

El hormigón pretensado en la construcción de puentes en Italia. Primeros pasos vacilantes y afirmación de la tecnología

Prestressed Concrete in Italian Bridge. Hesitant Beginnings and the Consolidation of the Technology.

Antonio Recupero^a

^a *Università degli Studi di Messina.*

Recibido el 21 de agosto de 2025; revisado el 29 de septiembre de 2025, aceptado el 9 de noviembre de 2025

RESUMEN

Este artículo analiza la génesis, la evolución y la afirmación del hormigón pretensado en la construcción de puentes en Italia, en el marco de un proceso internacional iniciado en Europa y Norteamérica a comienzos del siglo XX. A partir de las intuiciones pioneras de Eugène Freyssinet y de los aportes teóricos de Gustavo Colonnetti, se reconstruye el tránsito desde las primeras experimentaciones hasta la plena consolidación de la tecnología en la posguerra. El estudio se centra en el papel decisivo de ingenieros como Riccardo Morandi y Silvano Zorzi, cuyas obras ejemplifican tanto la dimensión artesanal y visionaria del pretensado como su progresiva industrialización. La narrativa pone de relieve cómo la innovación técnica se entrelaza con las biografías de sus protagonistas y con el contexto histórico de la reconstrucción italiana, transformando cada puente en un símbolo de audacia e ingenio. Finalmente, se subraya la vigencia del hormigón pretensado como técnica estructural consolidada, pero en constante evolución, capaz aún de abrir nuevas fronteras en la ingeniería contemporánea.

PALABRAS CLAVE: Hormigón pretensado, Puentes en Italia, Eugène Freyssinet, Gustavo Colonnetti, Riccardo Morandi, Silvano Zorzi, Reconstrucción de posguerra, Historia de la ingeniería estructural.

©2026 Hormigón y Acero, la revista de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

ABSTRACT

This article examines the origins, evolution, and consolidation of prestressed concrete in bridge construction in Italy, within the broader international development that began in Europe and North America in the early 20th century. Building on the pioneering insights of Eugène Freyssinet and the theoretical contributions of Gustavo Colonnetti, it traces the path from the first experimental applications to the full establishment of the technology in the postwar years. The study highlights the decisive role of engineers such as Riccardo Morandi and Silvano Zorzi, whose works exemplify both the artisanal and visionary dimension of prestressing and its progressive industrialization. The narrative underscores how technical innovation became intertwined with the lives of its protagonists and with the historical context of Italy's reconstruction, turning each bridge into a symbol of audacity and ingenuity. Finally, it emphasizes the continued relevance of prestressed concrete as a consolidated yet constantly evolving structural technique, still capable of opening new frontiers in contemporary engineering.

KEYWORDS: Prestressed concrete; bridges in Italy; Eugène Freyssinet; Gustavo Colonnetti; Riccardo Morandi; Silvano Zorzi; post-war reconstruction; history of structural engineering.

©2026 Hormigón y Acero, the journal of the Spanish Association of Structural Engineering (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0) License

* Persona de contacto / *Corresponding author*:
Correo-e / *e-mail*: antonino.recupero@unime.it (Antonino Recupero)

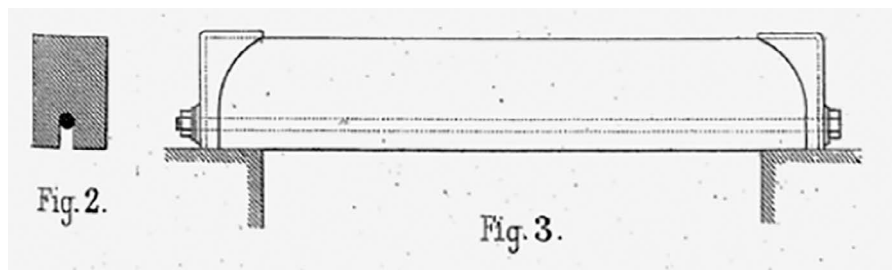


Figura 1. Viga de hormigón postensado diseñada por François Chaudy (1894). (Reproducida de [1]).

1. INTRODUCCIÓN

Cuando me fue propuesto contribuir con un artículo técnico para un número especial en homenaje a la trayectoria de dos grandes Amigos y Maestros, decidí no hablar de mí ni de aquello que yo sé hacer, sino más bien de las cosas que hacen grande nuestro oficio.

Narrar la génesis y la evolución de las construcciones en hormigón pretensado, tanto en el mundo como en Italia, constituye una empresa capaz de intimidar incluso al estudioso más experto. No en vano, tras haber elegido este tema hace ya más de un año, me encontré a menudo frente a la página en blanco con la sensación de enfrentarme a una síntesis tan ambiciosa como inevitablemente parcial. Cada intento de delinear sus contornos me pareció incompleto, como si la complejidad de la materia se escapara de cualquier delimitación precisa.

La tecnología del pretensado no hunde sus raíces exclusivamente en Italia: su origen es compartido, disputado entre experiencias europeas y norteamericanas, en un camino hecho de intuiciones, experimentos, fracasos y conquistas. Algunos estudiosos, que anteriormente se han acercado a este fascinante tema, sitúan el nacimiento de la precompresión en una intuición primitiva: la tensión preliminar como forma arcaica de sollicitación de los artefactos [1]. Sus primeras aplicaciones podrían reconocerse quizá en estructuras simples, como tiendas o cobertizos temporales, donde ya se comprendía la necesidad de aplicar una fuerza previa para garantizar estabilidad y forma.

En aquella época, por supuesto, los fenómenos reológicos vinculados a las pérdidas de tensión en el tiempo eran del todo desconocidos. Sin embargo, empíricamente debía de intuirse que las estructuras sometidas a tracción exigían un pretensado periódico para mantener su eficiencia. Miles de años más tarde, un nuevo ejemplo de precompresión apareció con el nacimiento de la navegación a vela: el mástil principal de una embarcación, probablemente egipcia, se estabilizaba mediante obenques pretensados, dando origen a una estructura rudimentaria —pero eficaz— de hormigón pretensado en potencia.

Al término de esta larga fase arcaica emergen ejemplos más articulados, como los arcos de fábrica atados con elementos de madera (como en la Mezquita de Kairuán, siglo IX) o con tirantes metálicos (como en la Catedral de Parma, siglo XII). Estas técnicas, convertidas en clásicas durante el Renacimiento italiano, no utilizaban en sentido estricto la precompresión, o lo hacían de modo muy limitado, pero influyeron

profundamente en el imaginario técnico de los pioneros de la precompresión moderna, desde Whipple [2] hasta Freyssinet [3], quienes a menudo se refirieron a ellas en sus escritos y proyectos.

Podría prolongarse largamente este viaje por la historia de las presolicitaciones: quizá no bastaría un volumen entero para analizar las numerosas patentes que, ya en el siglo XIX, comenzaron a abordar el tema de manera más sistemática. Entre ellas, una de las más significativas fue presentada en 1894 por François Chaudy, ingeniero francés que marcó la transición hacia la segunda fase de la historia del hormigón pretensado. Chaudy fue el primer europeo en proponer y comprender un sistema eficaz de precompresión —en la forma de postensado— aplicado a una viga de hormigón ya endurecida.

Su propuesta consistía en hormigonar una viga con una acanaladura longitudinal en su parte inferior. En ella se disponía una barra tensada contra tapones de hierro fundido en los extremos, generando un momento negativo uniforme a lo largo de todo el vano de la viga (Fig. 1). Chaudy intuía que este sistema podía extenderse también a otros materiales frágiles a tracción, como la fundición. Sus ideas fueron publicadas en el *Bulletin* de la Société des Ingénieurs Civils de París [4], entonces el principal órgano científico de la ingeniería francesa, precedidas por otra contribución dedicada al cálculo de placas delgadas.

2. A LOS ORÍGENES DE UNA REVOLUCIÓN: LOS PRIMEROS PASOS DEL PRETENSADO MODERNO

Entre 1903 y 1904, poco más de una década después de la publicación del artículo pionero de François Chaudy, un joven estudiante de ingeniería civil comenzaba a interrogarse sobre el potencial de la precompresión: su nombre era Eugène Freyssinet (1879–1962) (Fig. 3), destinado a convertirse en uno de los más grandes innovadores de la ingeniería estructural del siglo XX.

