POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

EL PRETENSADO

**LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA
ARQUITECTURA DEL SXX**

Tesis doctoral

María Paz Llorente Zurdo

Arquitecta

Director:

Jesús Anaya Díaz

Doctor Arquitecto

Madrid

2016

POLITÉCNICA

Tribunal nombrado por el Magfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día de de 2016.

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Suplente:

Suplente:

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día de de 2016, en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.

Calificación:..... •

El PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

Índice

1. Resumen	13
2. Abstract	14
3. Introducción	15
4. Hipótesis	38
5. Objetivos	40
6. Estado del Arte	41
6.1 Estructura, Forma, Geometría y Tipologías	43
6.1.1 Estructura	44
6.1.2 Forma 46	
6.1.3 Geometría	47
6.1.4 Tipología	48
6.2 En busca de las condiciones para adaptar el material a la forma. Freyssinet	53
6.2.1 Reconocimiento de las posibilidades del hormigón armado	55
6.2.2 El salto a las grandes luces. Primeros estudios sobre un modelo a escala real. Boutirón. Châtel-de-Neuvre. Le Veurdre	59
6.2.3 Ensayo sobre modelo a escala. Pretensado del arco de prueba. 1907- 1908 63	
6.2.4 Perfeccionamiento de los medios auxiliares en grandes obras. Limousin 1914-1930	71
6.2.5 El puente de Villeneuve-sur-Lot	73
6.2.6 Hangar en Villacoublay	77
6.2.7 Puente Candelier	77

6.2.8	El puente de Saint-Pierre du Vauvray	79
6.2.9	Los hangares de Orly	83
6.2.10	El puente de Plougastel	87
6.2.11	La cimbra de Plougastel	91
6.2.12	El andarivel de Plougastel	97
6.2.13	Otras técnicas del puente de Plougastel	97
6.2.14	La aplicación de la técnica del hormigón pretensado. Patente de Freyssinet	99
6.2.15	Primera aplicación industrial del pretensado. Fabricación de postes eléctricos	107
6.2.16	La salvación de la tecnología del hormigón pretensado. Le Havre	109
6.2.17	Desarrollo y Madurez del Hormigón Pretensado. Edme Campenon	117
6.2.18	Puentes de Freyssinet durante la ocupación alemana	118
6.2.19	El puente de Djedeïda en Túnez precedente del puente de Oeldel	121
6.2.20	La presa y el puente de Oued Fodda. Algeria	123
6.2.21	La construcción por segmentos. El puente de Luzancy	123
6.2.22	Una teoría general del fraguado de conglomerantes hidráulicos y fenómenos de retracción y deformación lenta de morteros y hormigones de E. Freyssinet.	137
6.2.23	Difusión del hormigón pretensado	145
6.2.24	Inventos y Descubrimientos de Freyssinet	149
6.2.25	Deformaciones lentas del hormigón	150
6.2.26	Comportamiento del hormigón a cortante	151
6.2.27	Vibrado del hormigón.	151
6.2.28	Articulaciones Freyssinet	153
6.2.29	Traille	153
6.2.30	Descimbramiento por gatos	155
6.2.31	Cimbras de madera. Introducción del clavo en la construcción.	158
6.2.32	Cimbras deslizantes	161
6.2.33	Gato plano	161
6.2.34	Bóvedas laminares	162
6.2.35	Alas de avión	163
6.2.36	Barcos de hormigón	167

6.3	Antecedentes a la patente de Freyssinet	169
-----	---	-----

6.3.1	Aplicación histórica del pretensado	175
6.3.2	Entramados americanos	177
6.3.3	Entramados Europeos	183
6.3.4	Pretensado aplicado al hormigón en los Estados Unidos . . .	185
6.3.5	Pretensado aplicado al hormigón en Europa	187
6.3.6	Últimos antecedentes al pretensado en el hormigón	205
6.4	El hormigón y las formas laminares.	213
6.5	La aplicación del pretensado en otros materiales y con otros materiales.	241
6.5.1	Eduardo Torroja y El pretensado	244
6.5.2	Acero pretensado	253
7.	Materialización del concepto de pretensado	259
7.1	Sobre la significación del Pretensado en el hecho constructivo.	259
7.1.1	Proceso de asimilación de las nuevas tecnologías	263
7.1.2	Comportamiento viscoso de los materiales	276
7.1.3	La forma de un material sin forma, el hormigón	277
7.1.4	Sobre el término de hormigón pretensado	278
7.2	Diversificación de la tecnología según los distintos sistemas y patentes.	281
7.2.1	Sistemas de pretensado con armadura postesa y con adherencia al hormigón, según su anclaje.	285
7.2.1.1	Anclajes de cuña o pinza	285
	El sistema Freyssinet	285
	Sistema Guyon 286	
	Sistema Coyne 287	
	Sistema Magnel-Blaton	288
	Procedimiento Franki-Smet	288
	Procedimiento de tesado Polensky & Zoellner	289
	Procedimiento de tesado Philipp Holzmann AG	289
	Procedimiento de la Huettenwerk Rheinhausen AG	289

Procedimiento de tesado de la Held & Francke AG	290
Procedimiento de tesado de la casa Hochtief AG	290
Armadura de la casa Gruen & Bilfinger AG	290
Procedimiento de tesado Sager & Woerner GmbH	291
Sistema Forssell	291
Sistema de Riccardo Morandi	292
Sistema Rinaldi	293
Sistema VSL Vorspann Losinger	293
Sistema Barredo	295
7.2.1.2 Anclajes de remaches	295
Sistema BBRV	295
Sistema Strescon	295
7.2.1.3 Anclajes roscados con utilización de tuercas y placas	296
Sistema Roebling	296
Sistema Dywidag	296
Sistema Lee-McCall o MacAlloy	298
7.2.1.4 Anclajes en el propio hormigón por formación de lazos en las armaduras	298
Sistema Baur-Leonhardt	298
Procedimiento de tesado Kani-Horvat	299
Sistema Korowkin	299
7.2.2 Sistemas de hormigón pretensado con armadura pretesa y adherencia	300
Sistema Freyssinet	300
Sistema Wettstein	301
Sistema Gloeser	301
Sistema Schaefer	302
Sistema Remy	302
Sistema Hoyer	302
7.2.3 Sistemas especiales	303
7.2.3.1 Pretensado por peso propio	303
7.2.3.2 Sistema mixtos	304
7.2.3.3 Devanado de la armadura	306
7.2.3.4 Sistema Baur-Leonhardt	306
7.2.3.5 Gatos Planos	306
7.2.3.6 Tesado por medio de calor	307

7.2.3.7	Pretensado del hormigón mediante cemento expansivo . . .	307
7.2.4	Análisis comparativo de los distintos sistemas	309
7.3	El Pretensado en Europa antes de la II Guerra Mundial	315
7.3.1	Estudios sobre el hormigón y normativas previas	316
7.3.2	Primer Congreso Internacional del Hormigón Armado en Lieja, 1930	319
7.3.3	Franz Dischinger (1887-1953) y el Puente de Adolf Hitler en Aue	322
7.3.4	La apertura de las posibilidades del Pretensado. Ulrich Finsterwalder (1897-1988)	327
7.3.5	El puente Oelde y la empresa Wayss & Freytag	335
7.3.6	La concepción británica del pretensado. Karl Mautner (1881-1949), Paul Abeles y los desarrollos en Gran Bretaña	337
7.3.7	Los puentes empujados y cubiertas colgadas. Fritz Leonhardt (1909- 1999) 342	
7.3.8	El pretensado de cuerdas de piano. Ewald Hoyer	343
7.3.9	La difusión del pretensado a los países anglosajones. Gustave Magnel (1889-1955)	346
7.3.10	Vigas alemanas de hormigón prefabricadas y pretensadas . . .	351
7.4	El desarrollo del Hormigón Pretensado en Europa tras la II Guerra Mundial	356
7.4.1	Desarrollos de la ingeniería francesa	358
7.4.2	La Reconstrucción de las infraestructuras alemanas	359
7.4.3	La potencia formal de la ingeniería italiana. Ricardo Morandi	363
7.4.4	Desarrollos del pretensado en Inglaterra. El pretensado aplicado al acero Samuelly	365
7.4.5	Talento y carencia de medios en el pretensado en España . .	373
7.4.5.1	La sobriedad esencial de Carlos Fernández Casado . . .	377
7.4.5.2	Investigación sobre las posibilidades espaciales con la aplicación del pretensado. Miguel Fisac	385
7.4.5.3	Primeros 26 números de la Revista Hormigón y Acero . .	393
7.4.6	Los depósitos circulares como modelo de prueba de la tecnología del pretensado	399
7.4.7	Construcción por elementos prefabricados postesados para láminas	

de vanguardia. El Philips Pavillion	407
7.4.8 Asociaciones internacionales para la difusión del pretensado	414
7.5 El pretensado en las estructuras suspendidas.	417
7.6 Desarrollo de la tecnología y la industria del pretensado en los Estados Unidos de América.	434
7.6.1 Los cables de pretensado de la empresa Roebling. Charles C. Sunderland.	434
7.6.2 La primera estructura en hormigón pretensado en los Estados Unidos. el Puente de Walnut Lane	441
7.6.3 Promoción del Pretensado en los Estados Unidos. La prueba de carga a rotura de una viga a escala real del puente de Walnut Lane.	447
7.6.4 La ejecución de las obras del Puente Walnut Lane tras la prueba de carga	449
7.6.5 La creación de una industria de soporte para el pretensado en los Estados Unidos. Obra civil y Prefabricación.	461
7.6.6 Buscando la simplificación en obra. Los Puentes de bloques en Tennessee con pretensado exterior no adherente	462
7.6.7 Producción de elementos pretensados para la red de carreteras norteamericana.	463
7.6.8 Introducción de los elementos pretensados prefabricados en la edificación. Tacoma, Washington.	468
7.6.9 La innovación de los materiales y los procesos de prefabricación y pretensado en el crecimiento de Florida	477
7.6.10 Desarrollo de la tecnología del pretensado en la Arquitectura de los Estados Unidos de América	487
7.7 La nueva concepción sobre el significado del Pretensado “El pilar invisible”. TY LIN (1912- 2003)	517
7.8 El pretensado al servicio de la concepción elegante de los espacios. Skidmore, Owings & Merrill. Myron Goldsmith (1918-1986)	541
7.9 La experimentación del pretensado en los hangares .	551

7.10	Sobre la publicidad de las empresas de elementos de pretensado en las revistas especializadas en los Estados Unidos de América	555
	La empresa Roebling	555
	Empresa Ryerson	563
	ARMCO American Rolling Mill Company	575
	Compañía Prescon	577
	Publicidad de otras empresas	579
	Prestressed Concrete Institute	583
7.11	Louis I. Kahn y August Komendant	591
	Los laboratorios médicos Richards 1957-1965	593
	Propuesta de City Tower	597
	El museo Kimbell. L.I. Kahn	599
	Los laboratorios Salk de Investigaciones biológicas	607
	La Fábrica Olivetti-Underwood en Harrisburg, Pensilvania (1967-1970)	609
8.	Conclusiones	611
8.1	Control de las fuerzas y gravedad	611
8.2	La forma se libera de condicionantes estructurales	613
8.3	La significación del proceso constructivo	615
8.4	El material diseñado frente al elegido.	617
9.	Prospectiva	620
10.	Bibliografía	623

Palabras Clave.

Pretensado, Forma, Estructura, Geometría, Tipologías

1. Resumen

La traslación de la tecnología del pretensado desde la ingeniería civil al campo de la arquitectura da lugar a una nueva reinterpretación de las tipologías estructurales utilizadas con anterioridad, tales como los arcos, bóvedas, grandes vigas, etc. El comportamiento resistente de estos elementos estructurales se podrá desligar de su geometría, mediante la interposición de sistemas de fuerzas, escogidos por el proyectista, que se superpongan a los determinados la gravedad, de forma que el proyectista tendrá el control sobre la geometría propuesta y por tanto sobre la forma final.

Estas nuevas configuraciones finales, conseguidas mediante la técnica del pretensado en el ámbito arquitectónico, tendrán a su vez un carácter formal también nuevo. Posibilitarán la construcción a grandes escalas, así como la reinterpretación de los materiales y las formas de la construcción empleadas hasta ese momento.

La libertad de diseño y de escala pasa a ser entonces mucho más amplia y rica. Con el empleo de esta tecnología constructiva se puede conseguir un control estructural de tal impacto que, en relación a las tipologías estructurales tradicionales, de lugar a que la geometría de éstas no responda, con carácter necesario, a su trabajo resistente, de tal manera que se genere un nuevo conjunto de soluciones estructurales, constructivas y arquitectónicas, dando lugar con ello a la transformación o disolución de las tipologías estructurales de la tradición arquitectónica del SXX.

2. Abstract

The transfer of the technology of the prestressed concrete from civil engineering to architecture has produced a new interpretation of the constructive-structural typologies traditionally used, such as arches, vaults, large beams, etc. As a result of the application of this technology the resistant behavior of such structural elements may be set loose from their constructive requirements as they were understood in the past. The designer will choose a system of forces, combined with gravity, so it will be possible to control the geometry proposed and therefore the final form of the construction.

These new configurations, achieved thanks to the prestressing technique applied in the architectural field, will also have a new formal definition, because they are detached from their structural requirements. They will enable construction on large scales as well as the reinterpretation of materials, structures and construction forms used so far. Thereby freedom in design and scale will be broader and richer.

The geometry of the structural forms, released from traditional construction types, can be controlled by this technology. So the traditional link with a priori types is broken and a new set of structural, constructive and architectural solutions appears. That is why, technology of prestressing gives the possibility of transformation, or even dissolution, of constructive typologies of the architectural tradition in the twentieth century.

3. Introducción

Estructura, Forma y Geometría son conceptos que históricamente han estado profundamente imbricados. Han dado lugar a una serie de Tipologías constructivas y estructurales que han ido evolucionando a lo largo de la historia de la construcción, de forma mucho más acelerada en el transcurso del siglo pasado.

La introducción del pretensado en las estructuras hace posible modificar los sistemas de fuerzas existentes derivando las cargas hasta crear el sistema de fuerzas más apropiado según la configuración geométrica. De esta manera la clasificación histórica de los tipos constructivos estructurales perdería su sentido original creando unos límites difusos entre diversas tipologías. Esta transformación resultante puede considerarse la disolución de las tipologías constructivas tradicionales.

Hay estructuras cuya resistencia deriva de su forma, como las cáscaras y las láminas. Estas estructuras resisten las cargas trasladándolas a través de su superficie y evitando con ello la flexión. Gracias a ello, pueden tener pequeños espesores. Con un diseño adecuado, la lámina o cáscara puede evitar la disposición de vigas de borde, que son las que evitan la flexión y llevan los esfuerzos de corte a los pilares.

La estructura de las láminas está, por tanto, íntimamente relacionada con su geometría y a su vez el espacio generado por estas estructuras también lo está. En diversas ocasiones la forma exterior se ha conseguido observando en modelos el polígono funicular utilizando pesos que colgaban de un entramado o malla, como Gaudí o Isler. Aunque a las mediciones sobre estos modelos habría de añadirse una comprensión intuitiva de su comportamiento por parte de los diseñadores, dado que el cambio de escala obligaba a considerar otras cargas además del peso propio como sobrecargas de nieve o viento. Para estas estructuras es fundamental conseguir que su forma se mantenga, pues de otra

manera se producirían flexiones y se perderían los beneficios del estado laminar.

Por el contrario, hay otras estructuras que resisten principalmente a flexión, un entramado plano funciona de esta forma, si bien sus elementos realizan esfuerzos específicos de tracción o compresión, de igual forma se comportan otras estructuras adinteladas, aunque puede haber otros elementos en estas que soporten los esfuerzos cortantes (Bradshaw et al. 2002)

Una construcción puede entender la forma desde un punto de vista abstracto, derivando de necesidades que no tuviesen que ver, al menos inicialmente, con los requerimientos estructurales. En ese caso la forma devendría en pura geometría, o geometría materializada. Para poder llevar a efecto tal forma habría de contarse con un material y/o una tecnología capaz de desarrollar o variar las "funciones estructurales" de la forma o del material, de manera que pudiesen dar respuesta a los requerimientos del proyectista.

La técnica del pretensado es capaz, hasta cierto punto, de recrear las funciones de la gravedad desviando las cargas gravitatorias a criterio del proyectista, creando una suerte de "columnas invisibles" como las denominaba T.Y Lin (Lin 1961). Gracias a ello es capaz de mantener una geometría propuesta en las estructuras que lo requieren, variando la forma de trabajo estructural de los elementos. Además, en estructuras tales como las colgadas o las laminares, en las que el mantenimiento de la forma propuesta es el que garantiza la estabilidad del conjunto, también puede conferirles la rigidez necesaria ante cargas puntuales o asimétricas. Por otra parte, para el caso de materiales como el hormigón o la fábrica, la compresión previa da lugar a que éstas trabajen de forma cohesiva mejorando el rendimiento y comportamiento de dichos materiales, aumentando su estanqueidad ante agentes exteriores, y con ello ampliando su vida útil.

Las tipologías constructivas, desarrolladas a lo largo de la historia, están íntimamente ligadas a los requerimientos estructurales a los que tienen que atender. La generación de nuevas formas de las estructuras, ha estado ligada, históricamente, a la aparición de nuevos materiales, a la mejora de los procesos de fabricación de los mismos y de las técnicas constructivas, así como a un mayor conocimiento del comportamiento de todos ellos. De todo ello, resulta una mejor adecuación a los fines propuestos, funciones y fines a desarrollar que, por otra parte, siempre son cambiantes. Siguiendo el símil con el maquinismo de Fernández Casado, las tipologías evolucionarían por el equilibrio entre la voluntad del hombre que las impulsa y la armonía universal que las limita (Fernández Casado 2005).

En los años 30 del SXX, se producen unos intensos años de producción de construcciones en la ingeniería civil, donde aparecen obras significativas de Freyssinet, Amman, Torroja, Nervi o Maillart, que introducen lo poético frente a lo estrictamente funcional. Se producen grandes innovaciones estructurales como las láminas de hormigón armado o el propio pretensado, con innovaciones en los materiales, las formas, los cálculos y los procesos.

