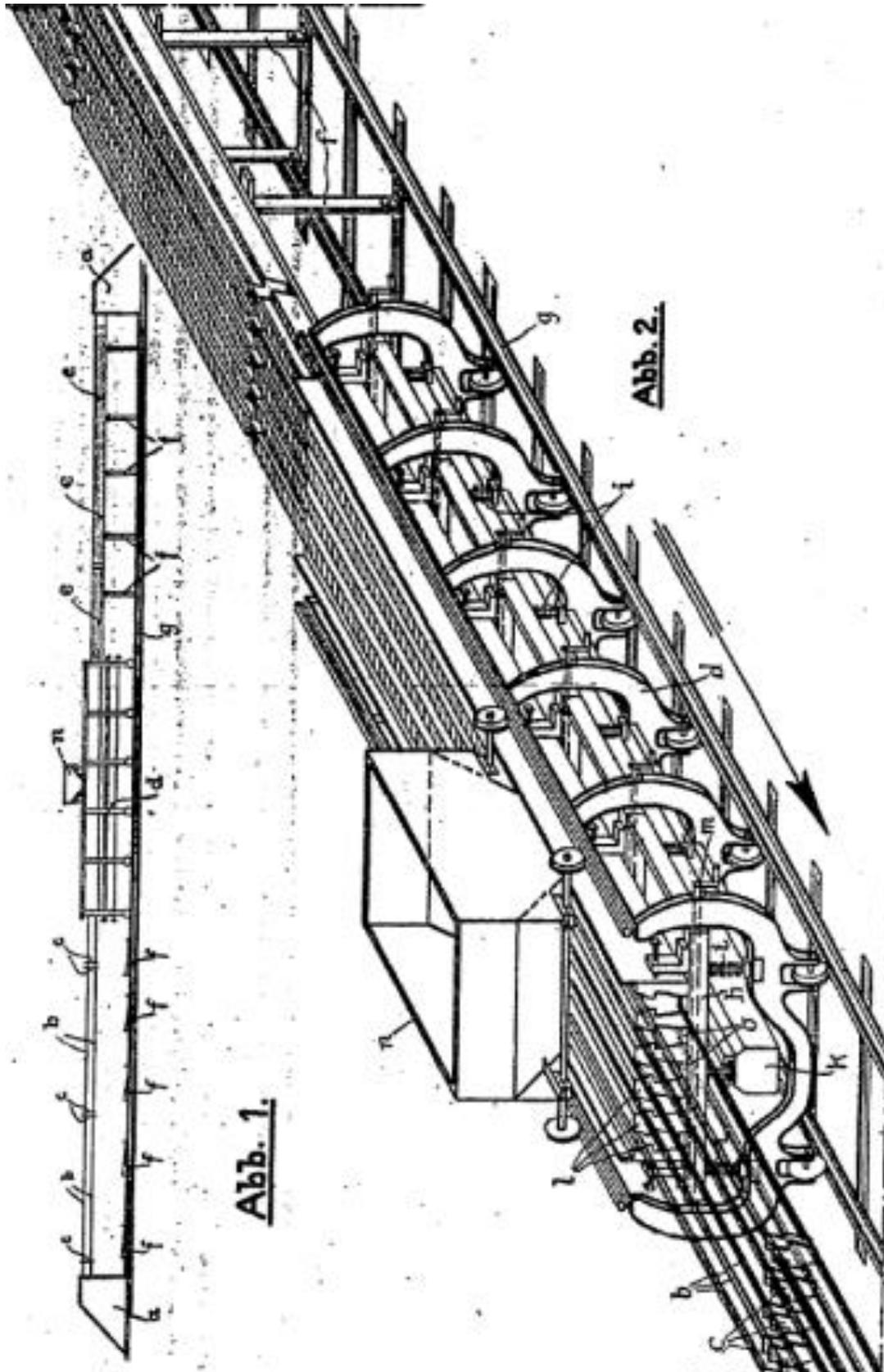


Ilustración 67 Patente de Hoyer

### 7.16. Patente Abeles US 2645115 (1943)

Abeles crea un nuevo sistema que es aún más completo que el de los anteriormente mencionados. La teoría consiste en una sección que combina la armadura pretensada y añade armadura para que la sección resista a tracción. Este nuevo sistema permite reducir de forma significativa tanto la sección necesaria de hormigón como la de las armaduras. Que se traduce en un ahorro en la armadura que para su tiempo donde los procesos de obtención de armaduras de alta resistencia aún no estaban tan desarrollados como en la actualidad provocaba que este proceso sea aún más interesante.

Tal y como se ilustra en el siguiente ejemplo.

*Abeles, que anteriormente fue uno de los principales colaboradores de Emperger, propone colocar, además de la armadura previamente tesa para producir la precompresión, otra capaz, de continuar actuando en la segunda etapa, o sea cuando la acción del pretensado haya sido superada, Con este procedimiento, se obtiene, además, una notable economía de acero, como se demuestra con el siguiente ejemplo.*

*Supóngase que se trata de calcular una viga de sección rectangular, de 10 cm. de ancho, capaz de resistir un momento flector de 1,000 Kg.m. Sea A, la sección de armadura obtenida aplicando el método de Freyssinet y sean B y C, las secciones de armadura pretensa y total, respectivamente, deducidas siguiendo las normas de Abeles. Pues bien, hechos los cálculos oportunos, se encuentra que  $B = 0'56 A$  y  $C = 0'76 A$ . Estas reducciones son consecuencia de la disminución de la sección de hormigón pretensado de la viga que, en el ejemplo citado, pasa de 22cm. a 18cm. de canto.*

*Para el mismo momento de 1.000 Kgs. m. y empleando hormigón de  $\delta = 225 \text{ kg/cm}^2$ , si se trata de hormigón armado corriente, se precisa una viga de 35 x 10 cm. de sección, con una armadura inferior o de tracción  $F = 1,6 \text{ cm}^2$  y otra superior o de compresión  $F_t = 0'5 \cdot F$ , como preventiva y que, al propio tiempo, facilita la colocación de los estribos. La mínima sección que se podría dar a la viga, en estas condiciones, sería de 32 x 10 cm. aumentando la armadura inferior F a 1,7  $\text{cm}^2$  y la superior  $F_t$  a 0,86  $\text{cm}^2$ .*

*Resumiendo, todos estos resultados, se ve que, el hormigón armado corriente, la viga puede variar desde 35 x 10 cm. de sección y 2  $\text{cm}^2$  de armadura, a 32 x 10 cm. y unos 2,6  $\text{cm}^2$  de armadura de redondos. En hormigón pretensado, con arreglo al método de Freyssinet (totalmente pretensado), tendrá 22 x 10 cm. de sección 1,38  $\text{cm}^2$  de armadura y siguiendo el procedimiento de Abeles, 18 por 10 cm. y 1,02  $\text{cm}^2$ , respectivamente.*

*Pero no basta estos datos para poder apreciar la verdadera economía que cada método representa, sino que es preciso tener en cuenta, además, el mayor precio de los aceros especiales empleados en el pretensado.*

*Abeles reduce la parte precomprimida al mínimo indispensable y la utiliza como una especie de armadura para el resto de la sección, en la que emplea cemento de la mejor calidad, pero en forma de hormigón armado (Neumann 1949).*

El sistema fue ensayado por el mismo Abeles de forma minuciosa. Esta patente permitirá un gran ahorro en el acero de alta resistencia requerido para el pretensado del hormigón ya que lo intenta reducir al mínimo. Que se traduce en su época, que esta patente pueda ser aplicada en un mayor número de construcciones, gracias a un menor coste de las materias primas.

Este razonamiento es muy similar, por no decir que en esencia es el mismo, al que hoy en día hay del hormigón pretensado. Es decir, todos los prefabricados de hormigón pretensado como las viguetas o las placas alveolares tiene el esquema de tensiones muy parecido con una pequeña parte traccionada, absorbidas estas tracciones por la armadura, y gran parte de la sección comprimida (Neumann 1949).

July 14, 1953

P. W. ABELES

2,645,115

COMPOSITE STRUCTURAL MEMBER AND IN THE MANUFACTURE THEREOF

Original Filed Feb. 25, 1943

2 Sheets-Sheet 1

FIG. 1.

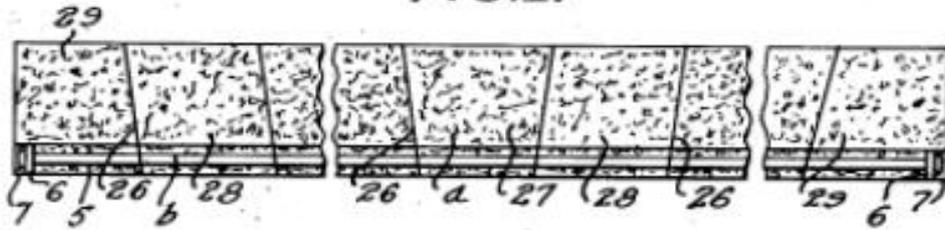


FIG. 2.

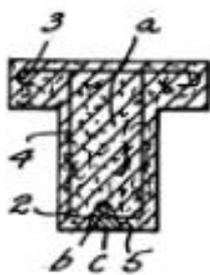
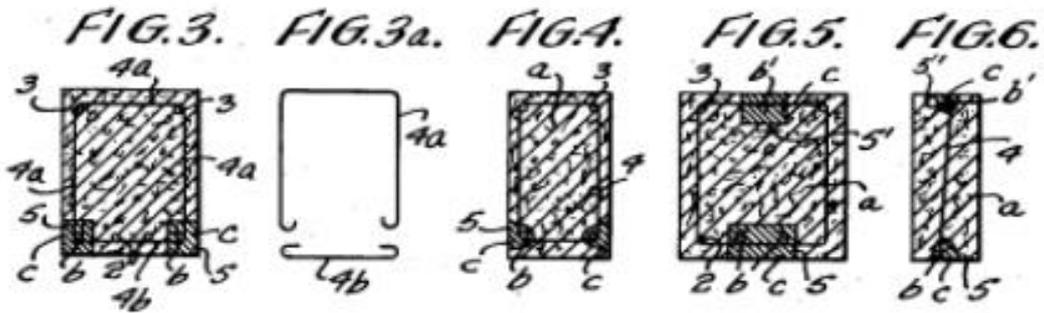


FIG. 7.