En aquellos años, Freyssinet asistía a las clases del profesor Charles Rabut (1852–1925), figura de primer orden en el panorama técnico francés y considerado entre los primeros en haber enseñado de manera sistemática el uso del hormigón armado desde 1896. Fue precisamente durante esas lecciones, dedicadas por un lado al comportamiento del hormigón armado y por otro al estudio minucioso de las deformaciones espontáneas o inducidas en las estructuras, donde Freyssinet



Figura 2. el puente de tres articulaciones de Praireal-sur-Besbre (1907). (Reproducida de [7]).

tuvo sus primeras intuiciones. Más tarde él mismo recordaría que la idea de la precompresión se le había ocurrido en aquel contexto, entre 1903 y 1904 [5],[6].

Uno de los primeros momentos de revelación tuvo lugar durante una visita a la obra de la ménsula de la Rue de Rome, junto a la estación de Saint-Lazare, donde observó aplicaciones prácticas de aquellas “deformaciones provocadas” de las que hablaba Rabut. El hecho de que su profesor dedicara parte del curso al estudio de los efectos de las deformaciones inducidas demuestra hasta qué punto el ambiente cultural era fértil para el desarrollo de ideas nuevas y radicales: conceptos como la deformación controlada, la presolicitación y la precompresión aún no estaban sistematizados, pero ya serpenteaban en el pensamiento técnico más avanzado.

Tras graduarse en 1905, Freyssinet no abandonó aquella intuición. Al contrario, la cultivó con tenacidad, buscando pronto ponerla en práctica. Entre 1906 y 1908 intentó dos aplicaciones experimentales de su idea de la deformación inducida como medio para mejorar la eficiencia estructural. Uno de estos intentos se reveló particularmente prometedor: en 1907 construyó el puente de tres articulaciones de Praireal-sur-Besbre (Fig. 2), con una luz de 26 metros, en el cual empleó técnicas de deformación controlada para facilitar el desencofrado.

Si bien el sistema no estaba aun formalmente definido como “precompresión”, en aquella estructura pueden leerse ya, en filigrana, los principios fundamentales que habrían de revolucionar la manera de concebir las obras de hormigón armado.

3. EL ESTUDIO SISTEMÁTICO DE LA FLUENCIA: 1905–1937

En el primer cuarto del siglo XX, mientras en Estados Unidos el interés por los fenómenos reológicos del hormigón se iba consolidando —con figuras como Franklin R. McMillan [9] profesor en la Universidad de Minnesota, quien ya en los pri-



Figura 3. Un joven Eugène Freyssinet. (Reproducida de [8]).

meros años de la década de 1910 emprendió estudios pioneros que proseguiría hasta los años cincuenta—, en Francia ningún académico se había aventurado todavía a abordar de manera sistemática el fenómeno de la fluencia del hormigón. Una vez más, fue Eugène Freyssinet quien vino a llenar ese vacío, con el pragmatismo del ingeniero y la intuición del pionero.

En 1911, durante la construcción del puente de Le Veurdre, Freyssinet se enfrentó a los efectos tangibles de la fluencia del hormigón. Desde aquel momento reconoció en este fenómeno el principal obstáculo para la utilización sistemática del hormigón pretensado. La ocasión para enfrentarlo científicamente llegó en 1922, cuando se le encomendó la realización de una obra ambiciosa: el puente de Plougastel, en Bretaña (Fig. 4). Con sus tres arcos de 186 metros cada uno, representaba un récord mundial y planteaba desafíos estructurales nunca antes afrontados.

Entre 1926 y 1929, Freyssinet llevó a cabo en esta estructura una serie de ensayos sistemáticos destinados a medir y comprender los efectos a largo plazo de las deformaciones viscosas. En arcos de semejante magnitud, las compresiones eran significativas, y el fenómeno se manifestaba en acorta-

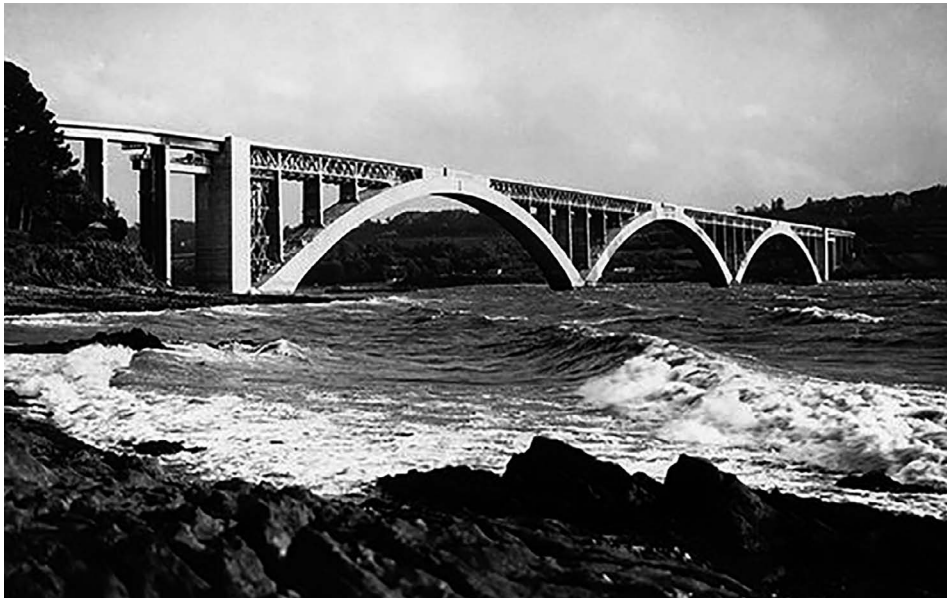


Figura 4. El puente de Plougastel, en Bretaña (Reproducida de [10]).

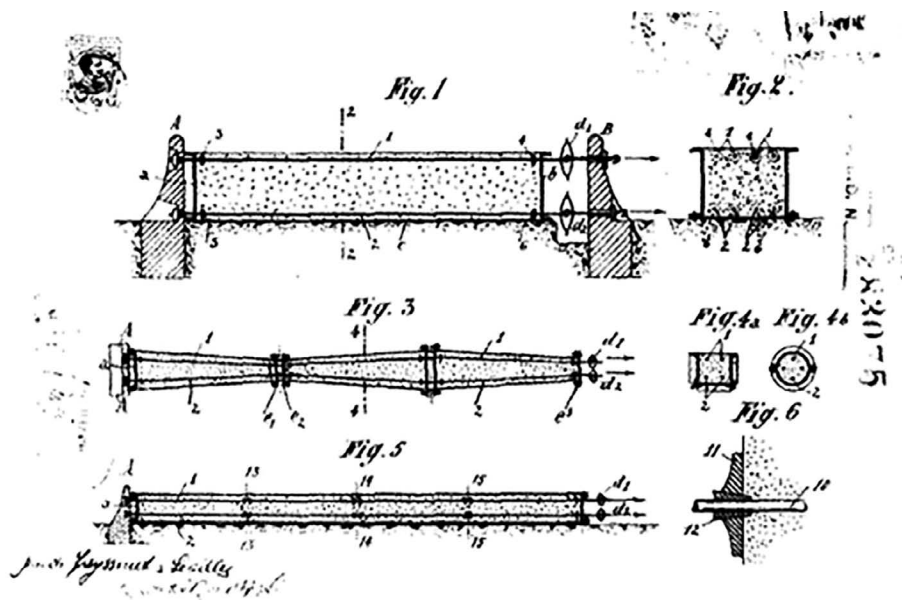


Figura 5. Sistema de precompresión para elementos de hormigón prefabricado, diseñado por E. Freyssinet y J. Seailles. (Reproducida de [13]).

mientos notables. Algunos resultados fueron publicados en 1930 [11], pero la versión íntegra de sus reflexiones sobre el tema no vería la luz hasta después de su muerte, en 1966 [12]. Ya entonces, sin embargo, su conocimiento de la viscosidad se contaba entre los más avanzados del mundo. Y, aun así, con su habitual lucidez, Freyssinet no dudaba en declarar cuánto quedaba todavía por comprender.

Entretanto, el trabajo en el frente tecnológico avanzaba. En octubre de 1928, junto a su colaborador Jean Seailles, Freyssinet obtuvo una patente destinada a marcar un hito: un sistema de hormigón pretensado mediante alambres tesados (Fig. 5).

Esta patente abarca todas las posibilidades de la tecnología de pretensado: (1) muestra lo que podrían ser modernos

bloques de anclaje; (2), (4a) y (4b) las diferentes secciones transversales; (3) y (5) muestran las vistas en planta y sección; finalmente, (6) muestra el sistema de anclaje de el alambre.

Aunque la idea no era del todo nueva —otros, especialmente en Alemania, ya habían explorado la posibilidad de incorporar elementos pretesos en el hormigón prefabricado (entre ellos Doehring, Mandl, Lund, Zisseler, Siegwart, Mezzetti, Wettstein y Hoyer)—, su propuesta se distinguía al menos por dos aspectos cruciales [14].