Obras como el Frontón de Recoletos, los voladizos del hipódromo de la Zarzuela, los hangares de Orly o el puente de Luzancy alcanzan la consideración de formas-tipo estructurales siendo enteramente nuevas, sin antecedentes precisos. Constituyen además un prototipo en si mismas y en muchos de los casos no han tenido continuidad formal, aunque han servido de base para la construcción de otras obras a menor escala. (Fernández Ordóñez, Navarro Vera, and Arenas de Pablo 1997)

A partir de esos años, las variaciones tipológicas se han venido sucediendo durante todo el SXX a una gran velocidad. Las construcciones actuales son cada vez más complejas, en buena parte también debido a la disposición de los medios informáticos

que dan soporte a esa complejidad de los proyectos (Bernabeu Larena 2007). Pero también es preciso conseguir trasladar a la construcción esas nuevas formas. Para ello es preciso disponer de unas herramientas capaces de mantener las nuevas formas, fruto de los diseños proyectuales, estables. Con la técnica del pretensado es posible dar respuesta estructural a unas formas que tipológicamente no responden al esquema estructural histórico. Se puede conseguir, por ejemplo, que una bóveda funcione como una viga, como en el museo Kimbell de Kahn-Komendant.

Si las tipologías constructivas ya no responden a los patrones estructurales, en tanto que se dispone de una tecnología capaz de variar el sistema estructural para adaptarlo a una geometría dada, la clasificación de los mismos pierde su sentido original. Esto se puede observar ya incluso en el discurso de diversos ingenieros, como en el caso de Cecil Balmond, que han sustituido la clasificación de las formas por una clasificación de procesos o estrategias proyectuales en cuatro líneas generales que se pueden relacionar y superponer entre sí (Bernabeu Larena 2007). En Javier Manterola, también se percibe una tendencia a la abstracción en sus clasificaciones tipológicas (Manterola Armisen 2005).

La tesis plantea entonces, que si las tipologías constructivas ya no responden a una necesidad resistente, adquiriendo un sentido prioritariamente geométrico, su clasificación tradicional ya no tendría objeto, por lo que se puede considerar su disolución en unas concepciones más abstractas de la estructura.

Inicialmente se desarrollan los conceptos nucleares manejados en la Tesis, de Estructura, Forma, Geometría y Tipologías, así como de las relaciones entre las mismas.

Siguiendo el discurso, se hace una reseña a la obra de Freyssinet como principal creador e impulsor de la tecnología del pretensado. Anteriormente, como se reflejará en el documento,

se había intentado aplicar la técnica, pero fue Freyssinet el que consideró para su funcionamiento tensiones de los aceros muy altas, utilizando materiales específicos para soportarlas, aceros de alta resistencia y también hormigones muy mejorados tanto en su resistencia como en su puesta en obra. Fue el que consideró el comportamiento no elástico del hormigón y las pérdidas por retracción y fluencia, utilizando para las comprobaciones sus propias obras, como el puente de Plougastel, que debido a su escala podían dar lugar a comprobaciones mucho más ajustadas.

Se analizan sus principales preocupaciones en el desarrollo de la misma, desde la primordial necesidad de que las formas de las construcciones nazcan del propio material y de la libertad del proyectista, pasando por la búsqueda del conocimiento científico de los materiales para una aplicación rigurosa de los procedimientos, así como la apertura de diferentes posibilidades de la aplicación de esta tecnología.

Algunas de las obras de Freyssinet, que se analizan en el texto, son hitos indiscutibles de la ingeniería civil, tales como el puente de Villeneuve-sur-Lot, Saint-Pierre du Vauvray, los hangares de Orly, o el Puente de Plougastel. La construcción de todos ellos conlleva el desarrollo paralelo de unos potentes medios auxiliares de construcción, que en muchos casos serían específicos de cada obra y en otros han sido extrapolables. Las obras que planteaba, en muchos casos no habrían sido posibles o no habría sido factibles sin el concurso de estos medios auxiliares, desarrollados por el mismo Freyssinet, que tenía una visión más compleja y completa de las obras que incluía todos estos elementos.

Tras todo el bagaje adquirido en el conocimiento del hormigón armado con la construcción de todas esas obras reseñadas, Freyssinet deja toda esta actividad profesional para dedicarse a desarrollar la tecnología precisa para pretensar el hormigón. Se aprecian en esta etapa de la biografía de Freyssinet las

contingencias que pueden darse en la aparición de las innovaciones y que resultan clave para el desarrollo de la misma. Como un producto excepcional, los postes eléctricos Forclum, se queda fuera del mercado y resulta ruinoso, pero después y gracias a la tecnología desarrollada, la experiencia puede ponerse al servicio de su aplicación en una actuación temeraria, como en el caso de la estabilización de la estación marítima de Le Havre, consiguiendo de esta forma una atención que probablemente no habría sido posible de ninguna otra manera.

Tras el éxito de esta obra, y en asociación ahora con Edme Campenon, comienza una etapa fructífera de la aplicación del pretensado, que se verá, en cierto modo, interrumpida por la II Guerra Mundial y el desarrollo de otras patentes que podrían resultar dudosas como la de Hoyer en Alemania. Freyssinet ya había comprobado muchas de las posibilidades del hormigón pretensado, había desarrollado sus investigaciones científicas en relación con el Hormigón, su viscosidad y su comportamiento no lineal y deformaciones lentas. Además había desarrollado numerosos inventos o elementos auxiliares de la tecnología del hormigón pretensado, que ya se estaba expandiendo por los cinco continentes y se aplicaba para muy diversas edificaciones. Freyssinet prueba también las posibilidades de su aplicación en la construcción de puentes prefabricados por segmentos o dovelas, construyendo así el puente de Luzancy y posteriormente sus réplicas sobre el río Marne, en Anet, Trilbardou, Esbly, Ussy, y Changis-SaintJean.

Mediante la prefabricación el hormigón en fábrica se puede conseguir, además de considerables ahorros económicos, una mayor calidad de los productos. La prefabricación podrá aplicarse tanto a la construcción de elementos constructivos independientes, como a la construcción por partes, montadas después en obra. De esta forma un material, que tenía un carácter estereotómico inicial, adquiere la posibilidad de ser montado por elementos, lo que puede dar lugar a su lectura también como material tectónico. Ello se hará patente posteriormente en obras como los laboratorios

Richards de L. I. Kahn.

Se recogen también en el apartado dedicado a Freyssinet diversas investigaciones relativas al conocimiento del hormigón como material, tales como las deformaciones lentas o el comportamiento a cortante o el vibrado del hormigón para su puesta en obra. Se exponen diversos desarrollos relativos a medios auxiliares de la obra civil, como el descimbramiento por gatos, el gato plano, las cimbras deslizantes o la introducción del clavo. Y se enumeran otras aplicaciones del hormigón pretensado de Freyssinet, campos como el de las bóvedas laminares, las alas para aviones o los barcos de hormigón, mostrando la confianza y amplitud de las posibilidades de esta nueva tecnología.

Freyssinet insiste en sus discursos en que ha creado un nuevo material, distinto y diverso del hormigón armado. Ello es una muestra de que sus esfuerzos en las obras están encaminados hacia que el material trabaje según las directrices que le impone el proyectista. Consigue encontrar un material que se adapta a sus requerimientos, y no tanto en seleccionar una forma que haga posible unos requerimientos previos. La forma de las obras vendría a ser entonces una imposición del proyectista a la cual se pliega el material y la tecnología.

Acto seguido, se recogen las diferentes propuestas y estudios, previos a la patente de Freyssinet, para introducir el concepto del pretensado en los elementos constructivos y en las estructuras. Resulta útil conocer y reconocer en qué circunstancias y condiciones ha funcionado un sistema, haya después tenido la respuesta apropiada por parte del mercado o no, y en contrapartida, conocer cuales han sido los aspectos no resueltos de una invención. Todo ello nos aporta un mayor conocimiento sobre el propio material y los límites del sistema de aplicación.

Así, se puede reconocer que los principios del pretensado

han estado presentes a lo largo de la historia de la humanidad, si no en la construcción, sí en otras aplicaciones tales como la náutica, como se verá, desde tiempos de los egipcios, u otras más conocidas como la fabricación de barriles o el arco para tiro.

Posteriormente se ha aplicado, en algunas ocasiones con bastante éxito, en otros materiales como los entramados de madera, con un cierto desarrollo en los Estados Unidos de América, como en la viga Howe o la Pratt. En Europa tuvieron un menor recorrido probablemente debido al temor posterior al colapso de una de las vigas de Stephenson en el río Dee.

En su aplicación al hormigón también se han de señalar los avances americanos a través de las patentes de Jackson en 1886, a la cual Moell, entre otros, atribuye ser la primera patente del hormigón pretensado. Y paralelamente siguen también los avances europeos por parte de alemanes como Doebling o franceses como Chaudy, entre otros.

Los avances en este campo se estaban llevando a cabo a gran velocidad, en Europa y América por parte de diversos técnicos, lo que hace más comprensible, en el ambiente bélico de la primera mitad del SXX, el estallido de patentes sobre el pretensado tras la patente de Freyssinet.

También es necesario mostrar los desarrollos del hormigón en relación a las formas laminares. El estudio de las láminas delgadas no sólo ha ampliado el conocimiento teórico sobre las estructuras de hormigón, dando lugar a nuevos enfoques como el del cálculo plástico, por ejemplo. El funcionamiento laminar es, o se busca que sea, principalmente por forma comportándose en este caso como una membrana de tal manera que no se desarrollen en la misma esfuerzos de flexión que obligarían a aumentar las secciones. El sistema además se adaptaba muy bien al hormigón armado, un material estereotómico que puede "conformarse".

La empresa alemana Dyckerhoff y Widmann será líder dentro de este campo, realizando obras como el planetario de Jena, las cúpulas de Leipzig, soluciones que influirán a otras construcciones, incluso en los Estados Unidos, de la mano de Anton Tedesko. Buscaron la forma de analizar matemáticamente algunas de estas superficies, principalmente Dischinger y Finsterwalder, aunque también hicieron aportaciones como las del ingeniero aeronáutico Donnel norteamericano, incluyendo la posibilidad de flexión en las láminas.

En España, Eduardo Torroja construye el Frontón de Recoletos y la cubierta del Hipódromo de la Zarzuela. Más tarde, Félix Candela, en México, desarrollaría la tecnología de las láminas de hormigón simplificando los cálculos matemáticos mediante teorías plásticas, entre otros, y realizando numerosos modelos y pruebas. Son asimismo reseñables en este campo las obras del ingeniero suizo Isler, y de otros como Esquilan que realiza la obra de mayor luz cubierta con esta tecnología.

Una de las principales preocupaciones a la hora de abordar estas estructuras es que las láminas se mantengan libres de flexiones ante cargas asimétricas o puntuales y de pandeos, para los que se necesita una mayor rigidez. Para conseguir mantener la forma propuesta sin que se produzcan estos movimientos que dan lugar a flexiones o pandeos una de las posibilidades es pretensar las estructuras, comprimirlas previamente. La compresión además añade estanqueidad a la lámina y elimina, al menos en parte, las grietas.

La técnica del pretensado resulta aplicable también a otros materiales distintos del hormigón, tales como la madera, la piedra, el acero o el vidrio y además también puede aplicarse al propio hormigón mediante otros elementos que realicen la precompresión, en lugar del acero, como las fibras de carbono, el poliéster o añadiendo lastre.

La madera se ha pretensado en elementos constructivos como algunos de los entramados de finales del SXIX y principios del XX en Estados Unidos. Su acción además mejora el comportamiento estructural ante la acción sísmica.

La fábrica de ladrillo puede pretensarse consiguiendo unos extraordinarios resultados en arquitecturas como las de Eladio Dieste. En sus bóvedas autoportantes introduce estas acciones para conseguir mantener la forma propuesta minimizando los movimientos que provocarían el colapso de las láminas. Torroja también introduce el pretensado en edificios como el Depósito de Fedala para conseguir la estanqueidad del mismo.

El acero también es susceptible de ser pretensado para conseguir mejorar su rendimiento trabajando a tracción y además utilizando en este caso un acero de alta resistencia que resulta más eficaz.

La técnica del pretensado resulta ser una reflexión sobre el significado de la materia, el espacio y la gravedad en las construcciones. La arquitectura busca configurar espacios uniendo materia, principalmente mediante la acción de la gravedad.

Por otra parte, la obra construida es también un acto de comunicación que implica una interacción entre las ideas y los materiales. La materia convertida en material para construcción adquiere un carácter cultural del que carecía inicialmente, se transforma en contenedora de información (Borrego Gómez-Pallete 2012)

Introduciendo en las construcciones la tecnología del pretensado se puede recrear, a un cierto punto, la acción de la gravedad a voluntad en las direcciones que el proyectista estime conveniente para conseguir trasladar a los espacios que conforman la intención propuesta por el proyectista. De esta manera el proyectista puede hacerse consciente de las intenciones

que quiere trasladar y de cómo hacerlas viables.

Se desarrollan las diferentes etapas de aceptación y madurez de una nueva tecnología, para reconocer los posibles estadios por los que ha pasado o debiera pasar el pretensado. Igualmente se reflexiona sobre el concepto de viscosidad en los materiales de construcción que fue también trabajado por Freyssinet y que resultó una de las cuestiones determinantes para poder la aplicación de la tecnología en las obras de construcción.

Una vez liberado el hormigón armado de los sistemas y patentes su uso se puede generalizar, se realizan estudios a través de diferentes organismos públicos de varias naciones y se redactan las primeras normativas. También comienzan los proyectistas a preguntarse cuál ha de ser el lenguaje propio de este nuevo material y las características que le confiere su doble condición de ofrecer un material sólido a través de una génesis líquida, la cual deja su rastro impregnado en la superficie del material. Por otra parte, el acero, que le confiere su resistencia a tracción, queda embebido dentro del hormigón, sin visualizarse. Y también es interesante conocer la denominación que se le ha dado a la nueva tecnología en algunos de los diferentes países de nuestro entorno.

Es importante analizar los distintos sistemas de pretensado. Principalmente se distingue entre los sistemas de pretensado con armadura pretesada y los sistemas de pretensado con armadura postesada. Dentro de los últimos, pretensado con armadura postesada se analizan las formas de realizar el anclaje de la armadura: cuña o pinza, remaches, roscados, formación de lazos en las armaduras. También se recogen otros sistemas más especiales o específicos de introducir la compresión en el hormigón, como puede ser el tesado por calor o los cementos expansivos, por ejemplo.

El análisis de los diferentes sistemas resulta útil para comprender que aportaciones sustanciales a la construcción final

pueden ofrecer, bien sean estas de tipo económico, de facilidad de aplicación, de adaptación a la industria local, etc.

Posteriormente se desarrollan las diferentes aportaciones de diferentes técnicos europeos, tanto en lo relativo a las obras construidas con hormigón pretensado, donde se pueden apreciar diferentes enfoques de entender la tecnología del pretensado, como en lo que se refiere al corpus teórico sobre el material.

El desarrollo inicial de esta tecnología está muy vinculado al periodo de entreguerras, donde se producen intereses contrapuestos. Por un lado hay un afán por la internacionalización, con Congresos Internacionales como el de Lieja de 1930 y la creación de diversas asociaciones internacionales como, en 1943, ya muy cerca de la emergencia de la II Guerra Mundial, la creación de la Societe Technique pour l'Utilisation de la Precontrainte (STUP). Por otro lado, ante la escasez del acero para su utilización como material de guerra, se considera esta tecnología como información reservada y se busca ocultar su desarrollo.

Se presentan también las empresas líderes alemanas del hormigón armado y pretensado, Wayss & Freytag que había adquirido inicialmente los derechos del sistema francés de Monier y más tarde adquirirá los de Freyssinet. En esta empresa trabajara Mautner que derivará hacia Reino Unido los conocimientos de sobre el hormigón pretensado cuando tuvo que ser rescatado. También hizo grandes aportaciones la empresa Dyckerhoff & Widmann donde trabajarán, que estarán a la cabeza de los desarrollo teóricos del hormigón en los sistemas laminares, como se ha determinado anteriormente, con técnicos, entre otros, como Dischinger y Finsterwalder.

Dischinger realizará el primer puente con pretensado exterior no adherente con una patente propia, el puente de Adolf Hitler sobre el río Mulde en Aue. Con muy poca diferencia de tiempo se realiza también el primer puente europeo con la

patente de Freyssinet, el puente de Oelde, con la empresa Ways & Freytag, modelo anteriormente probado en el puente peatonal de Wadi Fodda.

Son notables las aportaciones de Finsterwalder que también trabajó con la empresa Dyckerhoff & Widmann, junto a Dischinger en algunos trabajos. Patentó el pretensado con barras, el sistema Dywidag y realizó notables avances entorno al concepto de la banda tesa. También realizó la cubierta del Gran Mercado de Frankfurt, en 1926 con láminas de hormigón de tan sólo 7 cm de espesor, utilizando el sistema Zeiss-Dywidag. Universalizó el sistema de construcción por voladizos sucesivos mediante dovelas, sistema con el cual reconstruyó tras la guerra muchos de los puentes destruidos en Alemania. Entre sus obras son destacables, entre otros, el puente de los Nibelungos sobre el Rin y el puente sobre el valle de Mangfall.

Otra de las personalidades del hormigón pretensado en Europa es Fritz Leonhardt que construyó el primer puente empujado. Posteriormente desarrollaría una abundante obra que incluye la construcción de cubiertas pesadas colgadas pretensadas y diversos textos dedicados al hormigón pretensado.

También cabe hacer una reseña del promotor del sistema de pretensado denominado "de cuerdas de piano" de Ewald Hoyer. Éste se opuso a la patente de Freyssinet en Alemania y durante la guerra el sistema se desarrolló ampliamente, incluso en Francia durante la ocupación. De hecho el sistema se siguió utilizando después de la guerra, si bien Freyssinet había ganado la autoría de la misma. Esta patente no permite la realización de grandes luces, dado que está limitada por la dimensión de los hilos de acero, pero tiene como contrapartida una gran simplicidad al no requerir dispositivos de anclaje, por lo que podía desarrollarse para el pretensado prefabricado de pequeñas luces con mucha facilidad. De hecho, los constructores americanos, años más tarde volverán su atención sobre el sistema adaptándolo a sus requerimientos.

Otra de las figuras claves tanto de la tecnología del pretensado como de su difusión en Norteamérica fue el belga Gustave Magnel. Fue profesor en la Universidad de Gante donde fundó y dirigió un laboratorio de materiales que adquirió un reconocido prestigio. Dominaba, entre otros idiomas, el inglés por lo que pudo trasladar sus conocimientos a los países anglosajones. En 1948 Magnel publica uno de los primeros libros sobre el hormigón pretensado (beton pre-contrainte) que se publicará ese mismo año en una edición en inglés. También será el que proyecte y construya el primer puente pretensado de los Estados Unidos, el puente del Walnut Lane.