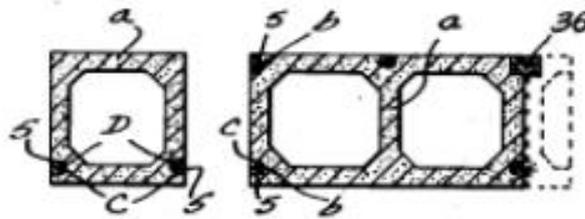


FIG. 8.

FIG. 9.

INVENTOR.  
Paul W. Abeles  
BY  
Michael S. Striker  
agt.

July 14, 1953

P. W. ABELES

2,645,115

COMPOSITE STRUCTURAL MEMBER AND IN THE MANUFACTURE THEREOF

Original Filed Feb. 25, 1943

2 Sheets-Sheet 2

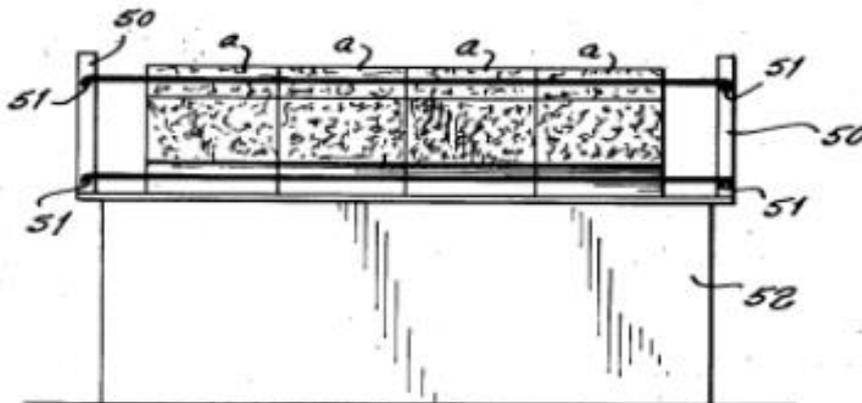
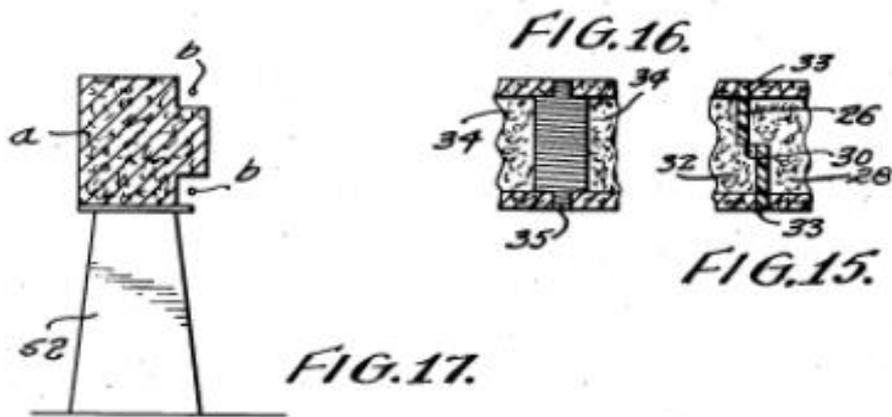


FIG. 18.

INVENTOR.  
Paul W. Abeles  
BY  
Michael S. Striker  
att.

Ilustración 69 Patente de P.W. Abeles US 2645115 (1953)

La patente de Abeles (ilustración 68 y 69) consiste en el diseño y procesos de fabricación destinado a esfuerzos de flexión. Los bloques constan de bloques y tirantes tensados. Abeles afirma que el principal objetivo de su patente es que se impida que el hormigón trabaje a tracción.

Es un objeto de mi presente invención evitar en una unidad estructural compuesta por un conjunto de una pluralidad de bloques la apertura de las uniones entre bloques consecutivos debido a la carga de trabajo y/o retracción de los bloques y/o del material de unión entre estos bloques(Abeles 1953).

Abeles afirma, que una de sus invenciones, consiste en un bloque de hormigón. Él cual esta provisto de al menos una ranura por donde se coloca en dirección longitudinal un elemento capaz de tensar un conjunto de bloques. La tensión debe ser mayor a 20000 libras (Abeles 1953) por pulgada cuadrada que serían unos 137,8 Mpa. Posteriormente debe rellenarse la ranura con un material que garantiza una adecuada adherencia entre el bloque y el elemento tensado.

Inventar un proceso de fabricación nuevo para unidades estructurales que sigan las directrices de su patente, también es narrada en la patente US 2645115 (ilustración 68 y 69).

El proceso de fabricación nuevo comprende tanto el pretensado de piezas ya moldeadas, siempre que las ranuras estén alineadas, como el moldeo de piezas y su pretensado. Los anclajes al no estar en los bloques estos no están comprimidos durante su ejecución, sino que se comprimen cuando el proceso de fraguado y endurecimiento de bloque si estos se producen en hormigón es óptimo.

En la patente aparece que los materiales utilizados pueden ser muy variados en la fabricación de los bloques.

El componente moldeado o los bloques que forman el conjunto de bloques se pueden formar a partir de los siguientes productos:

a) Hormigón o productos análogos, caracterizados por el hecho de que la sustancia plástica consiste en una mezcla de áridos naturales o artificiales, preferiblemente clasificados adecuadamente, de peso ligero o pesado, y de un aglutinante como cemento, cal, cola, Resina sintética o un material o propiedades similares, siendo el producto resultante cualquiera de los conocidos como hormigón, hormigón ligero (de arcilla seca estructural compuesta o loza seca, piedra pómez, escoria espumada, corcho, serrín, piedra artificial, piedra caliza artificial, hormigón sintético).

b) Ladrillo o productos análogos, caracterizados por el hecho de que el producto moldeado se quema, los productos resultantes se conocen como ladrillo, arcilla o loza cocidas.

c) Vidrio o productos similares, caracterizados por el hecho de que los productos se moldean en consistencia fundida y se endurecen al enfriarse.

d) Plásticos o productos similares, caracterizados por el hecho de que los productos se moldean a alta presión y calor, utilizando resinas sintéticas que son termo endurecibles o termoplásticas(Abeles 1953).

En la patente se aportan dibujos que son explicados detalladamente para ayudar a comprender la invención a la perfección.

Por ejemplo, en las figuras 1,2 y 3 a 9 (ilustración 68), aparecen las vistas en alzado y secciones longitudinales donde se pueden observar elementos que cumplen con las directrices de fabricación de la patente. Como argumenta el cumplen que tienen ranuras o rebajes alineados, dos pretensados los elementos de unión 22 y el mortero de cemento adhesivo c rodeando completamente los elementos de unión(Abeles 1953).

En algunas secciones dibujadas por Abeles se puede observar como las secciones adoptan formas en i para optimizar la sección y garantizar una transmisión de cargas eficaz entre viga y pilar.

También dice en la patente que es posible otra forma de tensar los bloques mediante lengüetas y ranuras. Eso si se debe rellenar la ranura con un cemento que tenga más resistencia que el material con el que esté formado el bloque. Así se garantiza que el pretensado se transmite de manera óptima al bloque.

En el siguiente texto Abeles explica como usa y coloca los estribos y elementos de refuerzo como negativos más propios del hormigón armado que no del pretensado. Lo explica mostrando y explicando diferentes ejemplos de secciones.

De acuerdo con la sección transversal, Figura 3, en cada bloque de hormigón de refuerzo moldeado a se pueden proporcionar elementos de refuerzo longitudinales cortos 2 (en la zona de tracción inferior) y 3 (en la zona de compresión superior) con eslabones transversales 4, consistiendo este último preferiblemente de 2 partes 4a y 4b, como se muestra en la Figura 3a, lo que permite que los elementos de unión b se alojen simplemente en ranuras externas longitudinales o rebajes 5 formados en el bloque moldeado a, conectándose entonces los dos refuerzos de enlace a las abrazaderas b para por ejemplo, retorciéndolos juntos cuando se utilizan eslabones de alambre o enganchándolos alrededor de los elementos de unión l) cuando los eslabones tienen la forma de varillas o tiras, como se muestra en las Figuras 3 y 3a. En los extremos de los tirantes l) están previstas placas de anclaje 5, preferentemente en los huecos 1 de las vigas para permitir rellenar los huecos con el relleno 0, protegiendo así también los medios de anclaje contra la oxidación y / o el fuego. La figura 4 muestra, en sección, una forma alternativa de viga en la que las ranuras o rebajes 5 y el relleno adhesivo c no están en las esquinas inferiores sino cerca del extremo inferior de las superficies laterales, sin que se proporcionen miembros 2 de refuerzo longitudinal. En las Figuras 5 se muestra otra sección rectangular de un miembro estructural compuesto de acuerdo con mi invención en la que se proporciona una ranura o rebajo 5 en la superficie inferior donde se disponen dos números de piso b y otra ranura o receso 1.5 en la superficie superior de la sección donde .se coloca un tirante b, .el refuerzo longitudinal 2 es especialmente débil y está previsto únicamente con el fin de posicionar los eslabones 4 que consta de dos partes en forma de C. cuyos extremos se extienden hacia las ranuras o rebajes 5 y 5 'y se cierran después de que los tirantes byb se hayan alojado en sus ranuras o rebajes 5 y 5 respectivamente. La figura 6 ilustra una sección similar, pero sin elementos de refuerzo longitudinales 2 y 3, los eslabones 4 que consisten en elementos individuales que se extienden hacia las ranuras o rebajes 5 y 5 y se doblan alrededor de los

elementos de unión 1) y b después de que han sido fijados. Pero dichos eslabones 4 no necesitan estar conectados con los tirantes 1) y b y pueden estar provistos solo en el interior de las secciones, mostradas en las Figuras 3 a 5, sin extenderse hacia las ranuras o rebajes o pueden prescindirse por completo en una sección de acuerdo con la figura 6. Se proporciona preferiblemente un elemento de unión superior b cuando el elemento estructural compuesto debe ser pretensado completamente. La figura 7 muestra una sección en T, estando prevista solamente una ranura o rebajo 5 a lo largo de la superficie inferior, consistiendo los enlaces 4 preferiblemente en dos partes que se cierran después de que el miembro de amarre b se ha alojado en la ranura o rebajo (ver ilustración 68). (Abeles 1953).