En primer lugar, Freyssinet y Seailles sabían con exactitud dónde colocar la armadura para lograr un equilibrio óptimo de las solicitaciones. En segundo lugar, habían comprendido y cuantificado las pérdidas asociadas a la viscosidad y a la retracción, integrándolas en el proyecto de manera sistemáti-



Figura 6. Bloques de anclaje en la Estación Marítima de Le Havre, solución de rehabilitación de Freyssinet (1934). (Reproducida de [7]).

ca y ofreciendo soluciones concretas. Su patente —ampliada en 1930— era sorprendentemente detallada, con recomendaciones que anticipaban muchos principios de la moderna concepción estructural:

- empleo de hormigones de alta calidad y alambres de acero de altísima resistencia;
- sistemas diferenciados para la puesta en tensión;
- configuraciones poligonales de las armaduras;
- posibilidad de prefabricar elementos múltiples en serie sobre una misma bancada de pretensado;
- reducción o eliminación de la armadura a cortante, gracias a la precompresión.

Pero fue en 1933 cuando el destino del pretensado conoció una aceleración decisiva. En ese año, la estación marítima de Le Havre, recién terminada, comenzó a sufrir asentamientos del terreno excesivos. Convertido en un asunto de Estado, el proyecto parecía destinado al fracaso, hasta que Freyssinet fue llamado para intentar una intervención de rescate. Se trataba de una apuesta tanto técnica como personal, que él afrontó con audacia y determinación.

Aplicó la precompresión a gran escala: pilotes prefabricados compuestos por segmentos unidos mediante fuerzas de compresión, cabezales precomprimidos en las cimentaciones,

cada elemento concebido para colaborar en la estabilización del conjunto. El resultado fue un éxito. La estación fue salvada, y toda Francia —junto con una parte significativa del mundo técnico europeo— fue testigo de ello. Era la consagración definitiva del hormigón pretensado como tecnología fiable e innovadora (Fig. 6).

En los años siguientes, entre 1935 y 1939, Freyssinet trabajó en Oued-Fodda, en Argelia (Fig. 7), donde construyó la primera presa del mundo en hormigón pretensado y uno de los primeros puentes con vigas prefabricadas con armaduras pretesas. Era el inicio de una nueva era para la ingeniería estructural.

4. LA PATENTE QUE LO CAMBIÓ TODO: EL NACIMIENTO DEL SISTEMA MODERNO DE POSTENSADO

En agosto de 1939, en vísperas de la Segunda Guerra Mundial, Eugène Freyssinet depositó la que pasaría a la historia como su patente más icónica y resolutoria: el sistema completo para el postensado del hormigón armado (Fig. 8). Con esta invención no solo consolidó décadas de experimentación, sino que definió de manera sistemática los componentes fundamentales de una tecnología destinada a revolucionar la ingeniería estructural del siglo XX.

El sistema patentado integraba, en un conjunto coherente y funcional, todos los elementos necesarios para hacer operativa la técnica del postensado:

- un dispositivo de anclaje capaz de transmitir eficazmente los esfuerzos al hormigón,
- un conducto para guiar los cables a través del elemento estructural,
- un gato hidráulico para aplicar la tensión de manera controlada,
- y finalmente un cable compuesto por alambres paralelos, en contraste con los cordones trenzados que serían adoptados en épocas posteriores.

En aquella época también era más fácil utilizar cables con alambres paralelos para insertarlos en los conductos.

Esta innovación representaba la síntesis de años de observaciones, fracasos, perfeccionamientos técnicos y reflexiones



Figura 7. Viga prefabricada de 19 metros de luz del puente sobre el río Oued-Fodda, Argelia, 1936. (Reproducida de [7]).

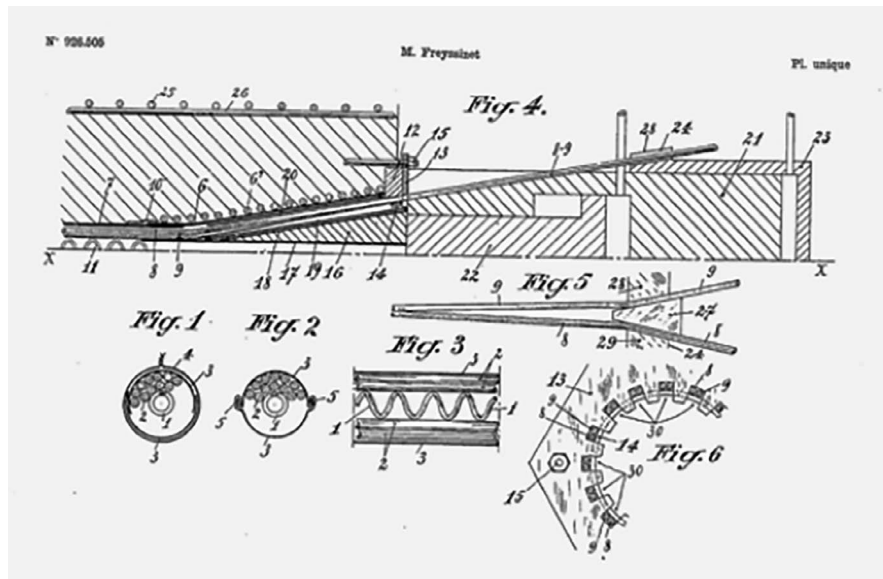


Figura 8. El primer sistema moderno de postensado con anclaje, diseñado por E. Freyssinet. Incluye: anclaje, cuña para bloquear los alambres, cable, vaina y gato hidráulico. (Reproducida de [1]).

teóricas. Con ella, Freyssinet hizo posible una aplicación industrial y confiable de la precompresión, liberándola de las incertidumbres empíricas que todavía aquejaban a muchos de sus predecesores. El hormigón postensado, tal como lo conocemos hoy, encontraba en esta patente su verdadera formalización.

En pleno conflicto mundial, en 1941, Eugène Freyssinet inició la construcción del puente de Luzancy, sobre el río Marne (Fig. 9), una obra que sería completada en 1945, al término de la guerra [15]. La estructura consistía en un pórtico prefabricado de 55 metros de luz, caracterizado por pilas-estribos triangulares y por una esbeltez estructural extraordinaria para la época. Aunque técnicamente se trataba de un pórtico, el puente presentaba problemáticas asimilables a las de una viga continua, ya que las células triangulares que lo componían eran de dimensiones reducidas y estaban sometidas a deformaciones e inestabilidades propias de elementos alargados.

La configuración utilizada en Luzancy fue retomada por Freyssinet en la posguerra para la reconstrucción de cinco puentes destruidos, también sobre el Marne, terminados en 1951. Entre ellos, el más célebre es, sin duda, el puente de Esbly, aunque todos compartían el mismo esquema estático y constructivo, con luces de hasta 74 metros. En estas obras, el ingeniero francés aplicó íntegramente su sistema de precompresión, poniendo en práctica lo desarrollado en las décadas anteriores y consolidando tanto la fiabilidad como la repetibilidad de la tecnología.

Estos puentes, realizados en un contexto de gran necesidad reconstructiva, representaron la primera demostración a gran escala de la eficacia y la versatilidad del hormigón armado pretensado. No solo marcaron un punto de inflexión en la técnica constructiva europea, sino también el reconocimiento definitivo del sistema Freyssinet como una de las herramientas ingenieriles más innovadoras e influyentes del siglo XX [3],[7],[11],[12], [15].

5.

EL PAPEL DE GUSTAVO COLONNETTI EN EL DESARROLLO DEL PRETENSADO EN ITALIA

En febrero de 1939, mientras en Italia rige la fase más rígida de la política autárquica, Gustavo Colonnetti, desde las páginas de la revista *Il Cemento Armato*, intenta persuadir a técnicos, científicos y políticos italianos de que *“la economía de hierro no debe buscarse en absurdos regresos a formas constructivas decididamente y definitivamente superadas – ni en la adopción de no menos absurdos sucedáneos – sino persiguiendo serenamente, con todos los medios y recursos de la ciencia y de la experiencia, el diseño de una técnica más avanzada”* [13], [16].

En las palabras del entonces más célebre – y más incómodo – científico italiano en el campo de la construcción, se lee la condena de las imposiciones reaccionarias del régimen que favorecen un retorno a las tradicionales fábricas portantes y a las autárquicas cubiertas abovedadas. Una condena análoga se dirige al mismo tiempo a las paralelas experimentaciones visionarias que buscan sustituir la armadura de acero del hormigón armado con varillas de madera o de bambú, descuidando culposamente la exigua magnitud del módulo elástico de estos sucedáneos; experimentaciones – estas últimas – alentadas por los industriales del cemento, en la búsqueda de soluciones rápidas para afrontar la crisis derivada de la prohibición del empleo del hormigón armado en la edificación civil.