Uno de los aspectos importantes del pretensado es la posibilidad de realizar elementos prefabricados para su posterior puesta en obra, ahorrando acero. Por tanto, la prefabricación sería uno de los puntos fundamentales del desarrollo de esta tecnología, en especial en el periodo bélico. Se realizaron todo tipo de vigas, fundamentalmente para realizar cubiertas en los bunkers y algunos puentes. Se utilizaron para ello principalmente tanto los sistemas Hoyer como el sistema Freyssinet, de la mano de la empresa Wayss & Freytag.

Tras la II Guerra Mundial las infraestructuras europeas habían quedado asoladas, por lo que se imponía un programa de recuperación. En los Estados Unidos se habían experimentado nuevas tipologías edificatorias prácticamente desconocidas en Europa como los rascacielos y las grandes luces. Con el inicio de la Guerra Fría desarrollará un programa de edificaciones de tipo militar tales como aeropuertos, hangares, edificaciones industriales, etc., que propiciará el desarrollo del hormigón pretensado, teniendo además en cuenta la escasez de acero para la construcción por su derivación a estos usos.

La empresa de Campenon continuó el desarrollo del hormigón pretensado introduciendo la tecnología del pretensado por voladizos sucesivos con dovelas prefabricadas realizando puentes como el

viaducto a la isla de Oléron, de 1966, con una longitud total de unos 2.900 m y vanos principales de unos 80 m.

En Alemania emprendieron la recuperación de las infraestructuras en varias fases, inicialmente los puentes dentro de ciudades y luego se facilitó el tráfico terrestre por ferrocarril. Posteriormente, en 1949, se llevó a cabo la recuperación de las carreteras.

La ingeniería italiana también adquiere una gran relevancia con ingenieros como Nervi o Morandi. Resulta también interesante la transferencia de conocimiento que se produce por la emigración a los Estados Unidos como en el caso M. Salvadori. En la utilización del pretensado es Morandi uno de los principales impulsores realizando obras como el Pabellón de Turín para el Salón del automóvil o el puente de la Polcevera.

En Inglaterra destacan Felix Samuely que construirá uno de las primeras escultura tensigráficas, el Skylon, pretendiendo el acero y Ove Arup con diversas obras pretendidas de las que destacará la Ópera de Sidney.

Uno de los tipos de edificios que recibió con éxito el pretensado fueron los tanques circulares realizando un pretensado helicoidal. Bien fuera porque se trataba de edificaciones industriales donde la experimentación puede tener una mayor aplicación o bien porque la impermeabilización era uno de los requerimientos esenciales en los mismos, el resultado es que se difundieron con rapidez. Fue uno de los pocos sistemas de pretensado que se implantó velozmente en los Estados Unidos a través, fundamentalmente, de la empresa PreLoad Corp., que posteriormente será la introductora del Profeso Magnel para la construcción del Walnut Lane.

Las estructuras suspendidas pueden conformar un caso aparte en las estructuras pretendidas, en tanto que, de forma similar

a las láminas, el pretensado no tiene como función primordial desviar las cargas, sino conferir rigidez y evitar el movimiento de las estructuras para que puedan seguir funcionando evitando el flameo y la flexión.

En esta etapa aparecen diversos edificios que acuden a esta solución creando unas imágenes innovadoras sin referente anterior. Este es el caso del Dorton Arena de Raleigh de Nowicki y Severud. Severud llevará a cabo el apoyo técnica a un gran número de este tipo de construcciones, participará también en la construcción del Congress Hall de Berlín, junto al arquitecto Stubbins, con la cubierta apoyada en dos únicos puntos. En este edificio presenta además la particularidad de que en 1980 sufrió un colapso por lo que fue sometido posteriormente a estudio para determinar las causas del mismo con informes del ingeniero Schlaich, entre otros. También participará Severud en la construcción de la pista de Hockey David S. Ingalls para la Universidad de Yale, con el arquitecto Saarinen, en la cual el reto tecnológico aporta también una gran expresividad espacial.

Se muestran también otras soluciones únicas de este sistema como la cubierta del Cilindro de Montevideo, de Mondino y Viera, realizado junto con la compañía Preload Co. El pretensado de la cubierta se consigue en este caso por medio de aportar lastre a la misma y después retirarlo. Esta solución fue reproducida posteriormente en la Universidad de Columbia, NY, por Mario Salvadori.

También es destacable la solución del tipo "rueda de bicicleta", con dos familias de cables. Esta solución sería la que se emplearía en el Auditorio Municipal de Útica, el pabellón americano de la Feria de Bruselas, el Oakland Arena, o Madison Square Garden.

En Europa se utiliza el pretensado para la realización de hitos arquitectónicos como el Philips Pavilion de Le Corbusier

y Xenakis, con un resultado formal innovador que combinaba la prefabricación de las láminas y su montaje con el pretensado localizado, además decididamente hacia el exterior.

Se analiza el desarrollo de la tecnología del pretensado en los Estados Unidos de América. Este desarrollo está muy vinculado al de la tecnología de los cables emprendido por la empresa Roebling, que se dedicaba inicialmente a la fabricación y suministro de cables de acero para puentes suspendidos. Será el ingeniero Sunderland, alentado por L. Coff, quien prevea el posible mercado de los aceros para tesar el hormigón.

Sunderland investigó tanto en los cables para funcionamiento adherente como no adherente, en cuyo caso utilizaba acero galvanizado. Con estos cables realizó puentes como el del río Paz entre Guatemala y El Salvador de 1949, o el del río Cañas, en Cuba, entre otros.

El desarrollo del cable de 7 hilos libre de tensiones será una de las claves del correcto funcionamiento de las estructuras de hormigón con armadura postesada. Estos cables fueron utilizados por primera vez en el puente de Walnut Lane.

El puente de Walnut Lane se construyó entre 1949 y 1950. Constaba de tres vanos con dos apoyos y una luz total de 94 m realizado con vigas simplemente apoyadas, la luz central era de 49 m y fue aprobado por la Comisión de Arte de la Ciudad. Antes de su construcción se hizo una prueba de carga sobre una de las vigas a escala real que contó con la asistencia de muchos técnicos locales y del extranjero. Se recoge también el análisis y crítica de este puente del ingeniero A. Komendant.

Pese al éxito de este puente la industria americana seguía teniendo muchas dudas sobre la viabilidad de implantar la tecnología del pretensado en el mercado americano. El enfoque europeo de la obra civil sería particularizado para cada obra,

mientras los americanos buscaban aplicar los principios de producción en masa. Para que la tecnología tuviese éxito en los Estados Unidos habría de buscarse la prefabricación y eliminarse todo lo posible necesidad de mano de obra especializada.

En Tennessee, el ingeniero Ross Bryan trabajó sobre la posibilidad de crear piezas de hormigón prefabricadas unidas mediante el tesado de cables no adherentes. Posteriormente en obra se realizaba una losa vertida que rigidizaba toda la estructura con un mínimo de herramientas en obra. Se realizaron diversas versiones sobre la idea inicial. Con la llegada de las plantas de prefabricación estos sistemas cayeron en desuso, reemplazándose por losas en T o doble T.

El gobierno de los Estados Unidos había promovido una Ley de carreteras interestatal por lo que había una gran demanda de puentes para carreteras. Varios industriales americanos realizaron viajes a Europa para visitar las plantas de fabricación europeas. Más que en el postesado se interesaron en la prefabricación y en el sistema desarrollado por Hoyer denominado "de cuerdas de piano". Comenzaron así a surgir las primeras plantas de prefabricación en los Estados Unidos.

Con la guerra de Corea y las huelgas en el sector del acero este material comienza a escasear en Norteamérica a principios de los años 50, por lo que se busca un material sustitutivo. Además se estaba dando uno de los mayores momentos de expansión de la industria de la edificación en los Estados Unidos. Se comenzaron a realizar estudios y pruebas de aplicación de esta nueva tecnología a la industria de la construcción del país.

Ingenieros como Anderson se implican en la prefabricación de elementos de construcción pretensados creando plantas de hormigonado y realizando a la par una labor de difusión en Universidades, y de consultoría entre los profesionales. En las plantas conseguían una alta calidad en los productos y

desarrollaron sistemas propios de tesado y postesado de la armadura. Realizaron trabajos como el Monorraíl de Seattle, el Monorail de Disney World, o el Estadio de Beisbol de Cheney.

El Departamento de Carreteras del Estado de Florida tenía una serie de proyectos de carreteras previstos en los que se necesitaba realizar una gran cantidad de puentes. Uno de ellos era el de conectar la ciudad de Brandenton y St. Petersburg cruzando al Sunshine Skyway. Se trataba de un puente de unos 5.334 m sobre caballetes e inicialmente estaba previsto en hormigón armado. La Preload Co propuso la sustitución de este material por el hormigón pretensado utilizando el sistema de anclaje Lee-McCall. Se realizó así el Tampa Bay.

Posteriormente se desarrollaron otros sistemas de pretensados enteramente americanos como el strescon o el Anderson. Se mejoraron los métodos adaptándolos a los sistemas habituales de construcción americanos. En Florida, que estaba viviendo una fuerte expansión surgió un gran interés por este nuevo material. Además el clima era propicio para una barata instalación de plantas de prefabricación, dado que en muchos casos podía realizarse el almacenamiento al aire libre.

Entre los elementos más representativos del hormigón pretensado prefabricado estarían las losas para pisos que también se utilizaban como cerramiento tanto en su versión en T como en doble T.

Entre los retos del pretensado uno es de la continuidad de los elementos que consigue un considerable ahorro, una mayor esbeltez de los elementos y un funcionamiento más seguro. El ingeniero Albert Kahn había desarrollado un método que simplificaba dichos cálculos y que utilizaba en sus edificios industriales. Se reducían a la par el número de anclajes y con ello se simplificaba el trabajo en obra.

Se comienza a trasponer la tecnología de los puentes a las vigas de edificación como en el caso del Manhattanville College, realizado por la Preload Co, donde se disponen unos elementos parecidos a los del puente de Tennessee de Ross Bryan para posteriormente realizar un postesado y un vertido in situ.

El primer objetivo del pretensado en la edificación americana será la realización de unas losas, bien unas losas con elementos prefabricados o unas losas completas postesadas que redujesen el canto de los pisos, optimizando la altura de la edificación. En estas losas era muy importante permitir el paso por el alma de la viga para los conductos de ventilación, aire acondicionado, calefacción, etc., por lo que se realizan vigas con diversas disposiciones de huecos en el alma.

Otro de los problemas en la expansión del hormigón pretensado en los Estados Unidos era la ausencia de códigos de edificación específicos para este material. Por ello, se comienzan a llevar a efecto diferentes documentos por parte de diversas asociaciones de fabricantes y consultores de este material. En 1954 se crea en Tampa, Florida del Prestressed Concrete Institute (PCI), entre cuyos primeros objetivos se encontraba el de desarrollar un cuerpo teórico de conocimiento sobre la materia. Ese mismo año presenta la primera especificación "Specification for Pre-Tensioned Bonded Prestressed Concrete". En 1961 trasladan su sede a Chicago y posteriormente crean sus premios anuales que serán un medio de difusión de este material.

Diez años después de la construcción del Walnut Lane se calcula que el hormigón pretensado habría recogido aproximadamente un tercio del mercado del acero en la obra civil, que representaría a su vez dos tercios del total del mercado del hormigón pretensado, contando con 280 productores distribuidos por todo el país.

Se han realizado aplicaciones notables como la del Edificio Norton de Bidon & Wright y SOM con ingeniería estructura de

T.Y.Lin. Es un edificio de 21 plantas, con vigas de 21,33 m de luz sin ningún pilar intermedio y en donde estas vigas están horadadas de forma que se permite el paso de instalaciones por las mismas.

También comienzan a aparecer otros tipos como las láminas plegadas pretensadas y elementos específicos como los "pilares-arbol" prefabricados, que comprendían varios pisos y se iban encajando entre sí. También se dan cubiertas laminares como la de las instalaciones para la Sala de Conferencias del International Trade Center de New Orleans. Aparecen también los pilares-muro o losas que pueden disponerse como cerramiento.

Se comienzan a realizar edificios altos y estos se aprovechan de los efectos plásticos que pueden conseguir, como en el caso de la Sede de la Compañía Mutual Life Insurance del Norte de Carolina, en Durhan, que alterna vigas vierendeel con plantas huecas. O el edificio Gulf Life Insurance en Florida del arquitecto Welton Becket y el ingeniero Richard Bradshaw, que también tiene una gran expresividad formal y ganó el premio del PCI de 1968.

Se realiza también un repaso específico de la publicidad de los componentes del hormigón pretensado en las revistas, publicidad que atañe principalmente a las empresas Roebling, Ryerson, ARMCO y a la compañía Prescon.

Uno de los grandes personajes que colaboraron a la difusión y a la aplicación del hormigón pretensado en los Estados Unidos es el Profesor T.Y. Lin, que había una beca Fulbright para viajar a estudiar en Bélgica con el Profesor G. Magnel.

Desarrolló métodos simplificados de cálculo como el método de equilibrio de cargas, que consiste básicamente en sustituir, para el cálculo, el pretensado por sus efectos, por las acciones que ejerce sobre el hormigón, de forma que el cálculo es similar a cualquier otra estructura sin pretensado.

Según Lin el pretensado es una habilidad para redirigir la fuerza de la gravedad, permitiendo nuevos espacios a la arquitectura que nace y se extraña que la arquitectura no haya integrado aún estos conceptos.

Para Lin, en 1961, aparecen tres vías de desarrollo de la tecnología del pretensado en Norteamérica: su utilización en edificios de plantas múltiples; la fabricación de elementos pretensados para la edificación y el pretensado tridimensional (Lin 1961). Este último sería el más rico en cuanto a la creación de espacios significativos.

En lo que se refiere a su utilización en edificios de plantas múltiples y a la fabricación de elementos pretensados, constata Lin que habrían sido promovidos principalmente por la industria y no tanto por la ingeniería y poco o nada por la arquitectura.

Colabora en la realización de estructuras significativas como las cubiertas del hipódromo de Caracas, junto a Arthur Froehlich, que disponen de un voladizo de 27,43 m, con un espesor de 7,6 cm. También participó en la construcción del Celebrity Theatre, que se inauguró en 1963, realizado con elementos prefabricados pretensados realizados en obra. En 1971 realizará la cubierta laminar del Coliseum de Ponce, en Puerto Rico, donde puso en práctica el que él mismo denomina pretensado tridimensional. Participó, igualmente, en el edificio Norton en Seattle de 20 plantas de SOM ofreciendo una enorme versatilidad a las plantas que carecían de apoyos intermedios.

El estudio SOM si fue capaz de apreciar el potencial del diseño con hormigón pretensado, desarrollando unos edificios con amplios entramados como el de las oficinas del United Airlines Executive en Chicago con una trama de 18,28 x 20,12 m.

Goldsmith, ingeniero del estudio SOM, ya propuso para su tesis doctoral una torre en la que la estructura estaba

pretensada, con diversas plataformas de las cuales colgaría parte de las plantas y apoyaría otra parte. También pudo estabilizar el edificio con función de reloj solar de Tucson mediante esta tecnología. Desarrollará un tambor pretensado con un anillo de compresión y uno de tracción unidos en el Oakland Arena, donde trabajó con los ingenieros estructurales Amman & Whitney.

En una de las tipologías donde se desarrolló esta tecnología fue en los hangares, dado que requerían unas grandes luces con los apoyos mínimos. Así aplican la tecnología del pretensado con cubiertas de láminas plegadas o cubiertas de acero.

Se revisa la publicidad de los elementos del pretensado en las revistas especializadas en arquitectura de la época de los Estados Unidos, con anuncios de empresas como Roebling, Rierison, ARMCO, etc.

Uno de los equipos arquitecto-ingeniero que mejor entendió el valor del pretensado es el formado por L.I. Kahn y A. Komendant. En el Museo Kimbell la forma de las cubiertas fue determinada por razones funcionales, y fueron capaz de realizar unas bóvedas que funcionan como vigas y con capaces de apoyarse exclusivamente en cuatro pilares.

En el edificio de los laboratorios Richards realizan un edificio mediante el montaje de elementos prefabricados pretensados, dejando huella en el edificio de los elementos de la construcción y confiriendo al hormigón de una expresión tectónica inédita.

4. Hipótesis

La posibilidad de introducir nuevos esfuerzos, similares a los gravitatorios, en las estructuras modifica la relación entre sus partes creando una nueva topología asociada a la forma, que no se vincula, por tanto, únicamente a la gravedad. Los espacios creados a partir de estas nuevas relaciones topológicas resultan conceptualmente diferentes a los anteriores ya que establecerían una nueva relación entre el espacio, la gravedad y la materia.

Si se liberan las estructuras de sus condicionantes mecánicos para poder controlar la forma geométrica final de las construcciones la clasificación de las mismas pierde su sentido primario no pudiendo definir tipos constructivos a priori. El pretensado confiere al material sobre el que se aplica las condiciones que el proyectista estima más oportunas para mantener la estabilidad formal de la geometría que él mismo proponga. Por tanto, las tipologías constructivas, relativas a la estructura, en la arquitectura del SXX, han ido experimentado una transformación desde las tipologías tradicionales hacia la abstracción.

El diseño en el que la estructura representa una cualidad de la arquitectura es consciente de la significación que tienen los medios auxiliares y los procesos constructivos para la materialización de una construcción. La técnica del Pretensado, que surge como una intuición, es el resultado de la voluntad de que las formas arquitectónicas sean producto de las condiciones que impone la naturaleza del material y de las decisiones del proyectista.

Se pueden considerar los materiales pretensados como materiales diseñados, en contraposición a los materiales elegidos o seleccionados, en tanto que el diseñador interviene activamente sobre los mismos para crear un sistema de fuerzas específico en cada una de las obras en las que se aplican. El pretensado es capaz de modificar las prestaciones de los materiales de forma

que se adapten, en cierta medida, a los requerimientos del proyectista. Esta posibilidad abre el campo de expresión de los materiales de manera que conformen lenguajes alternativos.

5. Objetivos

Establecer las relaciones entre estructura y forma en las construcciones y arquitectura donde se utiliza el pretensado.