Como son las uniones aparece dibujado en las figuras 14, 15 y 16 (ver ilustración 69) donde se puede observar los bloques y el relleno de dichas juntas que son diferentes en cada figura. En la patente se menciona que si el mortero usado para rellenar estas juntas tiene una menor resistencia ese punto sería un punto débil de la estructura por eso debe rellenarse con un mortero de mayor resistencia que la que poseen los bloques.

En las figuras 17 y 18 (ver ilustración 69) aparecen unas vistas de lo que podemos deducir que es un banco de tensado donde la primera en una sección donde podemos ver la pieza encima de un soporte el bloque está colocado de forma que las dos ranuras quedan en la parte derecha de la pieza, pero la pieza en entrar en uso o en su colocación inicial quedará las dos ranuras con el tensado en la parte de tracciones en caso de vigas será la parte inferior. La segunda figura es un alzado donde se puede observar el sistema de tensado con los alambres.

## 8. Primeras construcciones con hormigón pretensado.

### 8.1 El puente de Veudre de E. Freyssinet

Freyssinet recibirá en 1907 un encargo para construir tres puentes para salvar el cauce del río Allier. En su diseño podemos ver la utilización del hormigón pretensado con un diseño muy diferente a los puentes de hormigón construidos hasta la fecha ya que las piezas de hormigón presentaban una delgadez impropia del material además el diseño comprendía articulaciones en las claves. Otro hecho por el que fue muy reconocido fue por el empleo de gatos hidráulicos para el descimbrado la utilización de encofrados baratos y que se hacían en obra sin un personal muy cualificado, lo que supone una reducción en los costes de ejecución del puente.



Ilustración 70 Puente de Le Veudre

Antes de la construcción del primer puente de Veudre (ilustración 70) construyó un experimento donde pudiera obtener ciertas garantías de que tanto sus nuevos sistemas como los cálculos planteados funcionasen.

*Antes de la realización de a Veudre se planteó una prueba para el estudio del descimbramiento sobre una viga de 50 m de longitud y 2 m de flecha. Para ello Freyssinet tuvo que ingeniarse un sistema que le permitiera fijar la distancia entre estribos en su viga de prueba. El sistema lo resolvió comprimiendo un lecho de hormigón con alambres de acero de alta resistencia, laminados y estirados, de  $\varnothing 10$  mm y una carga unitaria de rotura de 600 MPa. Para ello tuvo que idear su primer anclaje de pretensado en el que se anclaban dos alambres acuñaos y también los elementos hidráulicos de tesado. De este modo consiguió una fuerza de compresión del hecho de unas 2500 t, suficientes para sus propósitos(Ayats Calsat 2004).*

El puente de Le Veudre está construido por tres arcos con tres articulaciones, de 72,5m de luz y una esbeltez impresionante. Debido a esa esbeltez cuando se inaugura el puente este ya presenta flechas muy grandes que irán aumentando. Pero este fracaso ayudará a Freyssinet a descubrir una nueva característica del hormigón pretensado que son la fluencia del hormigón.



Ilustración 71 Puente de Le Veudre

Esto permitirá que el nuevo puente de Boutiron no presente tales inconvenientes debidos a que los soluciona con la abertura de los arcos con el empuje de gatos hidráulicos y también mediante la eliminación de la rótula central.

En el libro de Fernández Ordoñez aparece un texto de una conferencia impartida por el propio Freyssinet cuenta lo ocurrido después del descimbrado y como reacciono en el momento que descubre que el Puente de Le Veudre padece deformaciones muy grandes.

*Desde el día en que acepté la responsabilidad, tanto de día como de noche, consciente o inconscientemente, ocupó mi pensamiento sin dejar lugar a ningún otro objeto. Los numerosos pequeños trabajos que realizaba aquí y allá me permitieron seleccionar hombres de confianza. Encontré un jefe de obra de conciencia y solicitud admirables: mi amigo Biguet, conductor de "Ponts et Chaussées" en Vichy.*

*No puedo relatar aquí la ejecución del Veudre. Quizá lo haga algún día, pero necesitaría todo un libro para describir este esfuerzo constante que duró cuatro años. Lo esencial ya se conoce: el problema del descimbrado de sus grandes bóvedas extraplanas, apenas armadas, que se resolvió con la creación de los empujes; empujes que se probaron primero en la bóveda del puente de Rairéals-sur-Besbre, con 26 m de luz entre las articulaciones, rebajada aproximadamente en la vigésima parte, y después en un arco de prueba de 50 m de luz y 2 m de flecha. Este método, que suprimía la interrupción de las cimbras en el punto de la junta de descimbrado habitual, las hacía menos costosas, más permeables a las crecidas y más sólidas. En el fondo, había esbozado para el Veudre una primera forma de mis articulaciones plásticas, aplicada solamente a los arranques de bóvedas.*

*Sólo quiero evocar de nuevo este dramático episodio que me enseñó, en 1912, la existencia de las deformaciones elásticas diferidas del hormigón, aunque las circunstancias, el empeñamiento de Mesnager y la guerra de 1914, retrasaron hasta 1926 mi primera publicación relativa a tales fenómenos. Todas las afirmaciones de reglamentos y circulares de 1906, en relación con las deformaciones lineales del hormigón, son radicalmente erróneas. Estos textos desconocen por completo las variaciones del módulo de Young, ya sea en función de la intensidad de las tensiones o*

*bien según su duración de aplicación, que pueden oscilar entre la unidad y una décima. Atribuyen un valor fijo al módulo de dilatación que es, en realidad, una función muy compleja con gran cantidad de factores y cuyo valor, de media muy inferior a la que indican las instrucciones, puede variar entre  $2 \times 10^{-5}$  y  $10^{-3}$ . En resumen, niegan la plasticidad y la vitalidad al hormigón; es decir, las cualidades esenciales sin las que ninguna obra de hormigón armado podría existir. Con todo, si hubiera creído las fábulas que firma Maurice Levy, debería haber dotado a mis bóvedas del Veurdre de una articulación central. Me resigné a ello tras largas dudas, como lo demuestra el hecho de que el arco de prueba que realicé en Moulins tuviera sólo dos articulaciones.*

*No creo que exista alegría más embriagadora que la del constructor que, tras estudiar, sin complacencia, su obra acabada, no aprecia en ella defecto alguno. ¡Qué gran recompensa para sus esfuerzos! Se siente Dios en el séptimo día. Pero qué terrible angustia sucede a esta euforia cuando, tras varios meses, ve que lentamente aparecen síntomas perturbadores, deformaciones, al principio apenas visibles para un observador atento, pero que crecen progresivamente hasta el punto de no poder imaginar un fin distinto al desmoronamiento. Estas deformaciones consistían en un asiento vertical muy lento, que sólo podía deberse a un descenso progresivo y considerable –de uno, a una cuarta o incluso hasta una quinta parte del módulo de Young– aunque el hormigón de las bóvedas, extraordinariamente resistente, manifestara en las pruebas de prensa con probetas, frente a las cuales guardaba yo tantas reservas, un clarísimo incremento de este mismo módulo. Además, faltaba admitir otra variación, debida a la intensidad de las tensiones cuyos máximos crecían muy rápidamente a causa del aumento de las distancias de la fibra media al funicular de cargas. Sin embargo, según Mesnager y el laboratorio de la Avenida de Iena 4, el módulo de los hormigones era una constante casi absoluta para una muestra después de alcanzar un endurecimiento normal. Veinte ensayos de laboratorio, mantenidos por Mesnager, parecían confirmar lo que mi propia experiencia negaba.*



Ilustración 72 Puente de Le Veurdre

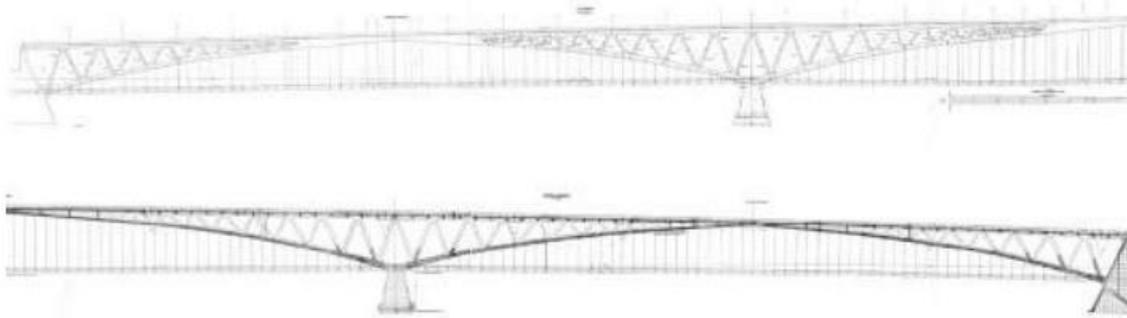


Ilustración 73 Puente de Le Veudre

*Para salir de esta situación insostenible, fui a la Avenida de Iena y, llamando aparte a los mozos del laboratorio, les insté, bajo amenazas terribles, a que me contaran exactamente lo que supieran de esos ensayos, cuya realización material habían garantizado. Aterrados, aquellos pobres diablos me confesaron que, para evitar que se rompieran los costosos aparatos que medían las deformaciones, los desmontaban en cuanto se obtenía el coeficiente angular en el origen de una recta que sustituía la curva de las deformaciones. Por muy extraordinario que pueda parecer esto hoy en día, cuando la medición de deformaciones es fácil y común, estos simulacros de ensayos habían determinado la convicción de los responsables de la circular, tan imbuidos como estaban a priori de la idea de que el módulo de Young de un hormigón sólo podía ser una constante. Tengo que recordar además que Rabut y Considère rechazaron adherirse a las conclusiones de la Comisión del Hormigón Armados.*