La técnica más avanzada a la que se refiere Colonnetti estaba ya en experimentación desde hacía algunos años en Europa, de la mano de Eugène Freyssinet en Francia y de Wayss & Freytag y Dywidag en Alemania: se trata del llamado “hormigón armado pretensado”.

¿Por qué Colonnetti se siente tan fascinado por la precompresión, hasta el punto de considerarla la solución a los problemas económicos del mundo de la construcción? Pueden identificarse al menos dos razones.



Figura 9. Puente de Luzancy sobre el Marne. Luz de 55 metros. 1945. (Reproducida de [7]).

La primera es que el científico italiano, coincidiendo respectivamente con Eugène Freyssinet, Eduardo Torroja y Ove Arup, siempre había considerado el hormigón armado un material “absurdo”, “extraño” y “difícil”. Los dos elementos que lo componen tienen características de resistencia prácticamente opuestas, y la fuerza de su unión reside precisamente en esta total diversidad: uno absorbe las solicitaciones que el otro no es capaz de soportar. Pero la paradoja consiste en que la fiabilidad estática del hormigón armado se basa en la garantía de adherencia entre hierro y hormigón: adherencia que queda gravemente comprometida por la incapacidad del hormigón de resistir a tracción y, por tanto, de acompañar las deformaciones del acero. Las inevitables fisuras del hormigón en la zona traccionada habían suscitado dudas ya a principios de siglo, durante la fase pionera de la experimentación del hormigón armado. Ni siquiera la difusión, a finales de los años treinta, de cementos especiales de alta resistencia proporcionaba una solución al problema, porque las prestaciones de los conglomerados mejoraban solo en términos de resistencia a compresión, mientras no crecía en la misma proporción la resistencia a tracción. También la posibilidad de empleo de aceros de alta resistencia, que permitiría un notable ahorro de material, se ponía en entredicho precisamente por la débil resistencia a tracción de los hormigones y por su tendencia a fisurarse en cuanto se les imponían deformaciones de tracción más allá de un cierto límite.

Con la técnica de la presolicitación, en cambio – resulta claro para Colonnetti, así como para sus colegas europeos, que las relaciones recíprocas entre hormigón y hierro quedan completamente revolucionadas: la armadura ya no se utiliza para soportar una parte de los esfuerzos debidos a las solicitaciones externas, sino para crear en el hormigón estados de tensión preventivos de signo contrario a los que producirán dichas solicitaciones. La colaboración entre los dos materiales se ha transformado en una coacción: el acero precomprime al hormigón, el cual se hace capaz de resistir también a los esfuerzos de tracción gracias al benéfico mecanismo de la superposición de los efectos. Este juego de roles resuelve la paradoja de las fisuras en la zona traccionada y readmite sin vacilación el uso de aceros de alta resistencia,

destinados a ser solicitados a elevadísimos esfuerzos de tracción, y de cementos especiales, llamados a resistir solo a solicitaciones de compresión. En el hormigón pretensado por la armadura tesada, el hormigón y el acero son solicitados de manera conforme a sus características de resistencia y se aprovechan al máximo: la técnica permite, por tanto, una concreta economía de material [17].

El segundo motivo por el que Colonnetti (Fig. 10) impulsa la precompresión es que la nueva técnica llega a sanar una herida abierta en el flanco de la ciencia de las construcciones. Colonnetti se expresa con gran claridad en relación con el valor de la teoría del hormigón armado formulada por Edmond Coignet y Napoléon de Têdesco más de cuarenta años antes, en 1894, y aún en uso en 1939: simplemente considera que aquellos métodos de cálculo eran «*carentes, absolutamente carentes de cualquier valor científico. Y ello no solo en el sentido de que, basados en hipótesis injustificadas e injustificables, conducen a conclusiones que la experiencia desmiente notoriamente, sino también en el sentido de que, al ser esas hipótesis entre sí incompatibles y contradictorias, a la teoría que de ellas se deriva no puede reconocerse siquiera el carácter de una construcción lógica capaz de sostenerse a la luz de la crítica más elemental*» [18]. Quienes habían introducido aquellos cálculos en la normativa y en el uso no se hacían ilusiones sobre su valor; solo posteriormente el procedimiento había asumido un carácter definitivo, autorizando a aplicar a ciegas los métodos simples y conocidos de la teoría de la elasticidad.



Figura 10. Gustavo Colonnetti. (Reproducida de [19]).

Colonnetti era un competente teórico: a partir de 1917, jovencísimo catedrático en Pisa se había ocupado de la definición del estado de equilibrio de un cuerpo en presencia de deformaciones no compatibles –definido por él como estado de coacción–; en 1924 había formulado un teorema de mínimo del trabajo de deformación, que aún lleva su nombre: una generalización del teorema de Menabrea en presencia de coacciones elásticas. Desde 1937 se dedicaba a reorganizar el corpus de la teoría matemática del sólido elástico, adaptándola a un sólido no perfectamente elástico, sino más bien elastoplástico, hipótesis más próxima al comportamiento del hormigón armado.

Sin entrar en el detalle de sus intuiciones, es cierto que en 1939 Colonnetti era muy consciente de cuánto los estados de coacción artificial podían mejorar el comportamiento estático de las construcciones y, paralelamente, de cuánto los métodos de cálculo “clásicos” del hormigón armado debían ser urgentemente sustituidos por una teoría rigurosa y científica.

En septiembre de 1939, Colonnetti elabora y publica un método de cálculo para las vigas con armaduras previamente tesadas, aplicación directa de su elegante teoría de las coacciones elásticas [20]. En esta nueva configuración las hipótesis de la teoría elástica resultan científicamente aplicables: la acción de compresión del acero sobre el hormigón, de hecho, catapultada el eje neutro fuera de la sección de hormigón, que resulta entonces toda reactiva, enteramente comprimida, además de homogénea, no estando ya llamada la armadura a resistir a las cargas externas. El comportamiento del material puede, por tanto, describirse perfectamente sin recurrir a improbables procedimientos de homogeneización del acero al hormigón o al empleo de coeficientes de valores ficticios y sin significado físico alguno.

La técnica de la precompresión del hormigón le permite, por una parte, promover la prohibición definitiva de aquel arbitrario método de cálculo y, por otra, dar respuesta y aplicación directa a sus valiosos estudios juveniles. La semilla sembrada no tarda en dar frutos y en Italia los jóvenes ingenieros comienzan a ensayar en las experimentaciones.

6. LOS PRIMEROS ENSAYOS SOBRE ELEMENTOS DE HORMIGÓN PRETENSADO EN ITALIA

Los ingleses utilizan el término *serendipity*, que me permite traducir como *serendipia*, para indicar un hallazgo interesante o valioso que no se estaba buscando. Sin duda, de esta cualidad estaban dotados los dos jóvenes ingenieros Pietro Noli y Giuseppe Marioni cuando, habiendo conocido por los textos fundamentales de Eugène Freyssinet la existencia de la precompresión, se propusieron experimentar sus efectos en un forjado de viguetas y bovedillas [21].

Estamos en 1942, la Segunda Guerra Mundial está ya en pleno desarrollo y ciertamente no abundan los medios técnicos para realizar semejantes ensayos. Esto no desanima a los dos jóvenes ingenieros, que consiguen montar un rudimentario banco de pruebas con medios de fortuna. Las armaduras de precompresión están constituidas por cuerdas de piano

que, en aquel tiempo, representaban la única fuente comercial de acero de altísima resistencia. Por ello, el acero para pretensado aún hoy en ocasiones se denomina *acero armónico*.

Sin embargo, para la validación de los primeros resultados experimentales obtenidos con medios precarios, es necesaria la realización de pruebas más detalladas bajo la supervisión de laboratorios oficiales. Los primeros prototipos de viguetas pretensadas enviados al Politécnico de Milán producen, inesperadamente, un resultado negativo, aunque no desde el punto de vista experimental, ya que las viguetas ni siquiera fueron probadas, sino desde el de las relaciones públicas. El hecho es que el joven asistente al que se le había sometido la cuestión de las viguetas pretensadas en vista de la experimentación, al no haber comprendido de inmediato que las viguetas estaban ya realizadas y listas para ensayarse, desaconsejó su ejecución sosteniendo que la precompresión de un elemento esbelto provocaría su inestabilidad. La equivocación no favoreció las relaciones posteriores entre los inventores y algunos importantes docentes del Politécnico de Milán, que desde entonces y durante más de una década miraron con sospecha y desconfianza, e incluso obstaculizaron, la tecnología del pretensado, calificándola de algo antinatural o de “un procedimiento que transformaba la estructura en un queso gruyer.”