Revisar los diferentes sistemas de pretensado analizando los elementos que pudieran configurar un lenguaje específico.

Recopilar los diferentes sistemas de anclaje, como punto significativo en el sistema de pretensado, destacando las características más relevantes de éstos.

Manifestar las condiciones mediante las cuales la técnica del pretensado puede conseguir hacer estable una determinada forma geométrica en una estructura

Discriminar las diferencias entre utilizar el pretensado para intervenir en el flujo de los esfuerzos gravitatorios y disponer de él para mantener una forma estable a los efectos de cargas asimétricas u otros.

Determinar como las tipologías estructurales se han visto afectadas por la introducción de la tecnología del pretensado.

Significar la técnica del pretensado en las construcciones arquitectónicas que se configuran y determinan a través de su estructura como valor expresivo.

Determinar qué elementos de los sistemas constructivos propios de la tecnología del pretensado pueden tener un valor relevante en la conformación de las construcciones.

Caracterizar los diversos lenguajes arquitectónicos que derivan de los materiales pretensados utilizados en la arquitectura del siglo XX.

6. Estado del Arte

En los años 30, del SXX, se producen unos intensos años en la ingeniería civil, donde aparecen obras significativas de Freyssinet, Amman, Torroja, Nervi o Maillart, que introducen lo poético frente a lo estrictamente funcional. Se producen grandes innovaciones estructurales como las láminas de hormigón armado o el propio pretensado, con innovaciones en los materiales, las formas, los cálculos y los procesos.

Obras como el Frontón de Recoletos, los voladizos del hipódromo de la Zarzuela, los hangares de Orly o el puente de Luzancy alcanzan la consideración de formas-tipo estructurales siendo enteramente nuevas, sin antecedentes precisos. Constituyen a demás un prototipo en si mismas y en muchos de los casos no han tenido continuidad formal, aunque han servido de base para la construcción de otras obras a menor escala (Fernández Ordóñez, Navarro Vera, and Arenas de Pablo 1997).

Estructura, Forma y Geometría son conceptos que están profundamente imbricados y que han dado lugar históricamente a una serie de Tipologías constructivas y estructurales.

Hay estructuras cuya resistencia deriva de su forma, como las cáscaras y las láminas. Estas estructuras resisten las cargas trasladándolas a través de su superficie y evitando con ello la flexión. Gracias a ello, pueden tener pequeños espesores. Con un diseño adecuado, la cáscara puede evitar la disposición de vigas de borde, que son las que evitan la flexión y llevan los esfuerzos de corte a los pilares.

Las estructura de las láminas está, por tanto, íntimamente relacionada con su geometría y a su vez el espacio generado por estas estructuras también lo está. En diversas ocasiones la forma exterior se ha conseguido observando en modelos el polígono funicular utilizando pesos que colgaban de un entramado

o malla, como Gaudí o Isler, aunque a las mediciones sobre estos modelos había de añadirse una comprensión intuitiva de su comportamiento por parte de los diseñadores, dado que el cambio de escala obligaba a considerar otras cargas además del peso propio como sobrecargas de nieve o viento. Para estas estructuras es fundamental conseguir que su forma se mantenga, pues de otra manera se producirían flexiones y se perderían los beneficios del estado laminar.

Por el contrario, hay otras estructuras resisten principalmente a flexión, un entramado plano funciona principalmente a flexión si bien sus elementos realizan esfuerzos específicos de tracción o compresión, de igual forma se comportan otras estructuras adinteladas, si bien hay otros elementos en estas que pueden tener que soportar los esfuerzos cortantes (Bradshaw et al. 2002).

Por otra parte se puede entender la forma desde un punto de vista abstracto, en el cual no tuvieran caso los requerimientos estructurales, en ese caso la forma deviene en pura geometría, o geometría materializada. Para ello habríamos de contar un material y/o una tecnología capaz de desarrollar las "funciones estructurales" de la forma o del material.

El pretensado es capaz, hasta cierto punto, de recrear las funciones de la gravedad desviando las cargas gravitatorias a juicio del proyectista, creando una suerte de "columnas invisibles" como las denominaba T.Y Lin (Lin 1961). También es capaz de mantener una geometría propuesta en las estructuras que requieren de ello, tales como las estructuras colgadas o las laminares, en las que si la forma propuesta se ve comprometida, podría quedar también comprometida su estabilidad, rigidez o resistencia.

Las tipologías estructurales, están íntimamente ligadas a los requerimientos estructurales a los que tienen que atender.

Las estructuras han ido adquiriendo sus formas prototípicas en función de los requerimientos a los que tenían que responder. La morfogénesis de las estructuras, históricamente, ha estado ligada a la aparición de nuevos materiales, a la mejora de los procesos de fabricación de los mismos y de las técnicas constructivas y al mayor conocimiento del comportamiento de todos ellos, y a la mejor adecuación a los fines propuestos, funciones y fines que también son cambiantes. Siguiendo el símil con el maquinismo de Fernández Casado, las tipologías evolucionarían por el equilibrio entre la voluntad del hombre que las impulsa y la armonía universal que las limita (Fernández Casado 2005).

6.1 Estructura, Forma, Geometría y Tipologías

En cuanto a la relación entre estos cuatro conceptos en el presente texto, los mismos han desarrollado históricamente unas relaciones que se podrían considerar de la siguiente manera:

La forma geométrica de las construcciones ha estado sólidamente vinculada a las posibilidades estructurales que a su vez venían impuestas en base a los requisitos gravitatorios. A lo largo de la historia, la forma iba cambiando en base a los progresos en el uso y conocimiento de los materiales y de las técnicas constructivas ofreciendo una serie de tipologías constructivas, que si bien continuaban sus modificaciones evolutivas, seguían respondiendo, en mayor o menor medida a un esquema estructural y formal claro y riguroso.

La geometría, a su vez, podría tener dos aspectos, por una parte en lo que se refiere a la condición geométrica o espacial de las distintas partes de una construcción, y por otra parte, en lo que se refiere a la condición topológica de relación entre las distintas partes de esa construcción. Si a través del pretensado podemos introducir unos esfuerzos que resulten de una entidad asimilable a la de la gravedad, las relación entre las partes la geometría de estas construcciones también puede variar, dejando

de responder, exclusivamente, al esquema marcado por la gravedad.

Desvinculando a geometría de las tipologías de su relación con carácter exclusivo con la gravedad, las mismas están en posición de adquirir un sentido menos consustancial y más de carácter procesual o metodológico en cuanto al diseño de las construcciones.

6.1.1 Estructura

La estructura es uno de los elementos esenciales de la arquitectura. En un sentido amplio refleja el concepto de Orden, ésto es, la relación de cada parte con el todo y con el resto de partes. Alude también a una representación simbólica de la totalidad donde toman valor exclusivamente los elementos más significativos, prescindiendo de los más accesorios. Al representar la idea o concepto de la totalidad de esa construcción, alude en diferentes planos a la organización de las fuerzas en una construcción como al orden interno, o no evidente de la construcción.

La organización de las fuerzas en la construcción conformaría lo que se denomina la estructura resistente. Esta estructura resistente sería aquella parte de la construcción que le permite mantener de forma razonable su integridad física y su forma, en unas condiciones normales de uso (Aroca Hernández-Ros 2008).

Históricamente, la estructura ha sido la que conformaba los espacios, en tanto que no existía una diferenciación entre estructura y cerramiento, tan clara como actualmente. Por ello, también ha tenido además de las consideraciones resistentes, la capacidad de conferir orden y sentido a la obra constructiva, e incluso a los espacios que conformaba. De alguna manera, a lo largo de la historia ha representado la esencia de la forma construida. La estructura sería pues, el instrumento que manifiesta el recorrido de la fuerza de la gravedad a través de la forma arquitectónica. Si bien queda a criterio del técnico, dentro de

las posibilidades de cada tiempo, que esta manifestación se haga patente y en qué grado.

La geometría de un objeto no resulta extrapolable en las mismas condiciones a cualquier escala, como ya determinó Galileo Galilei en 1638, en su diálogo de dos Nuevas Ciencias. El tamaño tiene una importancia decisiva en la resistencia estructural, si bien puede resultar no ser tan decisiva en los moderados valores de las tensiones y tamaños de las edificaciones más habituales, sí lo es en los tamaños muy superiores, que son los que se manejan en ciertos tipos estructurales y es especialmente relevante en grandes estructuras como los puentes. La misma figura geométrica con el mismo material a distintas escalas posee también distintas características resistentes. Al ampliarse una estructura el volumen, con correspondencia con el peso, aumenta de forma cúbica mientras que la superficie de soporte sólo aumenta de forma cuadrática. Es por ello que la geometría, no es suficiente para predecir la resistencia estructural y por tanto cada escala podrá requerir estructuras diferentes (Muñoz Miranda 2011).

No obstante, la geometría y la escala se había utilizado a lo largo de la historia para predecir el comportamiento de la estructuras, las que se denominaban reglas de proporción aseguraban tanto una correcta composición (o relación entre las partes y el todo), como el buen funcionamiento estructural. Estas reglas de proporción estaban basadas en el experiencia, y no se desarrollará una base científica clara hasta la mitad del S XVII aproximadamente.

Es a partir de estas reglas de proporción que se desarrollan los órdenes clásicos que suponen tanto la articulación de la comunicación arquitectónica como la seguridad de un adecuado comportamiento de las cargas frente a las resistencias de los diversos elementos.

Estas reglas se mantienen en el tiempo en tanto que no

aparece una variación en los materiales de construcción. En el SXIX con el desarrollo del hierro como material de construcción da paso a la necesidad de un análisis científico de las estructuras en tanto que las reglas de proporción desarrolladas a lo largo de la historia no son válidas para el hierro.

También se puede entender la estructura como un sistema u organización, constituyendo diversos niveles de análisis, dentro de una comprensión más topológica del hecho estructural (Aguiló Alonso 2008).

6.1.2 Forma

Para L. Kahn la forma es la base de la arquitectura y surge de la búsqueda del qué (A. Komendant 2000).

Para Aristóteles, según su teoría del hilemorfismo, todo cuerpo se constituía por dos principios esenciales que era la materia y la forma. La forma sería la esencia que llevaba a las cosas a tener un determinado comportamiento, mientras que la materia quedaría condicionada por dicha forma. La forma sería independiente de la materia y podría incluso existir forma sin materia, pero no lo contrario, materia sin forma (Fontana Cabezas 2012).

La forma de la estructura vendría dada por la manera en que se organiza la materia para soportar las acciones que actúan en ella y trasladarlas hacia el terreno. La forma depende en gran medida del material a organizar. Ello no quiere decir que el material defina la estructura ni lo contrario, que la estructura defina el material, sino que se establece una estrecha relación entre ambos (Fernández Troyano 2008).

Para Le Ricolais la forma sería una entidad puramente matemática, concibiéndola de un modo dinámico, más fluido o topológico. Entiende la forma más como un modelo de organización,

de disposición, dando una importancia especial a la conectividad entre las partes (Juarez Chicote 1997).

El modelo de hilos utilizado por Gaudí permite visualizar fácilmente la interacción entre la geometría y la mecánica. Permite también, corregir la forma según las necesidades funcionales, estéticas y expresivas del arquitecto, confirmando al modelo un carácter de ser vivo adquiriendo su forma final. Gaudí defendía que la forma surge de la propia estructura. Igualmente Torroja también decía que la mejor obra es la que se sostiene por su forma y no por la resistencia oculta de su material (Muñoz Miranda 2011).

Para los funcionalistas, como Louis Sullivan, la forma sigue a la función, pero su materialización se somete a las posibilidades físicas, dictadas principalmente por la materia y la gravedad.

6.1.3 Geometría

La geometría nació como una de las primeras manifestaciones del pensamiento matemático, para resolver los problemas de medida de los terrenos, cuando el hombre se hizo agricultor. Fue Euclides el que elaboró los fundamentos de la Geometría.

La arquitectura moderna ligada a los nuevos materiales de construcción elaboró una nueva base teórica en relación a las implicaciones formales de los principios de la geometría. La geometría habla sobre la medida y propiedades de los objetos en el espacio. En la actualidad juega un papel muy importante en la Arquitectura el concepto de Topología que se centra en el estudio de las propiedades de los cuerpos que se mantienen inalteradas debido a cambios continuos y con independencia de su tamaño o apariencia.

El concepto de Topología enlaza con el concepto de red y la

teoría de nudos, que resulta de gran interés al abordar el estudio de las geometrías y de las estructuras con los ordenadores.

Según la Topología existirían tres principales organizaciones estructurales: la centralización o referencia a un punto central, la axialidad o referencia a un eje, y la organización con relación a un sistema de coordenadas dado.

Wassily Kandinsky dedicó varias obras al estudio plástico de la Geometría, ya establece la significación de las relaciones geométricas entre los elementos, tanto relación entre el punto y la superficie de fondo, en cuanto a su tamaño, así como la relación del tamaño con respecto a las otras formas que se sitúan en la misma superficie. La línea por su parte, sería la traza del punto en movimiento y discrimina entre los distintos tipos de líneas (Kandinsky 1991).

Le Corbusier, por su parte, en su libro hacia una nueva arquitectura determina que las formas primarias son las más bellas puesto que se leen con claridad, pero que los arquitectos del tiempo ya no realizan estas formas, mientras que son los ingenieros los que se decantan por incorporarlas a su lenguaje (Le-Corbusier 1977).

6.1.4 Tipología

El tipo en la ingeniería se encuentra ligada al proceso constructivo, mientras que en arquitectura es un concepto más compositivo. Así, Pevsner organiza los tipos constructivos en relación a las funciones representativas de los edificios, mientras que Torroja lo hace en función a la estructura resistente de las construcciones (Aguiló Alonso 2002).

Torroja, en su libro Razón y Ser, distingue el comportamiento estructural de los siguientes elementos: el soporte y el muro; el arco; la bóveda y la cúpula; la viga de alma llena y la placa;

las triangulaciones y mallas; la contención; la cubierta y el cerramiento; el piso y el edificio; puentes y acueductos; además dedica para una mejor comprensión capítulos a los diferentes materiales, a los procesos de ejecución y a la génesis del esquema estructural, entre otros (Torroja Miret 2000).

Por su parte, Javier Manterola, en 1998, realiza una clasificación de las tipologías de las estructuras resistentes arquitectónicas, dejando de lado algunas como los rascacielos y torres. En dicho artículo establece los siguientes tipos (Manterola Armisén 1998):

1. Celosía
2. Pórticos transversales
3. Grandes cubiertas planas
4. Cubiertas colgadas
 - Con Apoyos continuos
 - Cubiertas rígidas colgadas o atirantadas
5. Tenségrity

Retoma el artículo en el año 2005, denominando al artículo continuación del anterior y sus tipos han pasado a ser (Manterola Armisén 2005):

1. Deconstrucción
2. Edificios en altura
3. Poliedros, cubos, etc.

4. Shigeru Ban y la ortodoxia resistente

5. Formas Blandas

Se percibe, de la propia designación de los tipos, una mayor abstracción conceptual.

Richard Bradshaw, refiriéndose a “estructuras especiales”, como aquellas innovadoras, de grandes luces y principalmente referidas a cubiertas que alojan actividades humanas, diferencia entre (Bradshaw et al. 2002):

- a) Estructuras que trabajan fundamentalmente a compresión.
- b) Estructuras que trabajan fundamentalmente a tracción.
- c) Estructuras de mallas espaciales.

Si acudimos a otros ingenieros que trabajen en construcciones de la arquitectura contemporánea como Cecil Balmond, éste ya nos habla de estrategias de diseño estructural para dotar de coherencia conceptual a las formas.

Propone por su parte: alteración de la estructura, optimización de la estructura, identificación de estructura y cerramiento y definición algorítmica de la estructura (Bernabeu Larena 2007b).

Por tanto, Balmond, nos habla más de procesos que de tipos establecidos, introduciendo el cambio y con él, el tiempo, como una variable a considerar en el diseño estructural.

Según I. Solá-Morales una arquitectura líquida será aquella que sustituya la firmeza por fluidez y la primacía del espacio por la del tiempo. Y este cambio ha de conseguirse mediante un proceso que establezca los estadios intermedios: sólido,

viscoso y líquido. Necesita tres condiciones materiales, firmeza, ductilidad y fluidez y tres categorías; espacio, proceso y tiempo (Solá-Morales 2001).

Por su parte, Aguiló achaca a la disponibilidad de la tecnología digital en los proyectos el hecho de que el concepto de tipología tenga un valor menos relevante. La utilización de estas herramientas informáticas permiten prescindir de una preconcepción del diseño para la materialización de las ideas, volviendo, virtualmente, al método de ensayo y error con múltiples soluciones particulares. Ello, según Aguiló deriva una banalización de las posibilidades creativas. La gran escala sería en la cual que todavía resulta crucial la elección tipológica (Aguiló Alonso 2002).

Todo ello nos lleva a un nuevo concepto tipológico donde la comprensión del mismo deviene de un proceso más que de una composición estática.

Puente de Luzancy. Anclajes de las armaduras transversales (Fernández Ordoñez 1978, p. 222)

Freyssinet. Fuente: Assotiation Scientifique de la Précontrainte. Travaux, Paris.

6.2 En busca de las condiciones para adaptar el material a la forma. Freyssinet

Freyssinet comienza su carrera profesional en 1905 cuando el hormigón armado estaba comenzando a normalizarse, tras unos 50 años de uso, la primera circular del hormigón armado se publicó en 1906, dando comienzo al declive las patentes (Domouso de Alba 2007). En ese mismo año, 1905, R. Maillart construye el puente Tavanasa, un arco triarticulado de hormigón armado de 51 m (David P Billington 2013).

Es destacable en la obra de Freyssinet, el interés que muestra Freyssinet por incidir en las cualidades del material y no en la forma. Maillart o Dischinger buscan optimizar la forma, en función de los esfuerzos que tiene que resistir, pero Freyssinet intenta cambiar las cualidades del material. Para ello consigue unas mayores resistencias tanto del hormigón como del acero y al no ser ello suficiente para conseguir las formas propuestas, le impone además un nuevo régimen de tensiones que contrarreste al de servicio, y todo ello sin modificar o modificando mínimamente la forma propuesta.