*En realidad, ningún hecho experimental observado contradecía mis observaciones. Era cierto que el hormigón era mucho más deformable, mucho más plástico que según el esquema admitido por el reglamento, algo que, por otra parte, resultaba obvio, después de nuestra experiencia diaria en las obras con hormigón, a cualquier ser pensante que no llevara anteojeras por abuso de las matemáticas. Una vez aceptado esto, mis articulaciones de clave dejaban de ser indispensables; resultaba incluso evidente que su presencia era la causa del asiento de mis bóvedas. Para detenerlo bastaba con eliminarlas tras elevar suficientemente las claves de bóveda, mediante un nuevo uso de mis gatos de descimbrado, con el fin de suprimir la mayor parte de los incrementos de tensiones que resultaban de la deformación de las fibras medias de los arcos. No era cuestión de informar a los ingenieros jefes o a los prefectos para un corte de la circulación. Se habrían vuelto locos y me habrían paralizado. Pese a ello, cualquier día de retraso podría ser el del derrumbe, porque en este momento las deformaciones aumentaban con una rapidez sobrecogedora.*

*Regresé a Moulins durante la noche. Agarré la bicicleta a toda prisa y salí hacia el Veudre para despertar a Biguet y a tres hombres de confianza. Entre los cinco colocamos de nuevo los gatos de descimbrado –por suerte me había reservado tal posibilidad– y una vez hubo suficiente luz para usar niveles y miras, empezamos a levantar las tres bóvedas a la vez. Era un día de mercado; cada dos por tres teníamos que interrumpir la operación para dejar pasar algún vehículo. Sin embargo, todo acabó bien. Encajado de nuevo en sus líneas, curado de la enfermedad que casi lo había matado, el puente del Veudre se comportó perfectamente hasta que fuera destruido durante la guerra, en 1940.*

PONT du VEURDRE-sur-ALLIER, construit en 1911-1912 par M. FREYSSINET, Ingénieur des Ponts et Chaussées  
avec le Portland Artificiel ALLARD, NICOLET & Co, de VOIREPE (Isère).  
(ENTREPRISE F. MERCIER, MOULINS.)



PORTÈES.. { Arche centrale.. 72<sup>m</sup> 50 } à triple articulation { au sommet une rotule métallique,  
                  { Arches de rive.. 66<sup>m</sup> " } aux naissances deux surfaces en ciment.  
ÉPAISSEURS : à la clé 19 cm. ; aux naissances 50 cm ; surbaissement 1/14 et 1/15.

Ilustración 74 Puente de Le Veurdre

*Si se hubiera derrumbado, me habría sentido responsable. En efecto, al pensarlo, reconozco que no tendría que haber aceptado, sin comprobarlas, las afirmaciones de la circular. Algunos dirán que el respeto del reglamento es obligatorio y que los ingenieros no tienen que comprobar sus fundamentos. Es una teoría cómoda pero falsa. Los hombres que elaboran los reglamentos pueden equivocarse igual que los demás. Quizá fuera un error redactar, en 1906, un reglamento sobre el hormigón armado, aún demasiado desconocido, pero sí lo era, con toda seguridad, encomendar su redacción a un matemático, que no sólo desconocía totalmente una técnica que pretendía regular autocráticamente, sino que era totalmente incapaz, debido a su formación y manera de pensar, de llegar a entenderla algún día. Creo que un reglamento sólo tiene valor real y puede realizar su papel, que consiste en ofrecer garantías de seguridad, bien a los constructores o bien al público, si se limita a constatar las reglas confirmadas de una técnica que ha alcanzado la madurez y cuyo valor afirman numerosas y variadas realizaciones. De lo contrario, funciona como traba y velo que sólo puede impedir el progreso y propiciar desastres. En cualquier caso, un ingeniero que se dispone a construir un proyecto novedoso tiene el deber de basarse sólo en hechos cuya exactitud haya podido comprobar personalmente (Antonio Fernández Alba, E. Freyssinet, Frank Guyon 2003).*

## 8.2 El puente de Boutiron de E. Freyssinet

El puente de Boutiron se encuentra próximo a la localidad de Vichy, de los tres puentes que construyó Freyssinet encargados en 1907 es el único que todavía podemos ver en pie. Es muy similar al primero que construyó con unas relaciones de esbeltez más próximas al acero que al hormigón armado.

En el siguiente texto extraído también del libro de Fernández Ordóñez podemos observar cómo narra Freyssinet lo costoso de superar el fracaso del puente de Le Veudre, pero también el afán para conseguir su propósito, así como afirma conseguir un puente del que está orgulloso incluso más que los que construirá posteriormente.

Narra también las dificultades debidas a las crecidas del río días antes del descimbrado y como tuvieron que volver a calzar el cimbrado.

*Estaba escrito que no iba a ahorrarme ninguna dificultad en cuanto a mis puentes. El del Veudre tiene un hermano pequeño: Boutiron, a 3 km de Vichy, quizá menos bonito, al estar peor adaptado a un lugar demasiado plano, aunque idéntico en sus elementos esenciales. Las mismas bóvedas, las mismas cimbras. Lo he vuelto a ver hace poco, e incluso después de Tonneins y de Plougastel, lo considero, desde la ruina del Veudre, el más bello de mis puentes. Las placas inferiores estaban hormigonadas; los nervios y la placa superior, encofrados y ferrallados: faltaba sólo hormigonar, cuestión de dos semanas. Estábamos a mediados de junio, época en que las grandes crecidas son escasas y mis cimbras no peligraban ante las crecidas medias.*



Ilustración 75 Puente de Boutiron

*Una tarde, sin embargo, al anochecer, nos llegó, como una muralla, una de las crecidas de verano más violentas en siglos. Mandó contra mis cimbras todos los cobertizos y empalizadas de una exposición que se estaba preparando en Vichy, además de todo el heno de Auvergne, que se acababa de segar. Al concentrarse bajo el arco de la ribera derecha, cuyas cimbras reposaban sobre pilotes anclados en arcilla dura, la corriente creó una primera presa con todo cuanto transportaba. Bajo la presión de las aguas retenidas, los pilotes se doblaron, con un crujido espantoso, y quedaron formando una "V" con las piezas verticales de la cimbra. Sin embargo, la armadura deformada aguantó, gracias a sus refuerzos, a la rigidez de los hormigones y gracias también a que el agua se abrió paso barriendo la arena hasta llegar a la roca; primero bajo la cimbra del arco central y después bajo la del tercer tramo, lo que reducía la presión sobre las armaduras.*

*Al día siguiente, el agua había bajado bastante y pudimos hacer un primer balance de la catástrofe. La cimbra contaba con seis apoyos sobre el arco. En el arco primero, los apoyos dos y tres estaban torcidos río abajo unos 80 cm. En los arcos segundo y tercero, bajo los mismos apoyos desaparecidos por completo, se abrían fosos de seis metros de profundidad que la corriente empezaba a rellenar con barro. Verticalmente, las bóvedas y los encofrados habían sufrido deformaciones de varios decímetros y parecían montañas rusas. En sentido horizontal no existía ninguna deformación visible; las bóvedas hormigonadas desde hacía quince días habían resistido en su nivel. Algunos de mis hombres, descompuestos, querían romper los encofrados para ver el estado de los hormigones. Dije que le abriría la cabeza al primero que desclavara un tablero, ya que pensaba actuar como si las bóvedas no hubieran sufrido ningún daño, a reserva de considerar lo que pudiéramos encontrar.*

*Durante todo el día ordené hacer acopio de tableros, troncos de árboles y bloques de roca. Al día siguiente pudimos trabajar. En el interior de los fosos hice colocar y rellenar, mediante cantos rodados del mismo lecho, grandes gaviones de superficies sujetas con alambres de acero; en el cauce profundo, allí donde la corriente seguía siendo muy violenta, establecimos vástagos hechos con cortezas de pino inclinadas, colocadas frente a las empalizadas torcidas y con la base apoyada contra rocas vertidas en el cauce. Después, con la ayuda de los gatos de descimbrado y los gatos de elevación, forcé a que todos los cabezales de las empalizadas hicieran un recorrido exactamente inverso al que habían hecho por culpa de la crecida. Entre un fragor de maderas quebradas, bóvedas, encofrados y armaduras recobraron muy exactamente sus formas iniciales.*

*Entonces di la orden de hormigonar día y noche, sin parar, porque temía la segunda crecida que, según la historia del río, suele seguir a la primera crecida de verano. Todos, hasta los delineantes y los contables, fueron reclutados para el apisonado del hormigón, ya que Biguet no era hombre que tolerara, a pesar de las circunstancias, un apisonado insuficiente del hormigón. Si van ustedes a hacerse una cura en Vichy, vayan a ver Boutiron. Suban a las bóvedas y examinen los hormigones con lupa teniendo presente que se colaron en tres días y dos noches (aún no teníamos vibradores). Volverán ustedes cargados de respeto por Biguet.*