Las primeras pruebas de carácter oficial se realizan, como puede imaginarse en medio de grandes dificultades, en Zúrich en 1944. A raíz del interés de Colonnetti, las pruebas se llevan a cabo en el laboratorio dirigido por el Prof. Roš, bajo el control del entonces joven ingeniero Franco Levi. Tanto Colonnetti como Levi eran en aquel tiempo, como se verá más adelante, refugiados en Suiza y se encontraban en Lausana.

7. COLONNETTI Y LA ESCUELA DE LAUSANA

En 1943 Colonnetti, ya rector del Politécnico de Turín y conocido por su firme antifascismo, se ve obligado al exilio en Suiza para escapar de la persecución fascista. En Lausana obtiene un puesto en la École des Ingénieurs de la Universidad de Lausana, convirtiéndose en su dirigente y docente.

Su principal obra es la concepción y organización de una suerte de “*universidad italiana en el exilio*”: funda y dirige el *Campo Universitario Italiano* de Lausana (además de otros campus análogos en ciudades suizas como Friburgo, Ginebra, Neuchâtel, Huttwil y Mürren), destinados a estudiantes militares internados y refugiados.

El Campo de Lausana se inaugura oficialmente el 26 de enero de 1944, con Colonnetti al frente de la iniciativa. Participan en él más de doscientos estudiantes y entre los docentes figuran intelectuales de relieve como Gino Fano, Luigi Einaudi, Amintore Fanfani, Concetto Marchesi y otros.

Entre sus asistentes se recuerdan Franco Levi y Aldo Favini, y entre sus alumnos Silvano Zorzi, todos ellos posteriormente protagonistas de la afirmación de la técnica del pretensado en la posguerra, gracias a las enseñanzas de Colonnetti en el período suizo. En efecto, Colonnetti en aquel tiempo no escatimó lecciones, no solo sobre los fundamentos teóricos del pretensado, sino también sobre los aspectos prácticos de la nueva tecnología.

Finalmente, tras la liberación, regresa a Italia en diciembre de 1944, transportado en un vuelo militar a Roma gracias a una precisa solicitud del gobierno provisional italiano, y se convierte en Presidente del *Consiglio Nazionale delle Ricerche* (CNR).

8. DESARROLLO DEL HORMIGÓN ARMADO PRETENSADO EN ITALIA EN LA INMEDIATA POSGUERRA

Un hecho resulta emblemático para la historia de Italia. En la noche entre el 3 y el 4 de agosto de 1944, las tropas alemanas en retirada ponen en marcha la Operación *Feuerzauber* (“Hechizo de fuego”), destruyendo todos los puentes sobre el Arno en Florencia, con excepción del Ponte Vecchio. Las explosiones comienzan a las 22:00 del 3 de agosto y se suceden durante toda la noche. El primero en ser demolido es el Ponte alle Grazie; a medianoche vuela el Ponte Santa Trinita y, posteriormente, caen el Ponte alla Carraia, el Ponte San Niccolò y el Ponte alla Vittoria. Finalmente, son demolidas las construcciones situadas en los accesos al Ponte Vecchio, lo que hace que el paso resulte inutilizable, aunque el puente en sí permanezca en pie.

El Ponte Vecchio se libra de la destrucción, lo que alimenta de inmediato mitos y leyendas. Algunos sostienen que hubo una orden directa de Hitler, quien habría querido salvar el puente por su belleza y valor artístico; otros afirman que intervino el cónsul alemán Gerhard Wolf, siempre comprometido con la salvaguardia del patrimonio artístico florentino. Una versión alternativa, aparecida solo en los últimos años, sugiere que algunos orfebres locales sabotearon las minas cortando los cables; se cuenta el testimonio de un ayudante de los orfebres, un tal Burgasso, considerado por los alemanes un insensato, que habría retirado los explosivos durante la colocación.

En cualquier caso, aunque permaneciera en pie, el Ponte Vecchio quedó inutilizado a causa de las demoliciones de las viviendas circundantes y de las fortificaciones de primera línea construidas por los alemanes en la orilla opuesta. El Arno se convirtió en un obstáculo físico y psicológico para la ciudadanía y para las tropas aliadas, dividiendo la ciudad en dos. Solo en las horas posteriores a la liberación, los Aliados construyeron puentes Bailey provisionales (por ejemplo, en las inmediaciones del Ponte Santa Trinita) para restablecer las conexiones.

Florencia no fue un caso aislado: al final de la Segunda Guerra Mundial, la red de infraestructuras italiana se hallaba reducida a escombros. Más de 10.000 puentes carreteros y ferroviarios habían sido destruidos por los bombardeos o volados durante las retiradas; las grandes arterias de comunicación estaban interrumpidas, los firmes deteriorados, las estaciones y los puertos inutilizables. En muchas zonas del país se recurría a pasos provisionales de madera o a puentes Bailey suministrados por los Aliados, pero la circulación de mercancías y personas seguía siendo lenta y precaria. La reconstrucción requería soluciones rápidas, resistentes y económicas en el uso de materiales: en este contexto, el hormigón armado pretensado, aún poco conocido en Italia, se impuso como tecnología innovadora, abriendo el camino a una nueva etapa de la ingeniería estructural.

Colonnetti no pierde tiempo: en calidad de presidente del CNR, el 1 de julio de 1945 instituye en el Politécnico de Turín un “*Centro de Estudio sobre los Estados de Coacción Elástica*”, confiando su dirección operativa a su discípulo predilecto, Franco Levi. Es el momento de pasar de la teoría a la reconstrucción concreta del país. No se trata de un simple laboratorio: el Centro, por encargo del Ministerio de Obras Públicas, tiene la misión estratégica de examinar, aprobar y orientar todos los proyectos italianos de estructuras de hormigón armado pretensado.

Las actividades del Centro se desarrollan en un clima de gran dinamismo: la reconstrucción de posguerra demanda puentes, viaductos e infraestructuras modernas, y el hormigón armado pretensado se presenta como la tecnología ideal, ligera, duradera y económica en el uso del acero. En sus dos primeros años de vida, el Centro publica más de cuarenta artículos científicos —veinte de ellos firmados o editados por Levi—, perfecciona métodos de cálculo y procedimientos de prueba. En 1946 organiza la primera conferencia nacional sobre el hormigón armado en la posguerra, acompañada de espectaculares ensayos de laboratorio sobre una viga pretensada de doce metros y un forjado [22], [23], [24].

Dos años después de la creación del Centro, la época estaba madura y, bajo el impulso del propio Colonnetti, Italia legisla por primera vez sobre la técnica del pretensado: el 20 de diciembre de 1947 se promulga el Decreto del Capo Provvisorio dello Stato (DCPS) n. 1516 - *Norme per la esecuzione e l'impiego delle strutture di cemento armato precompresso*. Publicado en la *Gazzetta Ufficiale*, Serie General n.º 8 del 12-01-1948, en su artículo 2 establece: «Todos aquellos, incluidos los organismos y oficinas estatales, que en el territorio de la República Italiana pretendan ejecutar estructuras pretensadas, independientemente de las demás disposiciones del Real Decreto de 16 de noviembre de 1939, n.º 2229, están obligados a someter los cálculos y procedimientos constructivos a la previa revisión del Consejo Superior de Obras Públicas, que otorgará la eventual aprobación».

La promulgación del Decreto Ministerial de 1947, que regula el uso del pretensado en Italia, convierte al Centro en paso obligado para los proyectistas: centenares de esquemas estructurales pasan bajo la lupa de Levi y sus colaboradores, entre ellos Giorgio Macchi y Piero Marro, quienes detectan errores, sugieren mejoras y transforman cada proyecto en una lección técnica. Paralelamente, el Centro se convierte en semillero de innovación: aquí, en 1959, nace el sistema de anclaje Tecnicavi, patentado por Macchi y Levi, destinado a un gran éxito internacional.

Entre 1945 y 1955, el Centro acompaña la construcción de obras emblemáticas de la reconstrucción italiana, como los viaductos de la *Autostrada del Sole*, y contribuye a la creación de una auténtica escuela italiana del pretensado. Cuando la actividad se cierra, en 1961, deja como herencia un patrimonio de conocimientos, métodos y proyectistas que marcará durante décadas la ingeniería estructural del país.