Freyssinet consigue por tanto los medios materiales necesarios para conseguir que el hormigón trabaje en las mejores condiciones, pero también conforme a su naturaleza. A la vista de sus obras, se observa también la idea de forma de Freyssinet, estaba ligada al proceso de construcción, era una idea más dinámica, donde la armonía se encontraba en la disposición de los medios adecuados en el momento justo, de tal manera que era capaz de conseguir la adecuación entre las partes y el todo.

Por otra parte, las obras realizadas por Freyssinet resultan unos hitos tan significativos en la obra civil, que el enfoque o visión de Freyssinet como principal promotor de esta tecnología continúa manteniéndose, e incluso, pudiera haber condicionado, en su momento, otras formas de aplicación que pudieran ser de interés

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Croquis para el puente Saint Michel sobre el Garona en Toulouse (Freyssinet 2003, p. 16)

como el pretensado parcial o la aplicación de la tecnología a otros materiales como el ladrillo, que ha sido más parcial.

Resulta por ello pertinente el análisis de los antecedentes a la patente de Freyssinet para contemplar otras visiones y tecnologías en relación a la aplicación a las obras de esta técnica.

6.2.1 Reconocimiento de las posibilidades del hormigón armado

En sus primeros años, hasta la I Guerra Mundial, Freyssinet lleva a cabo un amplio programa práctico en relación con el hormigón armado. Su experiencia con el nuevo material, le lleva a intuir su potencial constructivo, aún sin desarrollar. Las normativas necesitan para su aplicación un amplio conocimiento de la materia que rigen, y en el caso del hormigón armado en los primeros años del SXX los principios de seguridad obligaban a la aplicación de preceptos aún no suficientemente probados o bien derivados del conocimiento de otros materiales que no necesariamente funcionaban igual. Por ello, en esta etapa, Freyssinet explora el nuevo material gestando su necesidad de dominarlo y para dominarlo, de conocerlo en profundidad y de primera mano.

En Freyssinet todavía no se separan la ingeniería científica y la práctica (Fernández Ordóñez 1978).

"Yo he nacido constructor. Imponer a la materia formas nacidas de mi imaginación es para mí a la vez una necesidad imperiosa y una fuente de alegría inagotable" (Fernández Ordóñez 1978) (recogido de la publicación "Souvenirs ". "Cents ans de Béton armé". E. Freyssinet. Suplemento de la Revista "Travaux", nº194 bis. Editions Science et Industrie, 1949).

A la vista de lo expuesto, en Freyssinet está muy presente

la necesidad de que las formas a realizar surjan exclusivamente del material y de la libertad del proyectista, lo que le conduce casi con necesidad a desarrollar la técnica del Pretensado.

En reiteradas ocasiones a lo largo de su vida profesional Freyssinet expresa su crítica, y su consecuente con rebeldía, hacia los reglamentos y circulares que se vinculaban a procedimientos matemáticos, por una parte y al entorno burocrático y administrativo de esa Ciencia. Por el contrario, mostró su apego y confianza en sus ensayos personales, en los cuales fijaba sus objetivos estrictos basándose en las necesidades prácticas hacia la ingeniería (Ch et al. 1987). Se define a sí mismo como una persona intuitiva:

Mis dotes intelectuales son medianas y, fuera de lo que me ha parecido útil para mis investigaciones o divertido de aprender, no sé nada. Soy un intuitivo, sujeto mucho menos a su razón que a los impulsos de su subconsciente; un superviviente de una raza de artesanos de instintos constructores, formados por milenios de aislamiento en condiciones de vida especialmente difíciles.(...)

Para mí existen sólo dos fuentes de información: la percepción directa de los hechos y la intuición que considero la expresión y el compendio de todas las experiencias acumuladas por la vida en el subconsciente de los seres, desde la primera célula. Es preciso, por supuesto, que la intuición esté controlada por la experiencia. Pero cuando se contradice con el resultado de un cálculo, hago que se calcule otra vez y mis colaboradores aseguran que, al final, siempre falla el cálculo (Eugene Freyssinet 2003).

Ya en sus primeros trabajos como ingeniero al Servicio Vecinal en Moulins (Allier), nombramiento que consigue el 1 de julio de 1905, a sus escasos 26 años y mostrando ya una enorme confianza por el hormigón armado, les propone a los alcaldes realizar los puentes al 20% sobre el costo oficialmente calculado, sin necesidad de solicitar subvenciones y con un ancho de tablero

de 4,7 m en lugar de los 2,50 m inicialmente propuestos. Todo ello, basándose en sus propios estudios sobre el comportamiento de este nuevo material ("étudiés dans le plus parfait mépris des circulaires") (Espion 2012).

Es cosa fácil. Los tableros metálicos, montados en el fondo de nuestros valles, costaban caros. Por tal motivo se limitaban las luces, de lo cual resultaban estribos altos con fundaciones profundas. Bastaba aumentar ampliamente las luces para suprimir los agotamientos y disminuir la altura de los accesos; naturalmente, era preciso no sujetarse a las formas clásicas, sino descubrir otras que sacaran mejor partido de las condiciones locales.

Lo consigo después de meditar por largo tiempo, haciendo y rehaciendo innumerables croquis, con una libertad de conceptos y de formas tan completa como si hubiera sido el primer hombre encargado de construir un puente, con el más absoluto desprecio hacia todos los precedentes.

Después de cien tentativas, una idea surge de mi subconsciente y se impone a mí mismo como la única posible. Proyecto entonces la obra en sus menores detalles, convencido de que son sobre todo los detalles lo que hace que una obra sea buena o mala. Construyo ya sea por administración, o bien por medio de modestos empresarios locales, que actúan enteramente bajo mi vigilancia. Yo mismo hago de carpintero, de armador de encofrados y de hierro, de colocador de hormigón. Manejando el hacha, la grifa o la paleta, enseño a los mocetones de la comarca, -o, mejor dicho, descubrimos juntos- los mejores métodos para hacer pronto y bien los encofrados y las armaduras, y colocar hormigones bien compactos. Naturalmente pronto me convertí en el niño mimado de los alcaldes del distrito y cualquiera que les hubiese contado que lo que hacía iba en contra del reglamento, habría arriesgado mucho. A pesar de todo, era verdad, pues ninguna autoridad aprobaba mis proyectos, estudiados con un

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Puente de Boutiron (Limousin et Cie. en Fernández Ordóñez 1978, p. 60)

Puente de Châtel-de Neuvre (Fototeca Freyssinet Freyssinet 2003, p. 9)

Puente del Veudre 1911-12 (Espion 2012, p.3)

profundo desprecio hacia las circulares. Pero, ¿quién diablos va a bajar hasta el fondo de valles perdidos a comprobar cómo he aplicado el reglamento? (Fernández Ordóñez 1978)(Eugene Freyssinet 2003).

Ante el éxito de una propuesta que mejoraba las prestaciones y reducía amplísimamente el presupuesto inicial, poco les importaba a los responsables si las construcciones se ajustaban o no a los reglamentos del momento. Ante la realidad física de tener resuelto un problema satisfactoriamente se le dio entera libertad y también una responsabilidad absoluta sobre dichas obras. Así, ejecutó sus proyectos según sus propias palabras "con el más perfecto desprecio hacia las circulares".

De esta forma Freyssinet consiguió una experiencia sin precedentes constituyendo "un medio de entrenamiento perfectamente adaptado a mi temperamento", según sus propias palabras. Dispone pues del apoyo de las autoridades locales, animadas por un material que no sólo resolvía los problemas técnicos, sino que resultaba mucho más económico. Y además, estas autoridades tenían a su vez la necesidad imperiosa de construir puentes por lo que delegan ampliamente en el joven ingeniero que se brinda a resolver los problemas por su cuenta.

No obstante, aunque dudase de la veracidad de algunas de las conclusiones incluidas en las normativas de la época y que tuviese un afirme convicción sobre sus propias intuiciones, Freyssinet busca avalar estas intuiciones por cuantos estudios científicos sean precisos, siempre bajo su atenta y rigurosa supervisión (Fernández Ordóñez 1978).

6.2.2 El salto a las grandes luces. Primeros estudios sobre un modelo a escala real. Boutirón. Châtel-de-Neuvre. Le Veurdre

En esta etapa, Freyssinet inicia el salto hacia las grandes

Fig. 6.^a
Articulación en las pilas.

Fig. 7.^a
Articulación en la clave.

Fig. 8.^a
Bielas de articulación en los estribos.

Puente Mirabeau sobre el Sena en París, alzado (Revista de Obras Publicas 1896, p. 312)

Puente Mirabeau sobre el Sena en París, detalles articulaciones (Revista de Obras Publicas 1896, p. 312)

Ménsulas de Hormigón armado de la calle Roma de París del ingeniero Rabut (Fernández Ordóñez 1978, p 173)

obras. El salto de escala le proporcionará a Freyssinet una plataforma de ensayos sobre el hormigón y sobre el dominio de los medios auxiliares para la construcción de grandes luces. Es en esta etapa en la que observa el comportamiento no lineal del módulo elástico del hormigón armado y su fluencia con el tiempo y las cargas. También es en esta etapa cuando comienza a realizar pruebas en relación a las posibilidades de pretensar el hormigón.

Demostrando una gran confianza en Freyssinet, el empresario Mercier propuso la reconstrucción de los puentes de Boutirón, Châtel-de-Neuvre y Le Veudre. Ofreció la realización de los tres puentes a un precio a destajo igual al presupuesto previsto para el último, comprometiéndose a que, en caso de que los ensayos no fuesen satisfactorios, realizaría los puentes en mampostería según el proyecto establecido por la Administración para Le Veudre.

En el puente de Le Veudre Freyssinet propuso tres arcos de 72,5 m para minimizar los apoyos ya que el río discurría sobre arenas móviles y la realización de las pilas resultaba costosa. La luz de los arcos era muy rebajada, aproximadamente el 1/15. Se propusieron arcos triarticulados dado que las reglas del momento que preveían la variación lineal del hormigón las consideraban imprescindibles.

Espion señala la similitud de este puente y el del Boutiron, posterior, con el puente Mirabeau, de París de Jean Résal y Amédée Alby de 1896, puente de tres tramos con un arco central triarticulado de unos 100 m de luz y dos medios arcos laterales unidos al arco central de una luz de unos 37 m, todo ello construido con cerchas de acero laminado. Sobre el proyecto del puente Mirabeau ya se destacan las restricciones a que estaba sometido el proyecto debidas a las rasantes de las vías existentes, el servicio de navegación y el ferrocarril existente. El puente Le Veudre quedó destruido en 1940 por la Guerra (Revista de Obras Públicas 1896).

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Arco de ensayo 1908. Construcción (Fernández Ordóñez 1978, p. 49)

Arco de ensayo 1908. Arranque (Fernández Ordóñez 1978, p. 49)

6.2.3 Ensayo sobre modelo a escala. Pretensado del arco de prueba. 1907-1908

Previo a la construcción del puente se propone la realización de un arco de ensayo, entre otras cosas para probar el descimbrado de las bóvedas del puente con gatos. Este arco tenía unos 50 m de luz, 2 m de flecha y 1,5 m de espesor en la clave, 2,5 m al nivel de las articulaciones de los estribos. El suelo sobre el que se asentaría este arco de prueba era malo. Este arco representa el origen creación de la tecnología del pretensado, idea que le rondaba desde que tomaba lecciones con el ingeniero Rabut y éste le mostró la idea planteada en las ménsulas de la calle Roma en París, en 1903 (Fernández Ordóñez 1978). Estas ménsulas tenían un desarrollo de unos 7 m, soportando una calle. Se construyó esta estructura para ampliar la estación de tren de Saint Lazare de forma que no hubiese que renunciar a la anchura de la calle adyacente, la calle roma, la cual estaba sirviendo de apoyo a este voladizo (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

Para poder realizar este arco de ensayo, le resultaba imprescindible disponer de unos estribos que se moviesen muy poco debido a lo rebajado de las bóvedas, por ello unió los dos estribos mediante un tirante de hormigón de 150 dm², precomprimido entre los dos estribos, de forma que estos estribos tenían una fuerza permanente que los mantenía en su lugar de unas 2.500 T, gracias a centenares de hilos de acero de 8 mm, de alto límite elástico tensados por pares y anclados por clavijas insertas en los dos hilos de cada par. Este arco fue ejecutado en 1908 siendo uno de los antecedentes más claros de las ideas de Freyssinet sobre la incorporación de esta técnica mediante un pretensado exterior no adherente. Resulta significativo que este arco de prueba solo dispusiese de dos articulaciones y no de tres como los puentes proyectados por Freyssinet, avanzando en el modelo de prueba sus intuiciones sobre la innecesariedad de la articulación en la clave (Espion 2012).

Armaduras de una articulación. Puente de Boutiron (Fernández Ordóñez 1978, p. 55)

Puente de Boutiron. Articulación en la clave (Fernández Ordóñez 1978, p. 55)

En el arco de ensayo se utilizan articulaciones conformadas por rótulas de fundición. En el arco de ensayo remplazó los gatos de descimbramiento por cuñas de acero fijas a la masa, dado que los gatos que utilizaría finalmente para el puente tuvieron que ser diseñados específicamente y su construcción se realizó en Inglaterra.

Una vez realizada la bóveda se hizo un seguimiento de los desplazamientos de las articulaciones y de varios puntos. Los datos que arrojaron las pruebas se mostraron absolutamente diferentes de las esperables según las propiedades físicas del hormigón que formaban la base del reglamento de 1906. Se comunicaron dichas diferencias a Augustin Mesnager, antiguo profesor de Freyssinet y director de laboratorio de la École des Ponts et Chaussées. Él era la persona encargada de realizar las pruebas para las circulares sobre el hormigón, en las circulares se establecía que la relación tensión-deformación era similar en el hormigón y en el acero: sería aproximadamente lineales en el rango elástico e invariantes en el tiempo. Por ello Mesnager atribuyó los datos obtenidos de las pruebas a errores sistemáticos. No obstante, Freyssinet sabía que dichos errores no eran factibles dado el control a que había sometido las distintas pruebas (Fernández Ordóñez 1978).

Aun con la disparidad de datos obtenidos del arco de prueba, se comienzan a ejecutar los proyectos de puentes según los acuerdos pactados. Tras la ejecución del puente primer puente en Le Veudre empezó a ver que los arcos pandeaban en el sentido vertical. Las claves descendieron 13 cm y las deformaciones aumentaban rápidamente, lo que suponía una disminución del módulo elástico del hormigón. Se hacía necesario admitir que las deformaciones variaban con las tensiones y sobre todo con su ley de aplicación, hipótesis que se corroboraba también en el arco de ensayo. Ello daba lugar a que el módulo elástico del hormigón no fuese constante como se mantenía en la normativa en vigor, tanto en Francia como en otros países (Fernández Ordóñez 1978).

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Secciones longitudinales del puente sobre el río Veurdre (Fernández Ordóñez
1978, p. 57)

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 indica las instrucciones, puede variar entre 2×10^{-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 Veudre 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 (Eugene Freyssinet 2003).

Esta hipótesis se mantuvo hasta los años 30, donde, en las conferencias sobre el hormigón, se expusieron los trabajos de Freyssinet y de otros como Faber o Glanville sobre las deformaciones diferidas del hormigón.

Freyssinet explica cómo, ante la certeza de que sus bóvedas estaban condenadas al hundimiento, investigó las condiciones de realización de las pruebas por parte de la Comisión encargada de realizar las circulares del hormigón. Era el convencimiento de la veracidad de las hipótesis del módulo constante, por parte de los técnicos encargados lo que unido a la fragilidad y coste de los aparatos utilizados para la medición, lo que daba lugar a mantener el error. En los ensayos a rotura realizados por dicha Comisión para evitar que se destruyeran los elasticímetros que se utilizaban, de gran valor económico, éstos eran desmontados antes de que llegase dicha rotura y en los estudios que se sustituían las curvas de deformación cerca de la rotura, por sus tangentes al origen, dado que la constancia del módulo era

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Fábrica de vidrio de Centro Montluçon (Fernández Ordóñez 1978, p. 89)

Acerías de Caen, interior de la nave (Fernández Ordóñez 1978, p. 89)

Acerías de Caen, exterior (Fernández Ordóñez 1978, p. 89)

Hangares de Istres (Fernández Ordóñez 1978, p. 91)

una base obligatoria del cálculo de las tensiones debidas a las deformaciones (Eugene Freyssinet 2003).

Tal era dicho convencimiento que en los casos en los que la duración de las pruebas se había prolongado dando lugar a deformaciones no esperadas, en lugar de abrir un nuevo ensayo que explicase las mismas, se consideraban los resultados como anormales, o erróneos, no teniéndolos en cuenta para la regulación, al igual que hizo Mesnager con los estudios de Freyssinet en su arco de prueba.

Es probable que los científicos intuyesen que el hormigón no se adaptaba completamente a las consideraciones de la normativa pero su utilización con luces medias podía considerarse satisfactoria y segura.

En realidad, parece que se tenía conciencia de la no linealidad del hormigón ya desde el año 1899, puesto que se encuentran documentos de Ritter y Von Bach en ese sentido. Hacían trabajar al hormigón en el rango elástico limitando la deformación al 0,0002, que corresponde al 28% de la tensión de rotura (Pamies Rahan 2011).

Es entonces cuando se planteaban nuevos retos, como los que proponía Freyssinet, cuando las teorías comienzan a entrar en conflicto grave con la estabilidad de la obra. Como la mayoría de las normativas, daba respuesta a evitar errores en los casos ya ensayados, pero no ampliaba el conocimiento sobre el comportamiento del material ante situaciones inusuales (Fernández Ordóñez 1978).

En el caso del hormigón, como en el de otros materiales era la aplicación de un sistema ya ensayado previo, en este caso el del acero, el que se trasponía directamente sin que el material físicamente tuviera el mismo comportamiento.

Con relación a las deformaciones observadas en el puente de Le Veudre, Freyssinet, una vez que tuvo el convencimiento del comportamiento del hormigón y del error de los estudios de las circulares decidió, nuevamente, saltárselas. Sin dar aviso a ninguna otra autoridad, ayudado por operarios de su confianza, y sin detener el tráfico sobre el puente, colocó nuevamente los gatos sobre las claves de los puentes. Con los vehículos circulando volvió a elevar las claves con los gatos a su cota teórica y después impidió el movimiento de la articulación rellenando con hormigón dichas articulaciones, convirtiendo el arco en un arco biarticulado, tal y como había intuido en origen (Espion 2012).