*La segunda crecida llegó, tal y como había temido, pero el puente ya acabado resistió bien. Ordené entonces que se realizara el desencofrado, y en el examen de las bóvedas, para nuestro regocijo, no pudimos detectar ni rastro de fisuras o deformaciones permanentes.*

*Esta historia originó mi asociación con mi amigo Limousin. Testigo del enderezamiento de las bóvedas del puente Boutiron juró que, aunque fuese por la fuerza, yo sería en adelante su socio. Por lo demás, poco después, el ajuste y el descimbrado de los arcos realizados ante la Escuela de "Ponts et Chaussées" al completo, con Rabut, Mesnager y numerosos ingenieros, me comportaron mucha publicidad. Rabut solicitó y obtuvo para mí el premio Caméré. Me requerían proyectos por todas partes. Decidimos entonces crear la empresa Mercier, Limousin y Compañía, que acabaría como Limousin y Compañía, procedimientos Freyssinet.*

*Aunque muy ocupado en numerosos proyectos, yo quería seguir estudiando el problema de las deformaciones diferidas de los hormigones, que veía como el único impedimento posible a la permanencia de los pretensados, con los que seguía soñando. Había previsto utilizarlos para el tablero del Bernand, cuya ejecución habría de completarse a finales de 1914. Había montado en mi jardín un taller de mecánica de precisión, donde me divertía fabricando personalmente aparatos de medición. Establecí un programa de estudios de las deformaciones lentas del hormigón, utilizando los movimientos del arco de ensayo. Me había rodeado de numerosos colaboradores, jóvenes y entusiastas (Antonio Fernández Alba, E. Freyssinet, Frank Guyon 2003).*

### 8.3. Acueducto de Tempul de E. Torroja

Eduardo Torroja un ingeniero español construirá uno de los primeros puentes pretensados de manera intencionada. Lo hace en la construcción del acueducto de Tempul situado en Cádiz en 1925 y que es anterior a la patente de Freyssinet. En el aprovecha las propiedades de los cables de acero de alta resistencia(Ayats Calsat 2004).

El acueducto tiene una longitud total de 280m, pero la zona del puente como tal está formada por tres vanos los vanos de los extremos son dos vanos de 20,1m y el vano central de 60,3m. La luz más larga está formada por dos ménsulas de 20,1m en voladizo y otro tramo de 20,1m apoya en las ménsulas. Las ménsulas parten de una pila y se equilibran mediante dos tirantes de 63mm de diámetro con los vanos laterales. Una de las grandes innovaciones reside en el método para tensar los cables que es la de mediante un sistema de gatos hidráulicos consigue aumentar la altura de las pilas donde están anclados los cables. Lo narra más detalladamente Ayats Calsat en este fragmento.

*La dificultad principal de construcción está en tensar los cables de modo que al entrar en servicio no se deformen en exceso. Para ello la cabeza de pila se hormigonó separada del resto de manera que pudiera desplazarse verticalmente gracias a unas barras verticales de 30 mm de diámetro alojadas dentro de tubos metálicos. Pasados el mes de fraguado de los tramos se levantaron las cabezas de las pilas con gatos hidráulicos, tensado con ello los cables, hasta hacer despegar los tramos de la cimbra, y se enclavó la obra. Después se hormigonaron los huecos que quedaban en las pilas, retirándose los gatos. Los cables se protegieron con una envoltura de hormigón que se comprimó sobrecargando artificialmente los vanos(Ayats Calsat 2004).*

El acueducto no cumple solo su función, sino que también es un hito de la ingeniería. Eduardo Torroja consigue mediante la innovación estructural uno de los primeros puentes realizados con hormigón pretensado. Que será estudiado y analizado como referente para seguir innovando y desarrollando las técnicas del pretensado. Como podemos deducir del siguiente fragmento de un artículo de Lozano-Galant and Paya-Zaforteza.

*Sea o no el Acueducto Tempul el primer puente atirantado moderno, no existe duda que esta estructura sea un precursor importante de esta tipología debido a la audacia de su diseño y la astucia tecnológica. Antes de Tempul, los sistemas de tirantes solo se usaban para fortalecer la estructura contra una deformación excesiva. De hecho, muchos autores, como Roebling, introdujeron sistemas atirantados en puentes colgantes para aumentar la rigidez del puente frente a la vibración del viento. No obstante, como afirma Buonopane, proporcionar una tensión inicial sustancial en los tirantes es de primordial importancia para asegurar un comportamiento correcto bajo cargas no uniformes. Consciente de este hecho, Roebling fue pionero en la idea de pretensar los tirantes mediante el peso muerto del puente, aunque esta idea no fue muy bien recibida por otros diseñadores de puentes colgantes. Runyon propuso métodos alternativos de pretensado, quien desarrolló un dispositivo de torsión para acortar la longitud de los tirantes, Torroja, quien utilizó gatos hidráulicos para aumentar la longitud del tirante levantando el pilón, y Freyssinet en 1928, quienes aumentaron la longitud del estay mediante un gato con anclajes formados por conos macho y hembra en hebras. Estos dispositivos, especialmente el jack Freyssinet, se convirtieron en auténticos hitos en la evolución de los puentes atirantados. Hoy en día,*

las hebras de los cables se pueden instalar y pretensar individualmente mediante gatos más pequeños (mono hilos), que agilizan las operaciones de pretensado en obra. La fuerza extra que estos dispositivos dan a cada hebra se calcula mediante los procedimientos patentados por el fabricante (Lozano-Galant and Paya-Zaforteza 2017).



Ilustración 76 Acueducto de Tempul. Enero 1927. Fuente: <http://www.cehopu.cedex.es/>

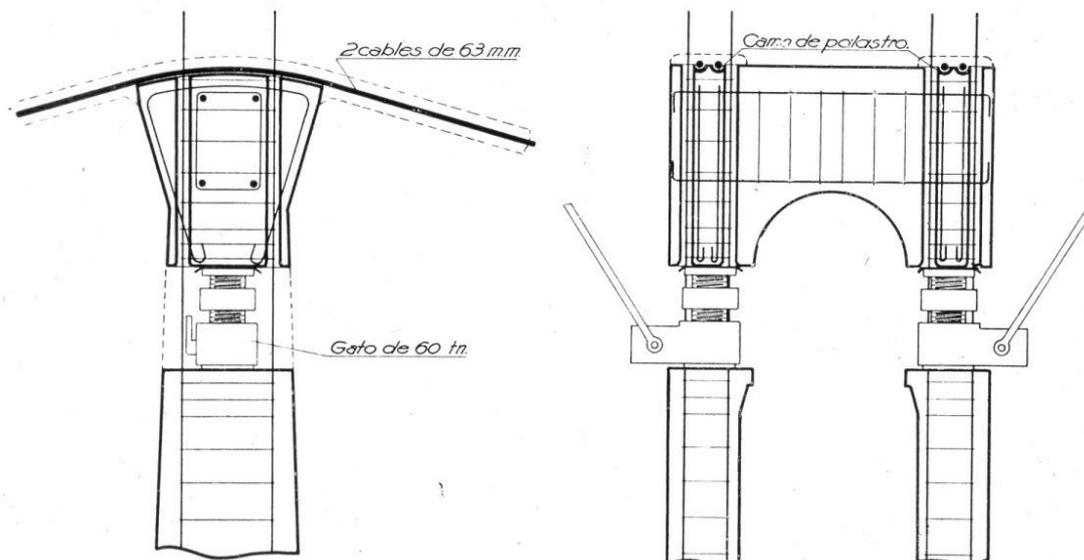
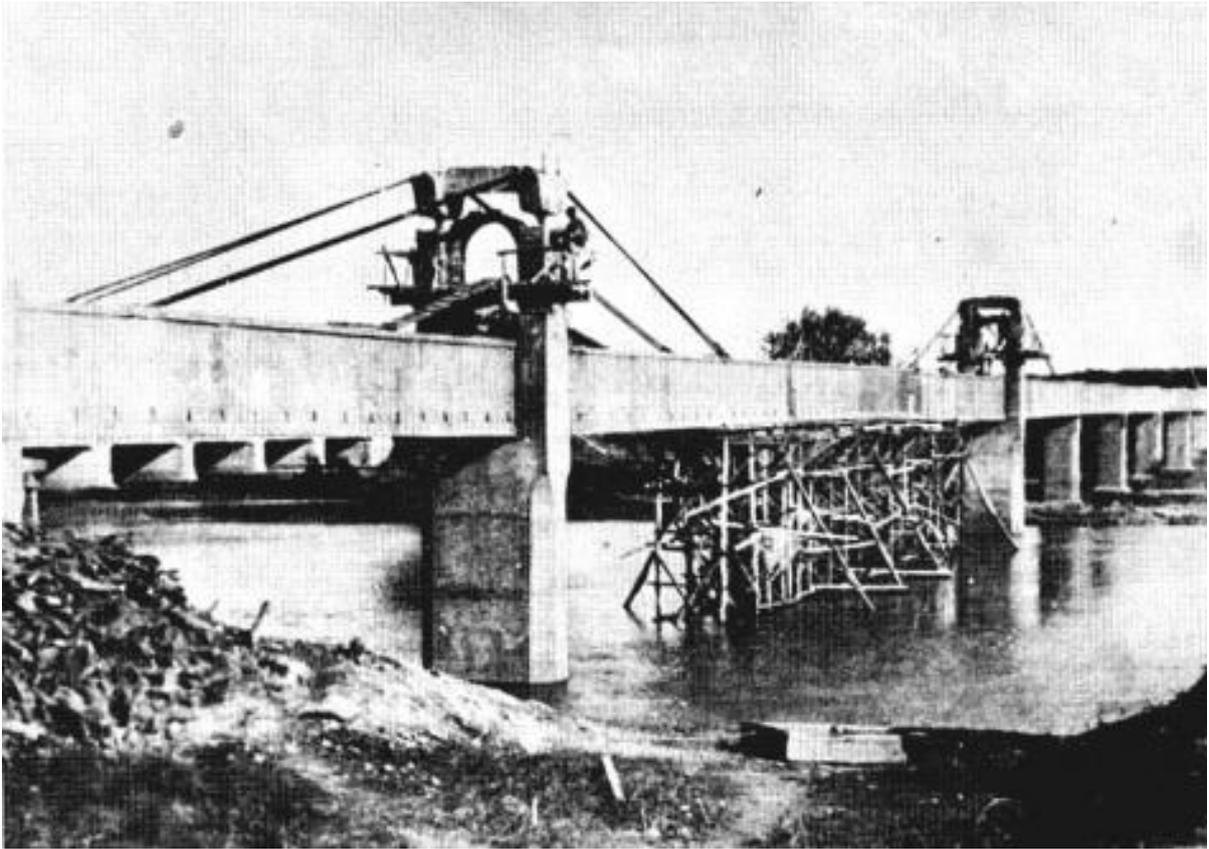