En 1955, en un contexto de creciente difusión del pretensado y de ampliación de la red nacional de infraestructuras, la función de aprobación pasa al Consejo Superior de Obras Públicas, que instituye una Comisión especial para el hormigón armado pretensado. De ella forman parte tres de los mayores expertos en la materia: Franco Levi, garante de la con-

tinuidad científica con la experiencia turinesa; Carlo Cestelli Guidi, prestigioso profesor de Técnica de las Construcciones en La Sapienza y referente para la codificación normativa; y Giuseppe Rinaldi, ingeniero y docente, autor de uno de los primeros manuales italianos sobre hormigón armado pretensado, que aporta a la comisión su competencia técnica y su experiencia en la formalización de las reglas para el cálculo, el diseño y el ensayo de las estructuras pretensadas. Este paso marca la transición de una gestión fuertemente centralizada en el ámbito universitario a un control institucional de alcance nacional, acompañando la fase de máxima expansión del hormigón armado pretensado en la Italia de posguerra.

En ese período aparecen los primeros textos sobre el tema en la literatura técnica italiana, y los proyectistas comienzan a considerar una tecnología que sale de los laboratorios de investigación [25], [26], [27]. De hecho, con la promulgación del DCPS n.º 1516/1947, el hormigón pretensado puede ser empleado en la construcción de obras; además, dicho decreto, debido al procedimiento de aprobación, permite una trazabilidad completa de las intervenciones realizadas en el territorio nacional.

Sería tarea ardua reconstruir el desarrollo a través de cada una de las obras, puesto que, a partir de la promulgación del decreto, estas comienzan a multiplicarse sin tregua, como brotes que florecen en cada estación.

Por ello, con la certeza de que una narración centrada en las obras resultaría imposible, se ha optado por contar la historia no a través de las construcciones, sino de sus proyectistas; porque detrás de cada creación, sobre todo cuando se trata de una obra primera, siempre hay un hombre —con sus dudas, sus inquietudes y, sobre todo, su coraje. Sí, el coraje de transformar lo que había sido experimentado en el laboratorio en una realidad concreta; de pasar del objeto de estudio de los investigadores a una estructura viva, tangible, funcional y segura.

En 1949 nace la Asociación Nacional Italiana del Hormigón Armado Pretensado (ANICAP). Las primeras aplicaciones se sitúan entre ese mismo año y los primeros años cincuenta, y cuentan con la participación de proyectistas ya consagrados —como Morandi, Rinaldi y Cestelli Guidi— junto a técnicos de empresa, como Carlo Pradella de SACAIM, y jovencísimos profesionales, entre los cuales Silvano Zorzi.

Todavía no existe una norma técnica de referencia: a colmar ese vacío es el ingeniero Levi, que asume la responsabilidad de validar, aprobar y ensayar los proyectos.

El primer viaducto en hormigón armado pretensado lleva la firma de Carlo Pradella, ingeniero véneto que, aunque no se había formado oficialmente en la escuela de Lausana, mantenía estrechas relaciones con Zorzi. Se trata del viaducto de Vallesella sobre el Piave (1949) (Fig. 11), realizado en el marco de las obras para la planta hidroeléctrica Piave-Boite-Maè: un tablero en hormigón armado pretensado con vigas apoyadas sobre pilas formadas por celosías de hormigón armado, con un total de siete vanos de 24 metros.

La elección del pretensado por parte de SACAIM responde a una voluntad precisa: adoptar sin vacilaciones una tecnología nueva y prometedora. Para esta obra, Pradella opta por la patente Freyssinet. Los alambres de acero armónico se recubren de betún y luego de papel; una técnica constructiva que nunca más se repetiría en Italia.



Figura 11 - Viaducto de Vallesella sobre el Piave (1949) (Reproducida de [28]).

En el congreso de ANICAP de 1954, en la memoria de Marletta, se lee: «*Las primeras autorizaciones ministeriales para puentes en hormigón armado pretensado se remontan a mayo de 1949; desde entonces se han aprobado 72 proyectos, muchos de ellos ya realizados y en servicio, mientras que otros se encuentran en fase de ejecución o de proyecto*» [29].

La difusión comienza a ser sorprendentemente rápida: ya a finales de 1961 se cuentan cerca de quinientos puentes y viaductos ejecutados o en vías de finalización. En el solo tramo Milán-Florenia de la Autostrada del Sole se realizan hasta treinta y seis obras en hormigón armado pretensado, con un desarrollo total de 7.5 kilómetros.

En la fase inicial de desarrollo, el empleo del pretensado en Italia se orienta principalmente hacia esquemas estructurales isostáticos, menos sensibles a los estados de coacción inducidos artificialmente por los cables tensados. Esto no impide, sin embargo, alcanzar luces y configuraciones geométricas significativamente superiores a las realizables con el hormigón armado ordinario.

El primer ejemplo nacional de puente en hormigón armado pretensado es, como se ha dicho, el viaducto proyectado por Carlo Pradella, al que sigue poco después el puente sobre el torrente Samoggia, en las cercanías de Bolonia, realizado por Giuseppe Rinaldi entre octubre de 1949 y enero de 1950. Este último, constituido por un único vano de 26 metros, está formado por dovelas prefabricadas solidarizadas mediante cables postensados y dispositivos de pretensado Magnel: una viga simplemente apoyada, sobria y esencial, pero destinada a abrir el camino a nuevas experimentaciones.

9. RICCARDO MORANDI, EL PROYECTISTA VISIONARIO

Pocos meses después, en Canneto, cerca de Empoli (Fig. 12), se completa el puente sobre el río Elsa, diseñado por Riccardo Morandi y construido por la empresa Fratelli Giovannetti [30]. Con sus 40 metros de luz, la estructura se distingue por la claridad y la modernidad del esquema: cuatro vigas longitu-



Figura 12- R. Morandi, puente sobre el Elsa en Canneto, cerca de Empoli, 1950 (ACS, Morandi). (Amablemente proporcionada por el Eng. E. Codacci Pisanelli).

dinales en doble T prefabricadas, unidas por siete diafragmas y perfectamente armados a cortante. Los cables de pretensado, compuestos por 16 alambres de acero de 5 mm, discurren siguiendo trazados parabólicos en el interior del alma de las vigas y encuentran anclaje en un sistema inédito: la primera patente de Morandi, íntegramente en acero y capaz de permitir el retesado. Se trata de una alternativa audaz a las cuñas perdidas típicas de los sistemas Freyssinet y Magnel.

Con esta obra Morandi hace su entrada en el sector de los puentes de hormigón pretensado. No es un debutante: ya desde 1948 elabora soluciones originales de tesado que, a lo largo de su carrera, se transformarían en seis variantes sucesivas (M1...M6). Innovador incansable y espíritu abierto a la experimentación, aborda con decisión todos los principales tipos estructurales de su tiempo, transformándolos en ocasiones para inventar.

En 1952, el puente de Giunture sobre el río Liri, en la provincia de Frosinone, marca una de sus primeras afirmaciones. Con una luz teórica de 61.60 metros, se presenta como un conjunto de tres pórticos paralelos, con pilas moldeadas empotradas en la base y sin apoyos intermedios: una solución que se adapta bien al carácter impetuoso del río, refractario a pilas en el cauce. El tablero, íntegramente pretensado, es una precisa composición de tres vigas cajón de dos metros de altura y unos siete de ancho, ensambladas en obra a partir de dovelas prefabricadas. Los diafragmas y la losa, en cambio, son de hormigón armado ordinario.

Un año más tarde, para la empresa Ferrocemento, Morandi concibe en Sicilia un tablero reticular, compuesto por cinco vigas cajón y siete diafragmas, también prefabricados y pretensados en obra sobre los ríos Agrò y Fiumidinisi (Fig. 13).

Casi de forma consecutiva, en Benevento, tomó forma el puente San Nicola: un vano central de 80 metros, dos laterales de 20, y una idea más evolucionada respecto al puente de Giunture. Aquí el tablero, formado por cuatro cajones longitudinales empotrados en las pilas, renuncia a servirse de estas últimas para equilibrar las solicitaciones. Los cables de pretensado, libres, se prolongan más allá, extendiéndose a lo



Figura 13 - Vigas cajón para los tableros de los viaductos Agrò y Fiumidinisi. (Reproducida de [31]).

largo de los voladizos laterales hasta superar los taludes: un preludio al concepto de viga balanceada que Morandi perfeccionaría en los años siguientes.

En torno a 1960, la visión estructural de Morandi alcanza plena coherencia y originalidad. Convencido de que el pretensado debía emplearse con la máxima eficiencia, intuye que la reducción de las solicitaciones de flexión no requiere pórticos complejos, sino que puede lograrse equilibrando los momentos positivos del vano con momentos negativos generados en el paso sobre las pilas.