Esta acción fue primera aplicación, del postesado, ya que evitaba los aumentos de tensión resultantes de la deformación en la línea neutra del arco. Aunque ya había utilizado los gatos para el descimbramiento en el puente de Praireal-sur Bresbe (Xercavins, Demathe, and Shushkewich 2010). En esta aplicación no se utilizan cables en conductos interior ni exteriormente, pero si anula los efectos de la tensión debidos a la carga muerta del hormigón aplicando una fuerza externa. Tuvieron que pasar 20 años más, antes de que se dispusiese de acero de alta resistencia para su utilización en un método específico para la construcción de un arco (Dinges 2009).

El puente del Boutiron era una réplica del puente del Veudre, si bien sus dimensiones son más modestas. Tras el recalce del puente del Veudre la ejecución del Boutiron estaba ya muy avanzada por lo que fijó las articulaciones de la clave de forma que se limitasen las deformaciones. Antes de finalizar el puente hubo una gran y rápida crecida del río. Debido a la esta crecida se desplazaron o arrancaron dos de los apoyos. Las cimbras resistieron pero con grandes deformaciones. Se colocaron unos apoyos para los gatos forzando a todos los puntos a volver a su posición original. Después se acabó de hormigonar con gran rapidez ante la amenaza de una nueva crecida, que finalmente tuvo efecto tras el hormigonado y provocó problemas en las cimbras,

pero no en los arcos.

Tras el endurecimiento de los hormigones, se desmontaron los encofrados y se revisaron las bóvedas, no constatando fisuras.

El último puente de los tres apalabrados por Mercier, el Châtel-de-Neuvre se finalizó tras la guerra. Con la experiencia acumulada en los puentes anteriores, en este puente Freyssinet macizó los tímpanos y suprimió las articulaciones de la clave (Fernández Ordóñez 1978).

Tras la realización de estos tres grandes puentes Freyssinet ya disponía de un conocimiento de los comportamientos anómalos del Hormigón, con respecto al conocimiento científico del momento, así como pruebas suficientes de la viabilidad de la aplicación de fuerzas en las estructuras para compensar otros sistemas de fuerzas. No obstante, todavía restaba depurar estas consideraciones a la luz de la ciencia y de la tecnología.

6.2.4 Perfeccionamiento de los medios auxiliares en grandes obras. Limousin 1914-1930

En esta etapa Freyssinet desarrollará obras excepcionales de la ingeniería tales como los Hangares de Orly o el Puente de Plougastel. Los conocimientos sobre el material se extienden también hacia las estructuras laminares, como en el caso de los Hangares de Orly. También adquieren una gran atención en su trabajo los medios auxiliares de las obras, que si bien siempre mostró interés en los mismos, la escala de los proyectos y el hecho de que era el responsable Técnico de la empresa, le hicieron profundizar en estos aspectos. Y por otra parte, se va afianzando en las posibilidades de la tecnología del pretensado que ensaya sobre diversos elementos como la propia cimbra del puente de Plougastel.

Durante la primera guerra mundial escaseaba el acero y era

prioritario encontrar personas que supiesen construir con hormigón, por tanto, los esfuerzos se aplicaron a perfeccionar el uso este nuevo material, se construyeron naves, barcos, cureñas de cañón. Freyssinet estaba a la cabeza de estas investigaciones, tanto por la variedad de sus obras como sus las técnicas revolucionarias que utilizaba y que, en esencia, se han mantenido vigentes (Fernández Ordóñez 1978).

En 1914 dejó el servicio público como ingeniero de los caminos vecinales, donde había conocido a Mercier, con el que había trabajado llegando a ser Director Técnico de la empresa Mercier, Limousin & Cie. Tras unos desencuentros con Mercier, fundó con el otro socio, Limousin, la sociedad Limousin & Cie, Procédés Freyssinet. Además tuvo que incorporarse al servicio militar durante el curso de la I Guerra Mundial.

En 1915, en las "Verreries du Centre" en Montluçon, Freyssinet proyecta la cubierta de un gran horno de vidrio de 30 m y que puede considerarse el anticipo de las bóvedas de Orly con sus bóvedas plegadas. También proyecta la acería de Caén que recuerda por sus proporciones (25-35 de anchura, 25 m de altura y 80 m de longitud) a una catedral gótica.

También en 1915 levanta en Avord, los primeros hangares de hormigón para aviones construidos en el mundo. Las bóvedas de cañón cerradas por puertas, arrancaban directamente del suelo y se rigidizaban por nervios exteriores. Repetiría esta solución en los hangares de Istres (Fernández Ordóñez 1978).

En estos años con Limousin, Freyssinet extiende la aplicación del hormigón armado a otras construcciones además de los puentes, lo que le da pie a ensayar otro tipo de técnicas auxiliares y profundizar en problemas anteriormente no tratados, como las estructuras laminares plegadas, la entrada de luz, etc.

6.2.5 El puente de Villeneuve-sur-Lot

El puente de Villeneuve-sur-Lot, de dos arcos paralelos de hormigón de 97 m de luz interrumpió su construcción debido a la guerra si bien se hormigonó para evitar dejar instaladas las cimbras, pudiendo descimbrar en 1915, se finalizó tras la guerra en 1919 y fue record en su género en el momento. Se trata de un puente de hormigón en masa. Estos puentes quedaron relegados a construcciones en arco, en situaciones de escasez de acero. Como en España tras la Guerra civil, donde se construyeron muchos puentes arco con bóvedas de hormigón en masa, denominados "puentes anacrónicos" por Carlos Fernández Casado. (Fernández Troyano 1999)

Sobre los arcos de hormigón se levantan arquerías de ladrillo visto que ocultan los montantes y arcos de medio punto de hormigón, sobre los que apoya el tablero. Las fábricas de ladrillo servían de encofrado al hormigón como en la construcción romana. En relación con la estética de este puente que reúne el ladrillo y el hormigón y que había sido una preocupación primordial de Freyssinet, J.A. Fernández Ordóñez dice que es "de una maestría digna de un Louis Kahn". Sobre el mismo Freyssinet declaraba que "En su conjunto, la decoración de la obra es muy simple, tiene un carácter netamente local, susceptible de armonizar con su entorno que es extremadamente bello y conviene respetar" (Fernández Ordóñez 1978).

Desde el punto de vista tecnológico, fue interesante la aplicación del descimbramiento por gatos, procedimiento que ya había utilizado en 1908 en el puente Le Veudre. En la clave de cada arco dispuso cuatro gatos de 500 To cada uno. Ello le daba tanto la posibilidad del descimbramiento como la corrección de las tensiones creadas por la deformación del arco debidas a su peso propio y a las que surgían debido a la retracción del hormigón. Busca en ello el mismo objetivo que con el pretensado crear un estado elástico que se adecúe a la forma final que había elegido.

Puente de Villeneuve-sur-Lot. Detalle (Fernández Ordóñez 1978, p. 95)

Puente de Villeneuve-sur-Lot (Fernández Ordóñez 1978, p. 93)

“En lugar de aceptar las consecuencias elásticas de la puesta en carga indirecta, se puede, como yo he hecho en Villeneuve, crear directamente en una bóveda un estado elástico escogido previamente por el constructor”. Como sostiene Fernández Ordoñez, se aprecia uno de los conceptos fundamentales del pretensado: “no aceptar los estados elásticos que aparecen al final de una construcción, y por el contrario, modificar a voluntad de estos estados iniciales por medio de fuerzas, creando deformaciones y tensiones previas independientes de los pesos propios y sobrecargas futuras de utilización” (Fernández Ordoñez 1978).

Einstein con su teoría, en 1915, abrió la posibilidad de que el tiempo no fuese una constante, sino que dependía de la velocidad, para Freyssinet, las posición final debida a las deformaciones podía ser modificada, corregida y mejorada por el estado tensional previo y el movimiento de las estructuras manejado a voluntad mediante gatos e introducción de fuerzas durante el proceso de construcción e incluso durante la vida útil de la estructura. Introduce así un particular concepto de “relatividad” en las estructuras.

Tras la guerra Freyssinet y hasta 1928 acomete una intensa actividad constructiva, realiza puentes, hangares, construcciones industriales, torres e incluso un barco.

Al igual que Kahn, al que citaba expresamente Fernández Ordoñez, Freyssinet también concibe la obra con un todo, no sólo en su expresión final, sino en la adecuación del proyecto enteramente a los medios de construcción y uniendo ésto a las necesidades establecidas de precios y plazos. Se consigue así una comunicación total de la obra con los medios constructivos dando lugar a formas nacidas enteramente de una necesidad tecnológica (Fernández Ordoñez 1978).

Es una visión más ingenieril de la construcción, al igual que en la comparación de Eduardo Torroja, del arco con la columna,

Bóvedas de arista. Hangar de Villacoublay (Fernández Ordóñez 1978, p. 101)

Primer hangar de Villacoublay (Fernández Ordóñez 1978, p. 295)

Hangar de Villacoublay (Fernández Ordóñez 1978, p. 325)

Puente de Candelier (Fernández Ordóñez 1978, p. 107)

decía que el arco es más técnica que la columna. Para construir un arco hace falta sostener todas y cada una de sus dovelas hasta colocar la clave, solo entonces entra en acción, no hay arco sin cimbra (Torroja Miret 2000).

A un nivel más mundano también dio lugar a que se ganasen con facilidad los concursos de construcción a los cuales se presentaba. Además le confería un control total de los elementos de la obra, desde los cálculos y diseños iniciales, los sistemas de control de las fuerzas, los medios auxiliares para la construcción de la forma y finalmente el estado de la forma final de la construcción.

6.2.6 Hangar en Villacoublay

Continúa sus investigaciones sobre cubiertas construyendo en 1919 un hangar para aviones en Villacoublay que disponía de una bóveda múltiple de aristas con una superficie interior libre de apoyos con dimensiones de 45 x 120 m.

Tras ello proyecto dos hangares más en la misma localidad que se finalizaron en 1925, estos dos hangares tenían una luz libre de 55 m, 50 m de profundidad y 12 m de altura. La cubierta de estos hangares eran una bóveda plegada mediante ondas de 1,64 m de anchura.

Estas obras le ofrecen a Freyssinet la posibilidad de enfrentarse a unos medios y sistemas de construcción diferentes de los de los puentes, con unos requerimientos también distintos en cuanto a la entradas de luz, acabados, rigidez estructural, forma en relación a los empujes, etc (Fernández Ordóñez 1978).

6.2.7 Puente Candelier

En 1921, construye un puente sobre el río Sambre, en Bélgica, el Puente Candelier, para el paso del ferrocarril. Fue record en la época con 64 m, y además en él utiliza las

Puente de Saint Pierre de Vauvray (Fernández Ordóñez 1978, p. 107)

Puente de Vauvray (Fernández Ordóñez 1978, p. 108)

Vista inferior del puente de Vauvray (Fernández Ordóñez 1978, p. 109)

articulaciones que posteriormente se denominaron articulaciones Freyssinet. En el puente soporta una fuerza de 700 To.

Es la primera vez que se resuelven estas luces con hormigón, con bóvedas ligeramente armadas y trabajando a compresión. El tablero quedó solidarizado con los arcos y los tímpanos se macizaron mediante tabiques de hormigón armado. Su construcción duró menos de un año. (Espion 2012)

En las articulaciones Freyssinet, se disponen dos masas de hormigón fuertemente armadas en las dos direcciones, perpendiculares a la dirección de la compresión, mediante una zona de pequeño espesor de hormigón sin ningún tipo de armadura que se comporta, cuando las dos partes giran, como "una masa líquida contenida en una envoltura inextensible, sin presentar nunca discontinuidades ni síntomas de desorden".

La armadura es la encargada de soportar los esfuerzos de tracción desarrollados en el hormigón debido al punzonamiento que producen las dos semi-articulaciones, una sobre la otra. La armadura paralela a las compresiones pretende evitar la separación accidental de las dos mencionadas semi-articulaciones en el momento de la ejecución de los arcos (Fernández Ordóñez 1978).

6.2.8 El puente de Saint-Pierre du Vauvray

En 1923 construye el puente de Saint-Pierre du Vauvray sobre el río Sena en París que con su arco en bowstring de una luz de 133 m será también record de luz en este tipo de puentes de hormigón, superando el construido en Minneapolis sobre el Mississippi de 120 m.

Eugenio Ribera, realiza un artículo sobre este puente para la Revista de Obras Públicas del año 1923, donde hace destacar las importantes obras realizadas por Freyssinet, como la del Puente de Villeneuve-sur-Lot o el Puente Candelier para

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Cimbra para el puente de Saint Pierre du Vauvray (Freyssinet 2011, <<http://photos.planete-tp-plus.com/index.php?/category/131>>, visto en 2013)

Proceso de cuelgue de las péndolas y cerchas. Puente de Saint Pierre du Vauvray (Freyssinet 2011 <<http://photos.planete-tp-plus.com/index.php?/category/131>>, visto en 2013)

Proceso de construcción del tablero. Puente de Saint Pierre du Vauvray (<http://photos.planete-tp-plus.com/index.php?/category/131>, visto en 2013)

el ferrocarril París-Berlín. En el puente de Saint-Pierre du Vauvray la intensidad de la navegación en esta zona del Sena aconsejaba la supresión de los apoyos intermedios del puente y la conveniencia de que la holgura entre las crecidas máximas y el tablero del puente fuese de 6,5 m (Fernández Ordóñez 1978).

La obra se constituía por dos arcos paralelos de los que se cuelga el tablero del puente. El arco se dispone empotrado para reducir los empujes sobre los apoyos. La curva del arco no está geométricamente definida, habiéndose marcado por tanteos para acercarla al antifunicular del peso propio. En ancho de los arcos es de 2,5 m y su altura varía desde los 2,5 m de la clave a los 5 de los arranques. El tablero cuelga de péndolas constituidas por grupos de barras de acero envueltas en hormigón y sólidamente ancladas en las paredes del arco. Las péndolas sostienen las viguetas del tablero de hormigón armado, fabricadas en taller sobre las que apoyan los moldes que constituían el forjado. El tablero tiene un ancho de 8 m entre barandillas, y se encuentra unido a los arcos en el encuentro con estos, aunque aparece un corte para permitir la libre dilatación.

Para la ejecución de este puente se estableció una cimbra de madera muy ligera constituida por varias series de puntales en abanico, que se apoyan en las márgenes y en 3 palizadas sobre el río.

Para montar todo este entramado se utilizó un transbordador eléctrico aéreo que se movía sobre un cable de 170 m de luz y 40 m de altura, que se soportaba sobre dos apoyos de madera. Este mismo aparato fue utilizado para el transporte del hormigón de los arcos, el cual se vertió muy fluido, apisonándose con martillos neumáticos. En la crónica de la ejecución de este puente se resalta el método de descimbramiento del puente levantando los arcos por encima de la cimbra en lugar de bajar ésta.

Para realizar esta operación se había dispuesto una junta

transversal en la clave y se separaban los dos paramentos de la junta por medio de gatos hidráulicos que actuaban horizontalmente hasta que el arco se comprime y se separa de la cimbra. En la junta abierta se disponían una cuñas compuestas por placas de mortero rico, armado con doble cuadrícula de aceros redondos de 5 mm., recubiertos de mortero fresco. Al aflojarse los gatos se comprimen estas placas y las bóvedas quedan al aire y en equilibrio. Este procedimiento permitía suprimir las cajas de arena para el descimbramiento, cuyo manejo resultaba más engorroso (Ribera 1923).

Posteriormente se realizaron otros puentes arco con tablero intermedio como el de Saint Pierre de Vauvray, pudiendo destacar el del Conflans-Fin-d'Oise sobre el ríos Oise, de 126 m de luz, construido en 1929 y destruido en 1940, el de la Roche-Guyon sobre el Sena de 161 m de luz construido en 1934 y también destruido en 1940; y el viaducto de la Méditerranée en Chaise-sur-Rhône, cerca de Lyon, sobre el Ródano, para ferrocarril de 124 m de luz, construido en 1950. Todos ellos construidos por la empresa Boussiron y los dos últimos con proyecto de Nicolás Esquillan (Fernández Troyano 1999).

Freyssinet observa que el hormigón es capaz de ofrecer los mejores resultados estructurales en bóvedas y arcos donde la compresión resulta más uniforme. Explica que este material no se adapta correctamente al trabajo a flexión sin la aplicación del pretensado (Espion 2012).

Durante toda su carrera Freyssinet investigó las deformaciones lentas de cementos y hormigones, así como todas las variables que influyesen en la utilización del pretensado. Discute las conclusiones de otros ingenieros como el inglés Faber y el americano Glanville, en relación a la reversibilidad de las deformaciones lentas y sobre la fluencia del hormigón. La fluencia sería la tendencia del material, específicamente en este caso del hormigón, de deformarse de forma lenta y permanente a través del

tiempo y mientras se encuentra en tensión (Dinges 2009).

Freyssinet demostró la reversibilidad parcial bajo determinadas condiciones higrotérmicas y las mostró en el Congreso de Lieja de 1930. En 1951, en relación con estas deformaciones, Freyssinet aseveraba que la deformación diferida sería la suma de una fluencia que entendía como la tendencia del sistema hacia un máximo de estabilidad, que puede aumentar bajo fuertes tensiones, y una fracción de deformación elástica que sería diferida debida a la humedad del hormigón por el efecto de la presión. La primera sería fundamentalmente irreversible, la segunda, por el contrario reversible. Sus estudios le llevaron a descubrir también en 1926 la variación con el tiempo del módulo de Young del hormigón en función de su resistencia y tensiones (Fernández Ordóñez 1978).

6.2.9 Los hangares de Orly

Los hangares de Orly, contruidos entre 1921 y 1923 fueron, según Fernández Ordóñez una de las indiscutibles grandes obras maestras de la arquitectura moderna llegando a compararlas con la Cúpula de la Catedral de Florencia de F. Brunelleschi (Fernández Ordóñez 1978).

Los hangares de Orly tienen una longitud de 300 m, con una altura de 60 m y salvan una luz de 90 m. Se disponen de forma parabólica y se vierte el hormigón mediante una cimbra que puede desplazarse paralelamente a sí misma, a través de unos railes, de manera que se construyen los arcos de forma sucesiva (Esteban García 2011).

Para Freyssinet aparecían dos categorías diferentes en cuanto a los resultados obtenidos en Orly, la primera sobre las edificaciones consideradas en sí mismas, y la segunda en relación a los medios de realización. A éstas le suma Fernández Ordóñez una tercera, la estética, donde el propio Freyssinet reconoce que resulta chocante el acercamiento entre la ausencia de intenciones

EL PRETENSADO

LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Hangares para dirigibles de Orly. (Freyssinet 2003 p. 97. Génie Civil de Paris (1, 3, 4, 7-8); Freyssinet (2, 5-6); Phototheque Française (9)).