Ilustración 77 Dispositivos de elevación de las cabezas de los pilares. Fuente: <http://www.cehopu.cedex.es/>



*Ilustración 78 Descimbrado del acueducto de Tempul. Fuente: <http://www.cehopu.cedex.es/>*

## 9. Conclusiones.

Las conclusiones obtenidas después de la realización de este trabajo son muchas y muy diversas van desde cómo se va desarrollando un concepto mediante el estudio de muchos científicos intentando crear un material nuevo hasta que finalmente se consiguen unos resultados positivos. Cuando eso sucede los cambios que se producen en el concepto de la invención lejos de pararse se incrementan por dos factores uno por la simple optimización y la curiosidad científica y otro por el beneficio económico que el propio invento produce.

- La primera conclusión que sacó después de la realización del trabajo son los numerosos descartes que se producen para conseguir un buen desarrollo de un nuevo sistema constructivo como es el hormigón pretensado. Lo podemos deducir viendo el número de patentes que se realizaron sobre el hormigón pretensado sin tener una certeza de que su invención aportaba una mejora en el comportamiento de un elemento estructural. Hasta la patente de Freyssinet no podemos decir con certeza de que los pretensados beneficien significativamente el comportamiento estructural. Pero creo que, sin los anteriores investigadores como Jackson, Doebling, Lee, Chaudy, Koenen y más, Freyssinet no hubiera sido capaz de realizar su patente y gran aportación en el campo de las estructuras de hormigón.
- El concepto del pretensado y como aplicarlo en el hormigón es lo verdaderamente interesante. Ya que por concepto parecería estar destinados a entenderse ya que el hormigón es un material ineficaz a tracción y el concepto de pretensado nos ayuda a minimizar las tracciones que aparecen en los elementos horizontales sometidos a una carga perpendicular al elemento resistente. Esto le añadimos que la elaboración del hormigón es bastante económica y sencilla. Además, las características plásticas del hormigón permiten la construcción de casi cualquier elemento sin depender de la forma.
- La eficacia del hormigón pretensado nos ha permitido ser capaces de expandir el concepto del pretensado en todos los niveles de la sociedad. Por concepto de pretensado me refiero al casi perfecto entendimiento de la mecánica de los elementos continuos tal que aplicando fuerzas inexistentes en la naturaleza obtenemos una estructura más liviana, con menor deformaciones que en la actualidad se traduce con un menor coste económico y con un menor coste medioambiental.
- Otra conclusión como se puede apreciar con la tecnología del pretensado los ingenieros a principios del siglo XX empezó a construir y ha aumentar las luces de sus construcciones. Debido a que el conocimiento sobre el hormigón y el acero había aumentado drásticamente. Los primeros hitos como son los puentes de Freyssinet como el Puente de Veudre que tenía una luz máxima de 72,5m. En España cabe destacar la figura de Eduardo Torroja y el Acueducto de Tempul.

El hormigón pretensado ayuda a la sociedad, gracias a que permite un cambio en el concepto, ya que comporta una reestructuración de los límites debido a un aumento de las luces de las estructuras que puede suponer cambiar la forma de distribuir tanto viviendas, como cualquier construcción. En definitiva, supone una alternativa muy eficaz a la hora de resolver una necesidad.

## 10. Bibliografía.

- Abeles, P. W. 1953. COMPOSITE STRUCTURAL, EMBER AND IN THE MANUFACTURE THEREOF. US 2645115, issued 1953.
- Alonso Pereira, José Ramón. 2013. "Los Orígenes Del Hormigón Armado En La Arquitectura Española." *Labor e Engenho* 7 (2 SE-Artigos): 5–16. <https://doi.org/10.20396/lobore.v7i2.171>.
- Antonio Fernández Alba, E. Freyssinet, Frank Guyon, Javier Rui-Wamba. 2003. *EUGÈNE FREYSSINET UN INGENIERO REVOLUCIONARIO UN INGÉNIEUR RÉVOLUTIONNAIRE*.
- Ayats Calsat, Joan. 2004. "Estado Actual Del Pretensado y Tendencias y Retos Del Futuro."
- Billington, David. 1997. "Historical Perspective on Prestressed Concrete" 1 (1): 83–108.
- Cobo Escamilla, Alfonso. 2010. *Hormigón pretensado*. Book. Edited by Fundación Escuela de la Edificación. 1ª edición. Madrid: Fundación Escuela de la Edificación.
- Dill, R.E. 1928. Manufacture of Reenforced Concrete. US 1684663, issued 1928.
- Dischinger, F. 1933. SHELL CUPOLA. US 1940401, issued 1933.
- Fernández Ordóñez, José A. 1978. *Eugene Freyssinet*. Book. Barcelona: 2C ediciones.
- Freyssinet, Eugène, and Jean Seailles. 1929. Process for the Manufacture of Reinforced Concred. GB338864A, issued 1929.
- ingénieurs civils de France, Société des. 1894. *Mémoires et Compte-Rendu Des Travaux de La Société Des Ingénieurs Civils de France*. La Société. <https://books.google.com.gt/books?id=9s9MAAAAYAAJ>.
- Koenen, Matthias. 1901. Manufacture of Floors. US 672379, issued 1901.
- Lee, Thomas A. 1891. fire proof joist for floors or roofs. 461028, issued 1891.
- Leonhardt, Fritz. 1986. "Estructuras de Hormigón Armado. Tomo V, Hormigón Pretensado." Book. In . Buenos Aires [etc: El Ateneo.
- LEONHARDT, FRITZ. 1967. *Hormigon Pretensado*. Coleccion FRITZ LEONHARDT TOMO V.
- Lozano-Galant, Jose Antonio, and Ignacio Paya-Zaforteza. 2017. "Analysis of Eduardo Torroja's Tempul Aqueduct an Important Precursor of Modern Cable-Stayed Bridges, Extradosed Bridges and Prestressed Concrete." *Engineering Structures* 150 (July 2020): 955–68. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.057>.
- May, D.H. 1950. "The Magnel/Blaton System of Prestressing." *Roads and Road Construction*.
- Neumann, Giorgio. 1949. "Orientaciones Diversas en la Tecnica del Hormigón Pretensado." Journal. *Hormigón Pretensado Ultimas Noticias* 1: 34.
- Sanabra-loewe, Marc, and Joaquin Capellà-Ilovera. 2014. The four ages structures. *PCI Journal*, issued 2014.
- Sanabra Loewe, Marc. 2014. "PROTOTIPO DE SISTEMA ESTRUCTURAL PARA TECHO BIDIRECCIONAL DE HORMIGÓN PRETENSADO PREFABRICADO CON LA ARMADURA POSTESA Y CONTINUIDAD ENTRE VANOS, PARA APLICAR EN EDIFICIOS DE DIVERSOS NIVELES CON LUCES MODERADAMENTE GRANDES." Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Valenzuela, Armando. 2015. "Las Patentes de Hormigón Armado. Del Gran Negocio Al Gran Desarrollo Tecnológico. Los Antecedentes Del Movimiento Moderno." *Rita\_*, no. 3: 134–45. [https://doi.org/10.24192/2386-7027\(2015\)\(v3\)\(10\)](https://doi.org/10.24192/2386-7027(2015)(v3)(10)).
- Wermiel, Sara E. 2009. "California Concrete , 1876-1906 : Jackson , Percy , and the Beginnings of Reinforced Concrete Construction in the United States." *Proceedings of the Third International Congress on Construction History, Cottbus, May 2009*, no. May.
- Wettstein, K. 1927. Method of Making Reenforced Building Elements. US 1626318, issued 1927.

Wilson, Walter. 1918. Reinforced Concrete. US 1259698, issued 1918.