De esta intuición nace la viga balanceada con tirantes inferiores: un voladizo simétrico dispuesto sobre dos pilas inclinadas, cuyas extremidades se hallan conectadas a la base mediante elementos de tracción. La posibilidad de variar tanto la inclinación de las pilas como el pretensado de los tirantes ofrece una libertad proyectual inédita, adaptable a contextos diversos. Morandi recupera así un principio antiguo y lo transforma en un instrumento moderno y versátil, capaz de generar soluciones hasta entonces inimaginables.



Figura 15 - Viaducto General Rafael Urdaneta en Maracaibo - Venezuela (1962) (Reproducida de [33]).

Solo tres de estos puentes se encuentran en Italia, pero todos ellos pertenecen a un mismo hilo conceptual, desarrollado con creciente coherencia y refinamiento. Con el Carpineto, Morandi alcanza la perfección de los detalles constructivos, justo en el momento en que el mundo comienza a abandonar los tirantes de hormigón pretensado en busca de nuevos caminos. Y, por desgracia, el 14 de agosto de 2018, el pilar 9 del viaducto Polcevera colapsa, víctima del descuido humano y de la ausencia de mantenimiento. La obra de Morandi fue reemplazada en 2020, pero permanece en la memoria como un capítulo irreplicable de la historia de la ingeniería.

10. SILVANO ZORZI, EL PROYECTISTA PROLÍFICO

Pero entre los artífices de la reconstrucción de la posguerra no puede ciertamente olvidarse a Silvano Zorzi, vénéto de nacimiento, pero hijo de aquella escuela fundada por Colonnetti, exiliado en Lausana junto a él. En 1939 Zorzi se inscribe en la facultad de ingeniería de su ciudad natal, Padua, pero con el estallido de la guerra es llamado al servicio militar y se ve obligado a abandonar los estudios. El armisticio del 8 de septiembre de 1943 lo sorprende bajo las armas, en el Norte: con tal de no colaborar con la República de Saló y no arriesgar la deportación a Alemania, huye a Suiza. Apenas terminada la guerra, recién graduado, es inmediatamente contratado en el Centro de Estudios sobre los Estados de Coacción Alástica de Colonnetti. Pero Zorzi no es un investigador de laboratorio y, en cuanto puede, se dedica al diseño de puentes. La experiencia suiza lo había marcado para siempre: el hormigón armado pretensado y el diseño permanecerán como los elementos clave de su modo de concebir las estructuras; de la compresión previa del hormigón hace una auténtica fe y en Italia logra dominarla como pocos.

Aún no treintaero, se enfrenta al diseño del puente de servicio con tablero inclinado para la central hidroeléctrica

del Mucone (1950) (Fig. 16), con una luz de la parte pretensada de 37.50 m (pendiente 38.6%). Poco después abre un estudio de ingeniería con su propio nombre, con sede en Milán, que en 1961 se convertirá en IN.CO., Ingegneri Consulenti [34].



Figura 16 - Puente del Mucone (1950) (Reproducida de [35]).

Para la empresa Rizzani, sobre el Po – Autostrada del Sole en Mortizza, cerca de Piacenza, Zorzi proyecta en 1956 un viaducto compuesto por dieciséis vanos. Los tableros, simplemente apoyados entre los pilares, se distinguían por una luz notable de 60.80 m, una anchura de 18.50 m y un canto de 3.20 m. La longitud total del viaducto era de 1.176.00 m.

Es la época de la construcción de la Autostrada del Sole: las empresas compiten por contratar a los mejores proyectistas, y Silvano Zorzi junto con Giorgio Macchi son llamados por Astaldi S.p.A. para dos proyectos particulares: el viaducto sobre el Arno en Incisa y el viaducto sobre el Arno en Levanne. Giorgio Macchi, discípulo de Franco Levi, había trabajado con él en la experimentación sobre elementos en hormigón pretensado. En los años siguientes fundará la escuela de estructuras de la Universidad de Pavia, contribuyendo de manera determinante al rescate de la catedral de la misma ciudad.



Figura 17 - Viaducto de Incisa (1962-1963) (Reproducida de [36]).



Figura 18 - Viaducto de Levane (1962-1963) (Reproducida de [34]).

El viaducto de Incisa (1962-1963) (Fig. 17), concebido por ambos, es audaz: un arco central-portal de 104 m de luz en hormigón armado que permite el apoyo continuo de los tableros de acceso en hormigón pretensado, de modo que estos últimos tuvieran luces, en suma, ordinarias de 36.00 m. El viaducto fue duplicado con la misma tipología para la pista gemela adyacente.

El viaducto de Levane (1962-1963) (Fig. 18) presenta una propuesta original: un arco de 136.00 m de luz, cuya forma reproduce el antifunicular de las cargas, acoge los pilares y, por tanto, los tableros en hormigón pretensado de 36 m de luz. En este caso, las dos pistas se alojan en una única estructura. El tablero alcanza aquí una anchura de 24 m. En ambos casos los arcos se hormigonaron sobre cimbras metáli-

cas realizadas con tubos ensamblados mediante uniones tipo *Innocenti* (una invención enteramente italiana).

Posteriormente, la empresa Rizzani S.p.A. vuelve a llamar a Zorzi para otro desafío. En Pinzano, la Administración Provincial de Udine había decidido atravesar el río Tagliamento (Fig. 19) para sustituir un anterior puente pionero con tres arcos de hormigón armado, inaugurado en 1906 y destruido por una riada en 1966. Allí Zorzi proyecta un puente de luz única (1968-1969), de 163 metros: se trata de un pórtico de tres articulaciones, en hormigón armado pretensado, construido en voladizo desde las orillas, tras inmovilizar provisionalmente las articulaciones con profundos anclajes fijados en la roca: dovela tras dovela, las dos ménsulas llegan a encontrarse en la clave sin deformarse, gracias al efecto de la precompresión



Figura 19 - Puente de Pinzano (1968-1969) (Reproducida de [37]).

provisional. El canto en la clave del tablero es de 2.50 m y en los arranques de 7.00 m. La proporción es perfecta; como corresponde a la historia del lugar, escenario de una épica batalla durante la Primera Guerra Mundial, el puente resulta monumental: la luz gigantesca y la gran altura sobre el agua lo aíslan de la escala humana, pero al mismo tiempo aparece como una huella sutil, casi mágica, en el paisaje encantado de aguas cristalinas, fondo rosado y verde dolomítico.

11. LA CRISIS Y EL EPÍLOGO DE LA FASE PIONERA

Luego llega la crisis energética de 1973. El estallido de la guerra del Yom Kippur y el embargo petrolero decretado por la OPEP provocan un brusco aumento de los precios y ponen fin al ciclo de crecimiento que había acompañado a Occidente en los años cincuenta y sesenta. La industria, obligada por primera vez a enfrentarse al ahorro energético, reduce sus ambiciones y la contratación pública sus inversiones.

También la ingeniería italiana entra en una crisis irreversible. A mediados de los años setenta se hace cada vez más difícil ganar licitaciones proponiendo soluciones innovadoras. Los comitentes, atentos únicamente a la contención de costes, reducen las grandes luces, abandonan pórticos y arcos, y hacen desaparecer las imponentes cimbras. Se impone un nuevo modelo de viaducto, ya difundido en Europa: filas de pilares delgados y próximos que sostienen vigas rectilíneas suspendidas en el cielo.

Zorzi, al principio reticente, trata no obstante de adaptarse: racionaliza la obra, la industrializa, pero sin renunciar al hormigonado in situ. Así logra dejar igualmente obras maestras, aun en una época en que la epopeya artesanal de los grandes viaductos en hormigón pretensado estaba a punto de concluir. La tecnología del pretensado ya se había afianzado, pero ahora como producto en serie: el espacio para los proyectistas de autor se reducía cada vez más, y el testigo pasaba a otros, con filosofías diferentes. Pero, eso ya es otro capítulo.

12. DOS ALMAS FRENTE A FRENTE

Aunque ambos fueron protagonistas de la afirmación del hormigón armado pretensado en Italia, Morandi y Zorzi no fueron coetáneos: casi veinte años los separaban, y eran hijos de épocas distintas.

Morandi es el artesano puro, que concibe cada puente como una obra única, irrepetible, casi una escultura en equilibrio entre técnica y arte. Zorzi, por el contrario, se convierte en el proyectista industrial: sobre todo en la segunda parte de su carrera, trabaja con un método y un rigor próximos a los del diseñador, produciendo obras repetibles, pero siempre originales y nunca banales.