Fotografía aérea de los hangares de Orly (Brefeill en Fernández Ordóñez 1978, p. 103)

artísticas y la potencia de los efectos obtenidos.

Lo he observado en numerosos visitantes, de toda cultura y diversas nacionalidades. Incluso aquellos que venían hostilmente prevenidos no han escapado a ésta sensación. Y no es debida únicamente a las desacostumbradas dimensiones de la nave; es, ante todo, una sensación de equilibrio, de armonía y de orden; una convicción espontánea que cada detalle es justo tal como debía ser, con una satisfacción de la sensibilidad idéntica a la que sentimos ante una obra de arte conseguida. ¿Como una emoción tal, de orden únicamente moral, puede resultar de la puesta en obra de medios mecánicos en fines exclusivamente utilitarios?(Fernández Ordóñez 1978).

Según Urbain Cassan citado por Fernández Ordóñez, Freyssinet "fue un prestigioso creador de formas; bosquejadas por su intuición, precisadas por el cálculo, pero jamás inspiradas por la moda: no resultaban más que de la función y de las posibilidades de los materiales. Por esto eran siempre puras, y por consecuencia, perfectamente bellas"

Al enfrentarse a los hangares de Orly, la empresa Limousin tenía ya experiencia en estos edificios para navegación aérea y también en edificios industriales. No obstante, era innegable la dificultad que residía en la magnitud de sus dimensiones que imposibilitaban la utilización de esquemas estructurales tradicionales. En esta obra se materializa la importancia que daba Freyssinet a la adecuación de las formas a los medios de ejecución con los que se cuenta. De hecho el proyecto presentado introdujo cambios sustanciales en el proyecto definitivo. Al respecto Freyssinet determinaba que el trazado de las formas supone el conocimiento previo de los medios de ejecución pese a que la lógica pueda dictar falsamente que primero se proyecta y luego se ejecuta (Fernández Ordóñez 1978).

Este conocimiento y control de los aspectos constructivos

Hangares de Orly. Interior (Rui Wamba 2003 p 129)

Hangar de Orly en proceso de construcción (Fernández Ordóñez 1978, p. 101)

Hangares de Orly. Arranques de la bóveda (Fernández Ordóñez 1978, p. 101)

que pudieran parecer más prosaicos, y que se ligan a la condición del proyectista como constructor paradójicamente ha dado como resultado en otros proyectistas también grandes obras, como las de Nervi, Tedesko o Candela.

En 1926 construye los hangares de Palyvestre, donde reemplaza las bóvedas plegadas por otras de medio cañón, y como el nervio exterior resulta insuficiente para una luz de 55 m proyecta un tirante y una triangulación interna. Los elementos de la triangulación sólo trabajan a tracción debido a la introducción de las deformaciones previas, de manera que se eliminan el peso de los elementos comprimidos.

Vuelve a aparecer aquí con toda su fuerza la idea del pretensado, presente ya en el descimbramiento por gatos y en la puesta en tensión de tirantes de bóvedas para naves industriales. En Palyvestre, además del tesado para descimbrar, "una vez hormigonada la bóveda se lleva el tirante a su forma poligonal definitiva, actuando en los nudos de la triangulación con ayuda de gatos. Terminado el reglaje, se coloca el acero de las diagonales y se hormigonan al tiempo tirante y diagonales" (Fernández Ordóñez 1978).

6.2.10 El puente de Plougastel

El puente de Plougastel, inaugurado en 1930, vendría a culminar la obra de Freyssinet en hormigón armado. Se convocó un concurso en 1922 para la construcción de un puente sobre el Elorn, para mejorar las comunicaciones entre Brest y el Sur del departamento de Finisterre, que se adjudicó a la empresa Limousin con proyecto de Freyssinet, con un presupuesto de 22 millones de francos.

El puente era de hormigón en su totalidad, por lo que la decisión sobre el concurso fue criticada por quienes defendían el uso de una solución más tradicional metálica. Además en el

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Puente de Plougastel. Vista aérea (Fernández Ordóñez 1978, p. 119)

Estribo en la margen derecha (Fernández Ordóñez 1978, p. 122)

Puente de Plougastel (Freyssinet en Guyon 2003, p. 11)

proyecto de Freyssinet incumplían algunas normas oficiales, que como se ha determinado anteriormente no resultaban correctas en cuanto la naturaleza y comportamiento real del hormigón armado.

El puente constaba de dos viaductos de acceso y tres arcos de 186,50 m de luz entre ejes. El tablero era de dos pisos, el superior de 6 m de calzada y dos andenes de 1 m y el inferior para una vía de ferrocarril de ancho normal (Fernández Ordóñez 1978).

Son destacables los medios de construcción empleados, entre ellos la cimbra de madera que resulta por si misma una estructura extraordinaria.

El puente se conformaba mediante tres arcos de gran luz y a una gran esbeltez de sus elementos. Esto confería a la obra una serie de dificultades que fueron solventadas con gran creatividad e interés tecnológico, lo que le han conferido un gran interés tanto a la obra como al resultado final. El intradós es un arco continuo y el trasdós es un arco poligonal, lográndose una arista curva mediante superficies alabeadas.

En los artículos de la época ya se recoge en este puente la introducción de deformaciones conocidas con objeto de minorar las condiciones elásticas de la estructura (Ochoa de Retana 1930).

Esta regulación puede hacerse, bien produciendo en algunos puntos, antes de concluir la obra, una flexión inversa a la que existirá una vez puesta en carga, o bien introduciendo unas fuerzas normales conocidas, aplicadas en puntos determinados.

El primer procedimiento, aplicado por E. Freyssinet a los arranques de los arcos, había sido empíricamente utilizado en algún puente de fundición de París, mediante la introducción de cuñas que rectificaran la directriz; últimamente, M. Baticle lo ha estudiado para reducir las fatigas originadas por contracción

EL PRETENSADO LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Planos de construcción. Puente de Plougastel (Freyssinet 2003, p. 85)

Ataguía cilíndrica para cimentación (Fernández Ordóñez 1978, p. 157)

Construcción de las pilas del puente y montaje de la cimbra en la orilla (Freyssinet 2010 <<http://www.anciens-cols-bleus.net/t10356p40-brest-ports-et-rade-volume-001>>, visto en 2013)

de fraguado mediante la introducción de cuñas de hormigón armado. Para la puesta en carga y rectificación del arco se han introducido unas fuerzas normales mediante 28 gatos hidráulicos, que, centrando la línea de presiones aumentan la resistencia del arco, existiendo de esta solución muchos ejemplos de aplicación corriente: el tensado de una sierra de mano, la compresión de los radios de madera en una rueda, el zunchado a presión de un tonel, la colocación de un puente de violín, etc. (Ochoa de Retana 1930).

6.2.11 La cimbra de Plougastel

Esta cimbra conforma una gran bóveda de 150 m de luz, reglada en cualquier dirección y hilos de acero tensados y con tablones de 4 cm de espesor. Se utilizó la misma cimbra para el hormigonado de las tres bóvedas, trasladándola mediante barcasas que hacían la función de apoyo flotante. Se ajustaban al lugar correspondiente mediante gatos.

Con el fin de disminuir el presupuesto de la cimbra dada su gran luz y los peligros de las corrientes y el oleaje con una profundidad de cimentación que alcanzaba a los 16 m en algunos puntos, se proyectó un arco muy flexible de madera atirantada mediante 80 redondos de 18 mm. La cimbra se debía colgar a unos 15,60 m del eje de la pila para que el tirante permaneciese fuera del alcance de las mareas. Para ello se construyeron unos arranques del arco donde se dispuso también un atirantado de estas ménsulas de apoyo, formado por dos planos de cables empotrados en el hormigón, que eran tensados mediante unos gatos (Fernández Ordóñez 1978).

La cimbra se conformaba por ocho arcos atirantados de celosía en cruces de San Andrés, cuyo intradós se constituía por grupos de dos tablones mientras que el trasdós se formaba con tablones adosados que se disponen formando el arco continuo. La escuadría de todas las piezas era la del tablón comercial del

EL PRETENSADO

LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Dispositivo de puesta en carga en los arranques de los arcos (Fernández Ordóñez 1978, p. 148)

Colocación de la cimbra del tablero (Fernández Ordóñez 1978, p. 127)

Arrenque de los arcos, construido por voladizos sucesivos (Fernández Ordóñez 1978, p. 149)

Cimbra del tablero terminada (Fernández Ordóñez 1978, p. 127)

Cajón de hormigón armado para cimentación (Fernández Ordóñez 1978, p. 333)

momento 3 x 9 pulgadas. Las uniones, como ya se ha mencionado anteriormente se realizaron con clavos de diversas longitudes entre 16 y 35 cm y diámetro 10 mm. El arriostramiento se constituía en el trasdós por dos entarimados de 18 mm elevados a 45 ° con el eje y otro análogo en celosía en el intradós (Fernández Ordóñez 1978).

La cimbra dispone de un tirante realizado mediante redondos de una sola pieza fija en uno de los extremos y provista de gatos hidráulicos en el otro que permitían la rectificación del arco dentro de unos márgenes. Todo ello en la certeza de Freyssinet de poder controlar la geometría de las estructuras mediante la introducción de esfuerzos en las mismas. En esta cimbra ya se hace patente el principio del pretensado en una estructura de madera.

El sistema de aplicación de fuerzas normales en la clave ya había sido anteriormente descrito por Freyssinet en los artículos que correspondían al puente de Villeneuve-sur-Lot. Ochoa de Retana que relata los pormenores de la obra para la Revista de Obras Públicas en 1930 hace destacar la ingeniosidad de estas soluciones, si bien también llama la atención sobre la delicada ejecución de las mismas. Observa dicho autor, además que para la resolución de estas estructuras se realizan una serie de hipótesis simplificadoras, necesarias en los cálculos que hacen dudar del grado de aproximación de los resultados y preferir soluciones menos teóricas, tan seguras y tal vez más económicas, a pesar de una mayor cantidad de obra y peor distribución de las fatigas "E. Freyssinet ya indica las grandes discrepancias obtenidas para la cimbra entre los resultados experimentales y de cálculo" (Ochoa de Retana 1930).

Lo cierto, es que el mismo Freyssinet demostrará más adelante que eran los cálculos los que no se ajustaban a la realidad y no que las simplificaciones que se hubiesen tomado fuesen negativas para el desarrollo de los mismos.

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Lanzamiento de la cimbra, flotando sobre las barcazas. Puente Plougastel
(Fernández Ordóñez 1978, p. 334)

Colocación de la cimbra en el primer arco. Puente Plougastel (Fernández
Ordóñez 1978, p. 334)

Hormigonado del primer arco. Plougastel (Fernández Ordóñez 1978, p. 335)

Traslado de la cimbra del primero al segundo arco. (Fernández Ordóñez 1978,
p. 335)

Una vez contruidos los arranques de los arcos en ménsula, se fue trasladando la cimbra mediante dos barcazas de hormigón armado con cabestrantes que enrollaban los cables de maniobra que estaban fijos en boyas.

Las cimbras se izaron y sujetaron mediante unas eslingas colgadas de unas torres de madera construidas a cada extremo de las ménsulas. Las eslingas se conformaban mediante dos grupos de 64 redondos de 10 mm. (Fernández Ordóñez 1978)

La cimbra se accionaba mediante gatos pudiendo modificar la forma de ésta dentro de unos límites, por lo que la estructura de la cimbra se puede considerar por si misma una estructura pretensada con una forma controlada a través de la introducción de fuerzas a voluntad. De hecho se le dio a la cimbra una contraflecha de 16 cm. Además en los arranques de la cimbra se introdujo un momento flector inverso al que producía el hormigonado del arco.

El empuje horizontal era transmitido a una zona resaltada de unos 30 cm en el intradós de los arranques, mediante 18 pilares de hormigón de los cuales la mitad disponían de zuncho para proceder al descimbrado proyectado.

Debido a la flexibilidad de la cimbra no se podía utilizar el método de apertura del arco que fue adoptado en el puente de Villeneuve-sur-Lot. Por ello, se optó que la cimbra descendiese demoliendo los 9 pilares que no estaban zunchados. Variando la presión de los gatos se produjeron movimientos de la cimbra con objeto de despegarla del intradós del arco. Al mismo tiempo, se picaban los pilares que quedaban con zuncho, sin cortar estos que actuaban de alguna forma como un muelle absorbiendo la energía de deformación del empuje de la cimbra.

Tras el descimbramiento del arco, se introdujeron en la clave mediante gatos hidráulicos las fuerzas normales proyectadas, retacando posteriormente la junta abierta. Se conservaron las

Construcción de la cimbra en la orilla. Puente de Plougastel (Fernández Ordóñez 1978, p. 333)

Esquema de suspensión de la cimbra. Puente de Plougastel (Fernández Ordóñez 1978, p. 336)

Apoyo de hormigón armado de la cimbra sobre la barcaza (Fernández Ordóñez 1978, p. 336)

Desplazamiento de la cimbra flotando en el río (Fernández Ordóñez 1978, p. 119)

cavidades para alojar los gatos para poder rectificar la forma si fuese preciso (Ochoa de Retana 1930).

6.2.12 El andarivel de Plougastel

Otro medio auxiliar significativo en esta obra es el andarivel de unos 700 m de luz entre apoyos. Había observado Freyssinet que el rendimiento de estos transbordadores descendía si se realizaban las maniobras desde los extremos y las distancias eran largas, por lo que Freyssinet pretendía que el conductor se desplazase en la cabina junto con los materiales a transportar.

Ante la solicitud de Freyssinet diversos especialistas tanto franceses como de otros países declararon irrealizable el proyecto, por cuya razón el mismo Freyssinet tomó la iniciativa de construir él mismo los dos andariveles transbordadores gemelos que se preveían para la obra.

Cada transbordador disponía de dos torres de madera de 55 m de altura, una de las cuales era oscilante. Al igual que en la cimbra, en estas torres las uniones eran clavadas para conferir una mayor rigidez en los nudos y conseguir una mayor esbeltez (Fernández Ordóñez 1978).

6.2.13 Otras técnicas del puente de Plougastel

También crea y aplica en esta obra la técnica de los voladizos sucesivos de hormigón, que avanzan a cada lado simétricamente de las pilas con ayuda de encofrados deslizantes equilibrando los voladizos a ambos lados mediante tirantes en tensión, técnica que posteriormente combinará con la prefabricación. Descubre aquí también el anclaje del cable por adherencia al hormigón, con lo que resuelve el problema de fijar los cables del andarivel a las orillas. El puente de Plougastel pone el punto final a las grandes obras del hormigón armado y da paso al hormigón pretensado (Fernández Ordóñez 1978).

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Alzado de la cabina del andarivel para el puente de Plougastel (Fernández Ordóñez 1978, p. 332)

Cabina del andarivel (Fernández Ordóñez 1978, p. 332)

Cabrios de soporte del cable del andarivel (Fernández Ordóñez 1978, p. 332)

Mástil de soporte del cable andarivel (Fernández Ordóñez 1978, p. 138)

Anclaje del andarivel (Fernández Ordóñez 1978, p. 168)

Posteriormente, en 1934 se construirá con proyecto de Freyssinet el puente de Traneberg en Suecia, con 178,50 m de luz utilizando los métodos del puente de Plougastel, record de luz en puentes de hormigón hasta 1942 con la construcción del puente de Martín Gil sobre el Esla (Fernández Ordóñez 1978).

En 1929 abandona la empresa Limousin para desarrollar la idea del pretensado. Plougastel puede considerarse la primera estructura pretensada, ya que termina mediante el pretensado de la clave de los arcos, como ya hizo Freyssinet en Le Veudre, y además pretensa el propio encofrado de hormigón (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

6.2.14 La aplicación de la técnica del hormigón pretensado. Patente de Freyssinet

En un momento álgido de su carrera, con reconocido prestigio y habiendo batido varios records en relación al hormigón armado a lo largo de la misma, Freyssinet decide destinar todos sus esfuerzos al desarrollo del hormigón pretensado, con un futuro incierto, en esa época. Aplica esta técnica, para su comercialización, para la construcción de postes eléctricos, un producto en principio no muy apropiado para obtener los máximos beneficios de la misma. Como resultado es capaz de producir unos magníficos postes eléctricos que no tendrán apenas salida en los mercados. Todo ello parece apuntar al fracaso de la nueva tecnología. No obstante, aparece una situación desesperada en la que la aplicación de los desarrollos y conocimientos llevados a cabo para la prefabricación de postes se ponen al servicio de evitar el colapso de la Estación Marítima de Le Havre.

Así, el 2 de octubre de 1928, junto con Jean Séailles (1883-1966), Freyssinet presenta una patente sobre "la fabrication de pièces en béton armé". En esa patente ya marca que para maximizar la economía del proceso, es apropiado utilizar hormigón de alta resistencia a la compresión así como de aceros con alta

resistencia y límite elástico. La patente se concede el 22 de enero de 1930 y se publica el 1 de mayo de ese mismo año. A la patente se siguen dos aplicaciones una que describe la técnica del postesado que presenta el 19 de noviembre de 1928, y otra es la mejora de los anclajes que presen tal el 9 de marzo de 1929 (Espion 2012).

En Octubre de 1928, tras presentar la patente del hormigón pretensado, Freyssinet toma la decisión de dejar la empresa con Claude Limousin después de 15 años de colaboración exitosa realizando las obras de hormigón más importantes del mundo tras la I GM.

La patente se denominó "Método para la producción de elementos de hormigón armado", y fue concedida el 22 de Enero de 1930. Como ya se ha reflejado anteriormente, el término pretensado surge al patentar el invento en Alemania el 6 de abril de 1929 donde se denomina "Método para la producción de acero reforzado en elementos de hormigón pretensado con barras rectas de refuerzo" (Grote and Marrey 2000).

Esta decisión, para Fernández Ordoñez no es una súbita inspiración, sino el resultado de un proceso mental elaborado a lo largo de muchos años de aproximaciones, 25 años antes es cuando concibe la posibilidad del pretensado después de ver las ménsulas de hormigón de Rabut en París. En esta obra Rabut había dejado las armaduras sin hormigonar en las zonas donde preveía más fisuración y mientras placas y tuercas habían tensado las armaduras y hormigonado posteriormente. No obstante no volvió a utilizar esta idea en otros ensayos. A partir de este momento, en la creación de las obras de esta etapa de Freyssinet se contempla como idea germinal o subyacente la creación de tensiones previas para el dominio de la forma final de la materia (Fernández Ordóñez 1978).