## 11. Fuentes de ilustraciones

Ilustración 1 Muros del Coliseo Romano / Mayo de 2013 . Image © José Tomás Franco	7
Ilustración 2 Planos de la casa costruida según la patente de Wilkinson Valenzuela, Armando. 2015. "Las Patentes de Hormigón Armado. Del Gran Negocio Al Gran Desarrollo Tecnológico. Los Antecedentes Del Movimiento Moderno." <i>Rita_</i> , no. 3: 134–45. <a href="https://doi.org/10.24192/2386-7027(2015)(v3)(10)">https://doi.org/10.24192/2386-7027(2015)(v3)(10)</a> .	8
Ilustración 3 Patente de Wilkinson Valenzuela, Armando. 2015. "Las Patentes de Hormigón Armado. Del Gran Negocio Al Gran Desarrollo Tecnológico. Los Antecedentes Del Movimiento Moderno." <i>Rita_</i> , no. 3: 134–45. <a href="https://doi.org/10.24192/2386-7027(2015)(v3)(10)">https://doi.org/10.24192/2386-7027(2015)(v3)(10)</a> .	8
Ilustración 4 Depósito de Puigverd contruido por Frances Macià i Llussà, con el sistema Monier. Valenzuela, Armando. 2015. "Las Patentes de Hormigón Armado. Del Gran Negocio Al Gran Desarrollo Tecnológico. Los Antecedentes Del Movimiento Moderno." <i>Rita_</i> , no. 3: 134–45. <a href="https://doi.org/10.24192/2386-7027(2015)(v3)(10)">https://doi.org/10.24192/2386-7027(2015)(v3)(10)</a> .	9
Ilustración 5 Castillo de agua y kiosko Pivert en Pon- torson construido con el sistema Monier. Valenzuela, Armando. 2015. "Las Patentes de Hormigón Armado. Del Gran Negocio Al Gran Desarrollo Tecnológico. Los Antecedentes Del Movimiento Moderno." <i>Rita_</i> , no. 3: 134–45. <a href="https://doi.org/10.24192/2386-7027(2015)(v3)(10)">https://doi.org/10.24192/2386-7027(2015)(v3)(10)</a> .	9
Ilustración 6 Patente de Hennebique US 611907 (1907) <a href="https://patents.google.com/patent/US611907A/en?q=US+611907">https://patents.google.com/patent/US611907A/en?q=US+611907</a>	10
Ilustración 7 Patente de Ransome US 305226 (1884) <a href="https://patents.google.com/patent/US305226A/en?q=US+305226">https://patents.google.com/patent/US305226A/en?q=US+305226</a>	10
Ilustración 8 Concepto pretensado dibujado por Jaume Lliteras Barceló	11
Ilustración 9 Concepto pretensado dibujado por Jaume Lliteras Barceló	11
Ilustración 10 <a href="https://www.wikiwand.com/es/Hormig%C3%B3n_postensado">https:// www. wikiwand.com/ es/Hormig%C3%B3n_ postensado</a>	13
Ilustración 11 Patente de P.H. Jackson (1858) Sanabra Loewe, Marc. 2014. "PROTOTIPO DE SISTEMA ESTRUCTURAL PARA TECHO BIDIRECCIONAL DE HORMIGÓN PRETENSADO PREFABRICADO CON LA ARMADURA POSTESA Y CONTINUIDAD ENTRE VANOS, PARA APLICAR EN EDIFICIOS DE DIVERSOS NIVELES CON LUCES MODERADAMENTE GRANDES." Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.	15
Ilustración 12 Patente de P.H. Jackson (1872) Sanabra Loewe, Marc. 2014. "PROTOTIPO DE SISTEMA ESTRUCTURAL PARA TECHO BIDIRECCIONAL DE HORMIGÓN PRETENSADO PREFABRICADO CON LA ARMADURA POSTESA Y CONTINUIDAD ENTRE VANOS, PARA APLICAR EN EDIFICIOS DE DIVERSOS NIVELES CON LUCES MODERADAMENTE GRANDES." Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.	16
Ilustración 13 Patente Whipple US 2064 (1841). Sanabra Loewe, Marc. 2014. "PROTOTIPO DE SISTEMA ESTRUCTURAL PARA TECHO BIDIRECCIONAL DE HORMIGÓN PRETENSADO PREFABRICADO CON LA ARMADURA POSTESA Y CONTINUIDAD ENTRE VANOS, PARA APLICAR EN EDIFICIOS DE DIVERSOS NIVELES CON LUCES MODERADAMENTE GRANDES." Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.	17

Ilustración 14 Patente de P.H. Jackson (1886-87). Sanabra Loewe, Marc. 2014. "PROTOTIPO DE SISTEMA ESTRUCTURAL PARA TECHO BIDIRECCIONAL DE HORMIGÓN PRETENSADO PREFABRICADO CON LA ARMADURA POSTESA Y CONTINUIDAD ENTRE VANOS, PARA APLICAR EN EDIFICIOS DE DIVERSOS NIVELES CON LUCES MODERADAMENTE GRANDES." Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.	18
Ilustración 15 Patente de P.H. Jackson US 375999. (1888) pág.1 <a href="https://patents.google.com/patent/US375999A/en?q=US+375999">https://patents.google.com/patent/US375999A/en?q=US+375999</a>	19
Ilustración 16 Patente de P.H. Jackson US 375999. (1888) pág.2 <a href="https://patents.google.com/patent/US375999A/en?q=US+375999">https://patents.google.com/patent/US375999A/en?q=US+375999</a>	20
Ilustración 17 Patente de C.F.W. Doehring (1888). Sanabra Loewe, Marc. 2014. "PROTOTIPO DE SISTEMA ESTRUCTURAL PARA TECHO BIDIRECCIONAL DE HORMIGÓN PRETENSADO PREFABRICADO CON LA ARMADURA POSTESA Y CONTINUIDAD ENTRE VANOS, PARA APLICAR EN EDIFICIOS DE DIVERSOS NIVELES CON LUCES MODERADAMENTE GRANDES." Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.	21
Ilustración 18 Patente de C.F.W. Doehring (1888). Sanabra Loewe, Marc. 2014. "PROTOTIPO DE SISTEMA ESTRUCTURAL PARA TECHO BIDIRECCIONAL DE HORMIGÓN PRETENSADO PREFABRICADO CON LA ARMADURA POSTESA Y CONTINUIDAD ENTRE VANOS, PARA APLICAR EN EDIFICIOS DE DIVERSOS NIVELES CON LUCES MODERADAMENTE GRANDES." Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.	21
Ilustración 19 Patente de C.F.W. Doehring US 347474 (1886) pág.1 <a href="https://patents.google.com/patent/US347474A/en?q=US+347474">https://patents.google.com/patent/US347474A/en?q=US+347474</a>	22
Ilustración 20 Patente de C.F.W. Doehring US 347474 (1886) pág.2 <a href="https://patents.google.com/patent/US347474A/en?q=US+347474">https://patents.google.com/patent/US347474A/en?q=US+347474</a>	23
Ilustración 21 Figura 1 patente T.A. Lee US 461028 (1891). <a href="https://patents.google.com/patent/US461028A/en?q=US+461028">https://patents.google.com/patent/US461028A/en?q=US+461028</a>	24
Ilustración 22 Patente T.A. Lee US 513794 (1894). <a href="https://patents.google.com/patent/US513794A/en?q=US+513794">https://patents.google.com/patent/US513794A/en?q=US+513794</a>	25
Ilustración 23 Patente T.A. Lee US 513794 (1894). <a href="https://patents.google.com/patent/US513794A/en?q=US+513794">https://patents.google.com/patent/US513794A/en?q=US+513794</a>	26
Ilustración 24 Patente T.A. Lee US 513794 (1894). <a href="https://patents.google.com/patent/US513794A/en?q=US+513794">https://patents.google.com/patent/US513794A/en?q=US+513794</a>	26
Ilustración 25 Patente T.A. Lee US 461028 (1891). <a href="https://patents.google.com/patent/US461028A/en?q=US+461028">https://patents.google.com/patent/US461028A/en?q=US+461028</a>	27
Ilustración 26 Patente de F. Chaudy (1894). <a href="https://books.google.com.gt/books?id=9s9MAAAAYAAJ">https://books.google.com.gt/books?id=9s9MAAAAYAAJ</a> .	28
Ilustración 27 Patente de F. Chaudy (1894). <a href="https://books.google.com.gt/books?id=9s9MAAAAYAAJ">https://books.google.com.gt/books?id=9s9MAAAAYAAJ</a> .	28
Ilustración 28 Patente M. Koenen US 672379 (1901). <a href="https://patents.google.com/patent/US672379A/en?q=US+672379+">https://patents.google.com/patent/US672379A/en?q=US+672379+</a>	30
Ilustración 29 Patente C.R. Steiner. <a href="https://patents.google.com/patent/US903909A/en?q=US+903909+">https://patents.google.com/patent/US903909A/en?q=US+903909+</a>	33

Ilustración 30 Patente C.R. Steiner. <a href="https://patents.google.com/patent/US903909A/en?q=US+903909+">https://patents.google.com/patent/US903909A/en?q=US+903909+</a>	34
Ilustración 31 Patente J.G.F. Lund US 1028578 (1908). <a href="https://patents.google.com/patent/US1028578A/en?q=US+1028578">https://patents.google.com/patent/US1028578A/en?q=US+1028578</a>	35
Ilustración 32 Patente J.G.F. Lund US 1028578 (1908). <a href="https://patents.google.com/patent/US1028578A/en?q=US+1028578">https://patents.google.com/patent/US1028578A/en?q=US+1028578</a>	36
Ilustración 33 Patente J.G.F. Lund US 1028578 (1908). <a href="https://patents.google.com/patent/US1028578A/en?q=US+1028578">https://patents.google.com/patent/US1028578A/en?q=US+1028578</a>	37
Ilustración 34 Patente J.G.F. Lund US 1028578 (1908). <a href="https://patents.google.com/patent/US1028578A/en?q=US+1028578">https://patents.google.com/patent/US1028578A/en?q=US+1028578</a>	38
Ilustración 35 Patente J.G.F. Lund US 1028578 (1908). <a href="https://patents.google.com/patent/US1028578A/en?q=US+1028578">https://patents.google.com/patent/US1028578A/en?q=US+1028578</a>	39
Ilustración 36 Patente de W. Wilson US 1259698 (1917). <a href="https://patents.google.com/patent/US1259698A/en?q=US+1259698">https://patents.google.com/patent/US1259698A/en?q=US+1259698</a>	43
Ilustración 37 Patente de W. Wilson US 1259698 (1917). <a href="https://patents.google.com/patent/US1259698A/en?q=US+1259698">https://patents.google.com/patent/US1259698A/en?q=US+1259698</a>	44
Ilustración 38 Patente de Hewett US 1413404 (1922). <a href="https://patents.google.com/patent/US1413404A/en?q=US+1413404">https://patents.google.com/patent/US1413404A/en?q=US+1413404</a>	45
Ilustración 39 Patente de Hewett (1931). <a href="https://patents.google.com/patent/US1818254A/en?q=US+1818254">https://patents.google.com/patent/US1818254A/en?q=US+1818254</a>	46
Ilustración 40 Patente de Hewett (1937). Sanabra Loewe, Marc. 2014. "PROTOTIPO DE SISTEMA ESTRUCTURAL PARA TECHO BIDIRECCIONAL DE HORMIGÓN PRETENSADO PREFABRICADO CON LA ARMADURA POSTESA Y CONTINUIDAD ENTRE VANOS, PARA APLICAR EN EDIFICIOS DE DIVERSOS NIVELES CON LUCES MODERADAMENTE GRANDES." Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.	47
Ilustración 41 Patente K. Wettstein US 1626318 (1924) <a href="https://patents.google.com/patent/US1626318A/en?q=US+1626318">https://patents.google.com/patent/US1626318A/en?q=US+1626318</a>	48
Ilustración 42 Patente K. Wettstein US 1626318 (1924). <a href="https://patents.google.com/patent/US1626318A/en?q=US+1626318">https://patents.google.com/patent/US1626318A/en?q=US+1626318</a>	49
Ilustración 43 Patente K. Wettstein US 1626318 (1924). <a href="https://patents.google.com/patent/US1626318A/en?q=US+1626318">https://patents.google.com/patent/US1626318A/en?q=US+1626318</a>	50
Ilustración 44 Patente K. Wettstein US 1626318 (1924). <a href="https://patents.google.com/patent/US1626318A/en?q=US+1626318">https://patents.google.com/patent/US1626318A/en?q=US+1626318</a>	51
Ilustración 45 Patente K. Wettstein US 1626318 (1924). <a href="https://patents.google.com/patent/US1626318A/en?q=US+1626318">https://patents.google.com/patent/US1626318A/en?q=US+1626318</a>	52
Ilustración 46 Patente R.E. Dill US 1684663 (1925). Freyssinet, Eugène, and Jean Seailles. 1929. Process for the Manufacture of Reinforced Concred. GB338864A, issued 1929.	58
Ilustración 47 Patente E. Freyssinet GB 338864 (1928). Freyssinet, Eugène, and Jean Seailles. 1929. Process for the Manufacture of Reinforced Concred. GB338864A, issued 1929.	65