Morandi adapta el artefacto a la medida del territorio; Zorzi perfecciona un producto industrial, replicable varias veces, pero cuidado con una atención maniática a la calidad. Dos trayectorias distintas que, juntas, marcaron un capítulo irrepetible de la ingeniería italiana, parte integrante de aquel "Made in Italy" capaz de conjugar invención, forma y técnica.

13. CONCLUSIONES

Narrar la historia es siempre una empresa ardua. Ya se trate del arte, de la política o de la cultura, toda narración corre el riesgo de ofrecer una visión parcial, marcada por la perspectiva y la sensibilidad de quien escribe. Con mayor razón, cuando la historia se refiere a las técnicas constructivas, el relato se vuelve complejo: un territorio sembrado de intuiciones, de inventos y de propuestas que se multiplican como sendas divergentes en un bosque.

Quien escribe es consciente de que no puede restituir una verdad absoluta, sino tan solo una trama subjetiva, atravesada también por la pasión y la admiración hacia aquellos que se atrevieron a explorar lo desconocido. Fue precisamente en los primeros años de la aventura del hormigón pretensado en Italia donde tomó forma esa red de hombres e ideas. Ingenieros

y proyectistas que, con valentía, depositaron sobre la mesa no solo su saber técnico, sino también su alma y su entusiasmo. Eran tiempos de experimentación, de audacia y de temores: como en todo viaje hacia lo inédito, no todos lograron avanzar, pero los más arriesgados quedaron en la memoria, esculpidos en la historia como faros que iluminan la ruta.

Así, casi inevitablemente, todo relato técnico acaba convirtiéndose en un relato humano, tejido con nombres, rostros y desafíos. Porque son siempre las figuras de quienes osan las que mantienen viva la memoria de una tecnología.

Hoy, tras décadas de experiencia, el pretensado es ya un conocimiento consolidado. Sin embargo, su historia no se cierra: la búsqueda de nuevas soluciones continúa, y la frontera de la innovación sigue abierta. En Italia, como en el resto del mundo, la construcción permanece como un espacio de desafío, donde la tradición dialoga con el futuro y cada puente, cada estructura, lleva consigo el eco de aquel primer y valiente paso hacia lo desconocido.

Referencias

- [1] M. Sanabra-Loewe, J. Capellà-Llovera, The four ages of early prestressed concrete structures, *PCI Journal* 59 (2014) 93–121. <https://doi.org/10.15554/pcij.09012014.93.121>.
- [2] S. Whipple, Bridge. US Patent 2064, issued April 24, 1841, 1841.
- [3] Association Eugène Freyssinet, Eugène Freyssinet : a revolution in the art of construction, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 2004.
- [4] F. Chaudy, Sur le Calcul des Plaques Élastiques Minces et le Rôle de Tirants Dans les Poutres en Ciment Armées, Mémoires et Compte Rendus Des Travaux de La Société de Ingénieurs Civils de France - Paris 2ème Semestre (1894) 545–550.
- [5] D.P. Billington, Historical Perspective on Prestressed Concrete, *PCI Journal* (2004). <https://doi.org/10.15554/pcij49.1-07>.
- [6] P. Jartoux, The Work of Eugène Freyssinet: The Most Significant Bridges of his Career, *Docomomo Journal* (2011) 30–41. <https://doi.org/10.52200/45.A.VFKHFTLE>.
- [7] D. Fernández-Ordóñez Hernández, Eugène Freyssinet. I was born a builder, in: Proceedings of 28th Dresden Bridge Construction Symposium – Design, Construction, Maintenance and Upgrading of Bridges - 12/13 March, Dresden, 2018.
- [8] <https://heritage.ecoledesponts.fr/enpc/fr/content/trouver-un-ingenieur-des-ponts-la-liste-des-ingenieurs-freyssinet-eugene>, (n.d.).
- [9] F.R. McMillan, Shrinkage and Time Effects in Reinforced Concrete, Minneapolis, MN: University of Minnesota, 1915.
- [10] <https://www.ce.jhu.edu/perspectives/protected/ids/Index.php?location=Plougastel%20Bridge>, (n.d.).
- [11] E. Freyssinet, Études sur les Déformations Lentes des Ciments ou Retraits, in: Premier Congrès International Du Béton et Du Béton Armé , La Technique des Travaux, Liège, Belgium, 1930: pp. 520–532.
- [12] E. Freyssinet, Relations Entre les déformations et la Constitution des Ciments et des Matériaux de Structure Colloïdale (Résultats de Recherche Faites par Eugène Freyssinet entre 1926 et 1929), Travaux 376 (Numéro Spécial – Un Demi-Siècle de Technique Française de La Précontrainte Tome II (1966) 921–936.
- [13] T. Iori, Prime sperimentazioni sul Cemento Armato Precompresso in Italia, in: Curare Il Moderno, I Modi Della Tecnologia, a cura di P. G. Bardelli, E. Filippi, Emilia Garda, 2002.
- [14] E. Freyssinet, J. Seailles, Procédé de fabrication de pièces en béton armé. French Patent 680547, filed October 2, 1928, and issued May 1, 1930, 1928.
- [15] J.A. Fernández Ordóñez, Eugène Freyssinet, Éd. du Linteau, 2012.
- [16] G. Colonnetti, Teoria e calcolo delle travi con armature preventivamente tese, Pontificia Accademia Scientiarum - Acta IV (1939).
- [17] T. Iori, Prestressed Concrete: First Developments in Italy , in: Proceedings of the First International Congress on Construction History, Madrid, Spain: Reverte, 2003: pp. 1167–1176.
- [18] G. Colonnetti, Calcolare meglio, *Il Cemento Armato* 4 (1938) 61.
- [19] <https://atlas.landscapefor.eu/category/parco-urbano/poi/15901-parco-colonnetti/13327-gustavo-colonnetti/>, (n.d.).
- [20] G. Colonnetti, Problemi nuovi e nuovi orientamenti, *Il Cemento Armato* 2 (1939) 22.
- [21] A. Marioni, L'invenzione delle strutture parzialmente precomprese: Un contributo tutto italiano all'evoluzione della precompressione , in: Giornate AICAP '99 - Torino, 4-6 Novembre, 1999.
- [22] F. Levi, Calcolo delle strutture composte di elementi in stato di coazione e di calcestruzzo allo stato naturale non deformato, Pontificia Accademia Delle Scienze, Acta (1943).
- [23] F. Levi, Le Béton armé précontraint, Bulletin Du Centre d'Etudes Du Bâtiment, Losanna (1944).
- [24] F. Levi, Esperienze su travi parzialmente precomprese , Rivista "Il Cemento" (1945).
- [25] C. Cestelli Guidi, Il conglomerato precompresso – Teoria, esperienze ed applicazioni , 1947.
- [26] F. Levi, G. Pizzetti, Fluage, Plasticità, Precontrainte, 1951.
- [27] G. Rinaldi, Il Cemento Armato Precompresso e sua codificazione, 1962.
- [28] <https://murimuseodiffuso.it/it/viadotto-sul-fiume-piave-0>, (n.d.).
- [29] A.N.I.C.A.P., Associazione Nazionale Italiana del Cemento Armato Precompresso. Giornate del Cemento Armato Precompresso del 1954. Edizioni del giornale del Genio Civile. , 1956.
- [30] R. Morandi, Strutture di calcestruzzo armato e di calcestruzzo precompresso , Libreria Dedalo Editrice – Roma, 1954.
- [31] Proverbio Edoardo, Recupero Antonino, Quality and durability of bridges in Italy, in: Proceeding of Construction Expert Workshop: XVI Scientific and Technical Conference., Kielce - Cedzyna, 2020: pp. 177–195.
- [32] G. Boaga, Riccardo Morandi – Serie di Architettura, Zanichelli Editore Bologna, 1984.
- [33] <https://i.pinimg.com/736x/e7/04/5d/e7045df96273896661348595ce309cc1--ponti-the-bridge.jpg> , (n.d.).
- [34] T. Iori, G. Capurso, Silvano Zorzi, designer strutturale, *Archi* 5 (2019).
- [35] <https://inco-eng.com/wp-content/uploads/2021/03/Libro-ROSSO-storico.pdf>, (n.d.).
- [36] https://www.webuildgroup.com/_next/image?url=https%3A%2F%2Fadmin.webuildgroup.com%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2F2025-01%2FAutostrada_del_Sole_A1-Italia-Webuild_WBL414516.jpg&w=1920&q=75, (n.d.).
- [37] <https://andarpervalli.it/wp-content/uploads/2021/02/3-ponte-pinza-no1-scaled.jpg> , (n.d.).