Ilustración 48 Patente E. Freyssinet GB 338864 (1928). Freyssinet, Eugène, and Jean Seailles. 1929. Process for the Manufacture of Reinforced Concred. GB338864A, issued 1929.	65
Ilustración 49 Patente E. Freyssinet GB 338864 (1928). Freyssinet, Eugène, and Jean Seailles. 1929. Process for the Manufacture of Reinforced Concred. GB338864A, issued 1929.	65
Ilustración 50 Patente E. Freyssinet GB 338864 (1928). Freyssinet, Eugène, and Jean Seailles. 1929. Process for the Manufacture of Reinforced Concred. GB338864A, issued 1929.	65
Ilustración 51 Patente E. Freyssinet GB 338864 (1928). Freyssinet, Eugène, and Jean Seailles. 1929. Process for the Manufacture of Reinforced Concred. GB338864A, issued 1929.	66
Ilustración 52 Patente E. Freyssinet GB 338864 (1928). Freyssinet, Eugène, and Jean Seailles. 1929. Process for the Manufacture of Reinforced Concred. GB338864A, issued 1929.	66
Ilustración 53 Patente E. Freyssinet GB 338864 (1928). Freyssinet, Eugène, and Jean Seailles. 1929. Process for the Manufacture of Reinforced Concred. GB338864A, issued 1929.	66
Ilustración 54 Patente E. Freyssinet GB 338864 (1928). Freyssinet, Eugène, and Jean Seailles. 1929. Process for the Manufacture of Reinforced Concred. GB338864A, issued 1929.	66
Ilustración 55 Patente E. Freyssinet GB 338864 (1928). Freyssinet, Eugène, and Jean Seailles. 1929. Process for the Manufacture of Reinforced Concred. GB338864A, issued 1929.	70
Ilustración 56 Patente Whipple US 2064 (1841). Sanabra Loewe, Marc. 2014. "PROTOTIPO DE SISTEMA ESTRUCTURAL PARA TECHO BIDIRECCIONAL DE HORMIGÓN PRETENSADO PREFABRICADO CON LA ARMADURA POSTESA Y CONTINUIDAD ENTRE VANOS, PARA APLICAR EN EDIFICIOS DE DIVERSOS NIVELES CON LUCES MODERADAMENTE GRANDES." Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.	72
Ilustración 57 Sistema de anclaje del puente de Saale. Sanabra Loewe, Marc. 2014. "PROTOTIPO DE SISTEMA ESTRUCTURAL PARA TECHO BIDIRECCIONAL DE HORMIGÓN PRETENSADO PREFABRICADO CON LA ARMADURA POSTESA Y CONTINUIDAD ENTRE VANOS, PARA APLICAR EN EDIFICIOS DE DIVERSOS NIVELES CON LUCES MODERADAMENTE GRANDES." Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.	72
Ilustración 58 Patente de F. Dischinger (1931). Sanabra Loewe, Marc. 2014. "PROTOTIPO DE SISTEMA ESTRUCTURAL PARA TECHO BIDIRECCIONAL DE HORMIGÓN PRETENSADO PREFABRICADO CON LA ARMADURA POSTESA Y CONTINUIDAD ENTRE VANOS, PARA APLICAR EN EDIFICIOS DE DIVERSOS NIVELES CON LUCES MODERADAMENTE GRANDES." Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.	73
Ilustración 59 Patente de F. Dischinger (1936). Sanabra Loewe, Marc. 2014. "PROTOTIPO DE SISTEMA ESTRUCTURAL PARA TECHO BIDIRECCIONAL DE HORMIGÓN PRETENSADO PREFABRICADO CON LA ARMADURA POSTESA Y CONTINUIDAD ENTRE VANOS, PARA APLICAR EN EDIFICIOS DE DIVERSOS NIVELES CON LUCES MODERADAMENTE GRANDES." Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.	74

Ilustración 60 Patente de Dischinger US 1940401 (1932). <a href="https://patents.google.com/patent/US1940401A/en?q=US+1940401">https://patents.google.com/patent/US1940401A/en?q=US+1940401</a>	75
Ilustración 61 Espaciadores del sistema Blaton/Magnel. May, D.H. 1950. "The Magnel/Blaton System of Prestressing." <i>Roads and Road Construction</i> .	77
Ilustración 62 Anclaje Sistema Balton/Magnel. May, D.H. 1950. "The Magnel/Blaton System of Prestressing." <i>Roads and Road Construction</i> .	78
Ilustración 63 Vainas de goma diseñadas por Magnel. May, D.H. 1950. "The Magnel/Blaton System of Prestressing." <i>Roads and Road Construction</i> .	79
Ilustración 64 Patente del gato hidráulico de Magnel. May, D.H. 1950. "The Magnel/Blaton System of Prestressing." <i>Roads and Road Construction</i> .	80
Ilustración 65 Patente del gato hidráulico de Magnel. May, D.H. 1950. "The Magnel/Blaton System of Prestressing." <i>Roads and Road Construction</i> .	81
Ilustración 66 Walnut Bridge (Philadelphia, Pennsylvania) de Magnel. Billington, David. 1997. "Historical Perspective on Prestressed Concrete" 1 (1): 83–108.	81
Ilustración 67 Patente de Hoyer. Sanabra Loewe, Marc. 2014. "PROTOTIPO DE SISTEMA ESTRUCTURAL PARA TECHO BIDIRECCIONAL DE HORMIGÓN PRETENSADO PREFABRICADO CON LA ARMADURA POSTESA Y CONTINUIDAD ENTRE VANOS, PARA APLICAR EN EDIFICIOS DE DIVERSOS NIVELES CON LUCES MODERADAMENTE GRANDES." Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.	83
Ilustración 68 Patente de P.W. Abeles US 2645115 (1953). <a href="https://patents.google.com/patent/US2645115A/en?q=US+2645115">https://patents.google.com/patent/US2645115A/en?q=US+2645115</a>	86
Ilustración 69 Patente de P.W. Abeles US 2645115 (1953). <a href="https://patents.google.com/patent/US2645115A/en?q=US+2645115">https://patents.google.com/patent/US2645115A/en?q=US+2645115</a>	87
Ilustración 70 Puente de Le Veudre. Fernández Ordóñez, José A. 1978. <i>Eugene Freyssinet</i> . Book. Barcelona: 2C ediciones.	91
Ilustración 71 Puente de Le Veudre. Fernández Ordóñez, José A. 1978. <i>Eugene Freyssinet</i> . Book. Barcelona: 2C ediciones.	92
Ilustración 72 Puente de Le Veudre. Fernández Ordóñez, José A. 1978. <i>Eugene Freyssinet</i> . Book. Barcelona: 2C ediciones.	93
Ilustración 73 Puente de Le Veudre. Fernández Ordóñez, José A. 1978. <i>Eugene Freyssinet</i> . Book. Barcelona: 2C ediciones.	94
Ilustración 74 Puente de Le Veudre. Fernández Ordóñez, José A. 1978. <i>Eugene Freyssinet</i> . Book. Barcelona: 2C ediciones.	95
Ilustración 75 Puente de Boutiron. Fernández Ordóñez, José A. 1978. <i>Eugene Freyssinet</i> . Book. Barcelona: 2C ediciones.	96
Ilustración 76 Acueducto de Tempul. Enero 1927. Fuente: <a href="http://www.cehopu.cedex.es/">http://www.cehopu.cedex.es/</a>	100
Ilustración 77 Dispositivos de elevación de las cabezas de los pilares. Fuente: <a href="http://www.cehopu.cedex.es/">http://www.cehopu.cedex.es/</a>	100
Ilustración 78 Descimbrado del acueducto de Tempul. Fuente: <a href="http://www.cehopu.cedex.es/">http://www.cehopu.cedex.es/</a>	101