Como la mayoría de las ideas creativas y novedosas, el

EL PRETENSADO

Gato de pretensado. Dibujo de Freyssinet (Fernández Ordoñez 1978, p. 197)

Patentes varias de hormigón pretensado. The Military Engineer, enero/febrero 1952, núm. 297, pág. 24. Technische B/iitter der Wayss & Freytag A.G., 1951, págs. 15 a 22 (Moell 1958, p. 98)

pretensado no fue aceptado fácilmente, de hecho, el propio Limousin no podía entender que abandonase una exitosa carrera por una idea que a su modo de ver no tenía visos de consolidarse. Una vez se hubo consolidado, las naciones pugnaban por hacerse merecedoras de la invención, bien con otras patentes que no habían conseguido el desarrollo apropiado, bien con estudios previos tendentes a restarle mérito a la aportación de Freyssinet. Los tiempos también resultaban propicios a ello, siendo etapas prebélicas y bélicas con el nacionalismo exacerbado.

Algo similar sucedió anteriormente con el hormigón armado, que fue el invento de un campesino, Louis Lambot en 1849, patentado por el ingeniero Joseph Monier en 1867 y mejorado por un albañil Francoise Hennebique, (patentes de 1892) fue considerado entre la élite como un absurdo elástico, que entendían que era una curiosidad de aficionados. Los alemanes, con una mentalidad más abierta y/o práctica por lo que Wayss y Freitag compraron la patente de Monier (Grote and Marrey 2000).

En 1930, las ideas de Freyssinet habían interesado a Karl Mautner (1881-1949) profesor en Aquisgram y miembro de la empresa Wayss & Freytag. En 1933 construyó en Frankfurt con planos de Freyssinet una viga experimental de hormigón pretensado de 20 m de luz, como modelo a escala para una viga de 60 m de luz, donde se utilizaría la tecnología de pretensado pretensado.

El pretensado de esta viga se realiza con hilos de 5 mm que se estiran hasta una tensión de 550 MPa sujetándolos posteriormente al molde. La resistencia a compresión del hormigón era de 20 MPa a las 6 h y 39 MPa a los 28 días. El valor de la tensión previa tras las pérdidas se estimó en 390 MPa. La viga se sometió a diversas pruebas de carga a corto plazo y posteriormente se puso en servicio al 60 % de la carga. La carga de rotura que arrojó era de 2,3 veces el peso de la carga de servicio. Posteriormente se hizo una segunda viga experimental que se probó en Desde en 1936. Tras dichas pruebas se realizó

LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Dibujo de Freyssinet. Anclaje de pretensado (Fernández Ordóñez 1978, p. 196)

en 1938 un puente de 32 m de luz construido por la empresa Ways & Freytag en Oelde, siendo también de tipo pretensado (Espion 2012).

La utilización del hormigón pretensado se extendió rápidamente desde 1935 en adelante y muchos puentes largos construidos entre 1945 y 1950 en Europa y EEUU. Durante los últimos 25 años, el hormigón pretensado se ha extendido ampliamente en la construcción de los puentes de luces largas, en las cubiertas industriales, estructuras marinas, centrales nucleares, almacenes, estructuras para depósitos de agua, traviesas de hormigón, postes de telecomunicaciones y diversas estructuras. En palabras de Guyon : "Probablemente no hay ningún problema estructural al que el pretensado no pueda proporcionar una solución, y a menudo una revolucionaria. El pretensado es más que una técnica, se trata de un principio general."

Freyssinet entendía que el hormigón armado sólo tendría futuro en las grandes obras si se utilizaba estrictamente a compresión, lo que explica su devoción por las soluciones en arco para las grandes luces con las que se enfrentó, bóvedas poco o nada armadas longitudinalmente, que seguían la gran tradición de las obras de fábrica francesas del XVIII y XIX Y que no eran sino "un desarrollo de las imaginadas medio siglo antes por Sejourné". El mismo nos dijo al final de su vida que en toda su obra anterior a 1930, lo que equivale en realidad a su inmensa obra en hormigón armado, la relación de las cargas soportadas por vigas rectas a la aportada por las bóvedas debía ser del orden de algunas centésimas. El hormigón armado en grandes vigas, pensaba Freyssinet, ofrece soluciones irracionales y particularmente respecto a la resistencia a los cizallamientos repetidos, "hacen temer mucho por el porvenir de las obras" (Fernández Ordóñez 1978).

Postes huecos pretensados (Fernández Ordóñez 1978, p. 186)

Fábrica de Montargis. Armaduras sobre el molde (Fernández Ordóñez 1978, p. 193)

Fábrica de Montargis. Abrazaderas de sujeción del molde (Fernández Ordóñez 1978, p. 195)

Semimolde con armaduras tesadas (Fernández Ordóñez 1978, p. 196)

6.2.15 Primera aplicación industrial del pretensado. Fabricación de postes eléctricos

Una vez entregada para la tramitación la patente del pretensado, Freyssinet se dedica a buscar aplicaciones prácticas para su invención. La primera oportunidad que se presenta es la de desarrollar postes para la fabricación de postes eléctricos, dado que se preveía una expansión rápida de la infraestructura eléctrica. El primer concesionario de la patente fue la sociedad Forclum, que dispuso todos los medios para realizar las investigaciones pertinentes en una fábrica piloto en Montargis. Esta aplicación no resultaba la óptima para la utilización del pretensado, sin embargo Freyssinet consiguió obtener unos postes de una altísima calidad, que, no obstante, no tuvieron una gran acogida en el mercado, por exceder las prestaciones inicialmente solicitadas y no resultar competitivas en aquel momento. A ello se unió la grave crisis de la industria electricista. Todo ello llevó a Freyssinet a la ruina económica en 1933 (Espion 2012).

Según M. Laurens, de Forclum, los postes pretensados que fabricó Freyssinet en 1933 fueron los mejores que nunca se fabricaron en Francia. Incluso hoy día, con numerosas empresas fabricando postes para líneas eléctricas, puede que no se consigan postes de aquella calidad. Dos postes de los fabricados por Freyssinet en Montargis se ensayaron entonces a un millón de veces en flexiones alternativas a su carga de trabajo; pueden verse colocados en perfecto estado, sin ninguna fisura (Fernández Ordóñez 1978). Los postes disponían de un 40% menos de peso, requerían un tercio del acero que un poste convencional y resistían cargas de repetición que hacía colapsar a los postes normales en una hora. Pero el negocio era ruinoso y la línea de producción inútil (Grote and Marrey 2000).

Si bien la aplicación no obtuvo la respuesta esperada, estos años dedicados al desarrollo del producto y la investigaciones fueron fundamentales en el desarrollo del producto posterior,

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Estación marítima del Havre en 1933 (Fernández Ordoñez 1978, p. 203)

Fachada de la estación marítima del Havre (Fernández Ordoñez 1978, p. 203)

en lo relativo a la realización de los curados de las piezas, la fabricaciones de moldes, la calidad del hormigón, etc. Expone todas las ideas que había estado recabando de su experiencia con los postes eléctricos en una artículo titulado "Idees et voies nouvelles", en dicho artículo establece la imposibilidad de aceptar grandes alargamientos elásticos en las armaduras de hormigón armado, las posibilidades teóricas que ha encontrado en cuando a la independencia de las deformaciones del hormigón y el acero debidas a las tensiones internas en el material hormigón armado (Fernández Ordóñez 1978).

Por primera vez se publica en el mundo una teoría elaborada del pretensado, precontrainte, palabra que inventa Freyssinet en este escrito, así como las condiciones prácticas de empleo de los pretensados, especificando con gran detalle su experiencia de Montargis. A partir de esta publicación todo cuanto escribe Freyssinet estará íntimamente relacionado con el pretensado (Fernández Ordóñez 1978).

6.2.16 La salvación de la tecnología del hormigón pretensado. Le Havre

Tras la fallida experiencia económica, (que no técnica) de la aplicación del pretensado a los postes eléctricos, aparece una ocasión histórica para comprobar los beneficios de la aplicación de la técnica del pretensado con un trabajo que además conseguirá una enorme repercusión mediática para esta tecnología. En la primavera de 1933 se completaron los trabajos estructurales de la construcción de la terminal de pasajeros de la Estación marítima de Le Havre, un edificio de unos 600 m de longitud por 45 m de anchura proyecto del arquitecto Urbain Cassan y de Louis Plousey. Este comenzó a asentar parcialmente sin remedio en la parte del edificio que cimentaba sobre una capa de limos de unos 30 m. la velocidad de los asientos resultaba muy alarmantes, de unos 25 mm al mes, y prácticamente desde el inicio de las obras. La construcción amenazaba su inminente colapso, por lo

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Coupes longitudinale et horizontale partielles
d'une poutre longitudinale de liaison.
(En blanc, les anciennes fondations; — en hachuré les nouvelles fondations.)

Cimentaciones de la estación marítima del Havre (Espion 2012, p. 10)

Sección longitudinal de la cimentación mostrando el recalce realizado por Freyssinet (Espion 2012, p. 10)

que había de detenerse el movimiento del edificio y restaurar la forma original de proyecto (Fernández Ordóñez 1978).

La estructura estaba cimentada a diez metros de profundidad en las zonas que asentaban y a treinta metros en otras donde apenas se producían. La diferencia de estos asientos producía deformaciones tan espectaculares que "parecía inminente un derrumbe total". El complejo edificio, finalizado en el verano de 1933, tenía varios pisos previstos para ser cargados con 2.500 kg/rn", salas inmensas con techos muy altos y una torre de 80 m. de altura. Era un conjunto monumental digno del Normandie, orgullo de Francia, para cuyo exclusivo servicio había sido construido como puerto de atraque.

El edificio además representaba, en esta etapa posbélica y prebélica la fuerza de la tecnología y poder de la nación francesa, dado que se utilizaba como embarque y desembarque de los pasajeros del buque "Normandía", insignia de la flota de la Compagnie Générale Transatlantique.

El director de Ferrocarriles del Estado francés y responsable de la sección de Le Havre había conocido a Freyssinet y se comunicó con él para comentarle el inminente colapso. Le Havre era una situación desesperada pero una oportunidad para que Freyssinet recuperase la confianza en su trabajo y en sí mismo (Grote and Marrey 2000).

La cimentación del edificio, en una zona muy delicada no se había realizado con la atención requerida y la atención sobre el hundimiento impulsaba la utilización de medidas rápidas y audaces, como las que aportaba Freyssinet. Las experiencias recabadas en la fábrica-laboratorio de Montargis son fundamentales para producir un desarrollo positivo del recalce en un breve plazo (Fernández Ordóñez 1978).

Su propuesta implicaba la realización, en un plazo

Sección transversal del nuevo muelle y sección longitudinal por el tablero del puente (Moell 1958, p. 119)

Hincamiento de pilote (Espion 2012, p. 11)

cortísimo, de unos procedimientos tan complicados que ponían en obra al menos "veinte ideas nuevas que no habían sido objeto hasta entonces de estudios o de experiencias previas. No solamente el fracaso de uno solo de estos nuevos medios, sino el simple retraso de la puesta a punto de uno de ellos, podía significar un fracaso del que yo tendría toda la responsabilidad. Todo día de retraso agravaba el peligro. Una noche la tempestad derribó una pared y los guardias, espantados, huyeron difundiendo la noticia, felizmente falsa, del derrumbamiento de los edificios". Pero el proyecto de Freyssinet, por audaz que fuese, era el único que podía sacar a aquellos funcionarios de la ignominia. "Fue entonces cuando presenté un proyecto de consolidación basado en múltiples aplicaciones de la idea general de la tensión previa y en el empleo de los métodos creados en Montargis, pero en condiciones de aplicación muy diferentes. El éxito significaba por consiguiente el triunfo, a muy corto plazo, de gran cantidad de métodos que no habían sido nunca utilizados en la forma en que se les iba a emplear, y de muchos otros que habría que crear desde la A hasta la Z. Con el agravante de que un retraso debido al menor fracaso parcial podría echar a perderlo todo (Fernández Ordóñez 1978).

Así, Freyssinet propone una novedosa solución que consistía principalmente en tres largas vigas pretensadas que insertaba por debajo de la estructura sosteniéndolas con pilares adicionales. Cuatro meses después del inicio de la consolidación los asentamientos, con la colocación de la cuarta parte de los pilotes previstos y cosiendo las zapatas con acero pretensado, cesaron de producirse en las zonas más alarmantes, era a finales de 1934 y se podía considerar que la Estación marítima se encontraba fuera de peligro. Los asentamientos máximos registrados se encontraban en unos 46 cm. Una vez rehabilitada la cimentación, el trasatlántico Normandía puede realizar su primer viaje el 23 de mayo de 1935 y con él comienza también la expansión de los procedimientos del pretensado del hormigón y de una nueva etapa del trabajo de E. Freyssinet.

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Esquema de fabricación e hincado de pilotes pretensados (Fernández Ordoñez 1978, p. 209)

Cabeza del pretensado horizontal de los atados de cimentación (Fernández Ordoñez 1978, p. 205)

En esencia la solución de Freyssinet consistió en formar, con los antiguos macizos de las cimentaciones y con nuevas zapatas hormigonadas entre aquellos, elementos horizontales monolíticos rígidos de gran longitud, pretensados con tirantes exteriores a los macizos, por medio de gatos hidráulicos y dos cabezas de anclaje de hormigón armado donde se introducían y daban la vuelta los cables de hilos paralelos. Una de estas cabezas se desplazaba por medio de los gatos con una fuerza de hasta 1.000 Tn. apoyándose contra el primer macizo. La ligación entre los antiguos macizos y los nuevos quedaba asegurada únicamente por la compresión general del conjunto. Después de la tensión se acuñaba la cabeza de anclaje móvil hormigonando los espacios libres, se recuperaban los gatos y se recubrían de hormigón los hilos que formaban los cables para protegerlos de la oxidación. En estas grandes vigas se disponían alvéolos cilíndricos a través de los cuales se hincaban pilotes hasta las graveras. Los pilotes huecos cilíndricos se hincaban por pequeños trozos huecos prefabricados y se pretensaban junto con el hormigón vertido in situ en el núcleo con un procedimiento parecido al de los postes de Montargis, ya continuación se apoyaban contra las grandes vigas por medio de gatos hidráulicos, con pretensado verticales de 320 Tn., solidarizándose con ellas. La rapidez de ejecución le exigió prefabricar estos trozos con curado al vapor, mientras se iban hincando los precedentes. Mediante este triple procedimiento de pretensado que uniformaba los asientos, Freyssinet retrasaba los más peligrosos mientras rápidamente hincaba los pilotes.

A ello hay que sumar la enérgica vibración del hormigón, un método, que si bien era conocido desde 1919, era poco utilizado. El agua que resultaba sobrante se conducía a través de ranuras en los moldes, se conseguía drenar esta agua inflando una manguera de agua en el centro del molde con agua a presión. A continuación el molde se calentaba a 100° con vapor. Finalmente la estructura se empujaba mediante gatos contra los pilotes hasta el nivel previsto (Grote and Marrey 2000).

Se utilizan para la realización de la obra de rehabilitación de la cimentación tres tipos de pretensados (Fernández Ordóñez 1978):

1. Precompresión de masas de hormigón de antiguas y nuevas zapatas, previamente endurecidas, por medio de cables tensados independientes a dichas masas, formando grandes vigas horizontales pretensadas y utilizando una cabeza de anclaje móvil.
2. Barras pretensadas, ancladas previamente al hormigonado, solidarizadas por adherencia al hormigón después de su fraguado, en la construcción de los pilotes.
3. Pretensados obtenidos sin armaduras con la puesta en carga de los pilotes contra los elementos horizontales.

Es difícil de prever la dirección que hubiera tomado esta tecnología del pretensado si la sociedad Forclum hubiese tenido el esperado éxito comercial que preveía, en relación con los postes eléctricos pretensados. Es posible que en este caso la misma hubiese quedado reducida a una aplicación más particular para un tipo de producto. Es probable incluso que Freyssinet no hubiese arriesgado una posición acomodada en una aplicación audaz de métodos sin una previa aplicación. Por otra parte, si la necesidad de una solución creativa y rápida no hubiese sido tan perentoria y desesperada, tampoco resulta probable que le hubiesen concedido una libertad así para aplicar sus nuevos métodos. A todo ello, se le unió una promoción inigualable tanto a sus productos como a él mismo. Como en otras ocasiones en la Historia se dio una coincidencia de circunstancias que favorecieron la apertura de nuevos caminos tecnológicos. Freyssinet, cuenta así la emergencia de la traslación de su tecnología desarrollada a la sociedad y la recuperación con ello de su confianza en sí mismo (Fernández Ordóñez 1978):

Había asumido un riesgo terrible -dijo Freyssinet- pero al precio de este riesgo, había dado a la construcción pretensada una magnífica e indiscutible referencia. Había roto el círculo infernal donde se encuentran encerrados los innovadores, sobre todo en materia de grandes trabajos donde toda innovación pone en juego profundas responsabilidades, pidiéndose siempre referencias y el ejemplo de una obra anterior.

Con todo, la aplicación de la tecnología del pretensado en la Estación marítima de Le Havre no resulta ser la clásica para la construcción y para la que inicialmente se realizó la patente de 1928, que sería la de las vigas pretensadas. No obstante atrajo la atención de ingenieros, y visitantes de toda clase, entre los que se encontraba el constructor Edme Campenon (1872-1962), director de la empresa Campenon Bernard.

El buque Normandía pudo dejar la estación marítima el 29 de mayo de 1935, constituyendo un triunfo para la nación francesa. El éxito fue tal que Fritz Leonhardt, en 1943, siendo oficial de Hitler en la Organización Todt, viajó estando en servicio activo hasta París para asistir a una conferencia privada de Freyssinet.

En 1944 la estación quedó destruida por los bombarderos aliados, en su reconstrucción, se encontró que la cimentación seguía siendo apta, por lo que se construyó un nuevo edificio sobre ésta (Grote and Marrey 2000).

6.2.17 Desarrollo y Madurez del Hormigón Pretensado. Edme Campenon

En esta última etapa de Freyssinet se asocia con el empresario Edme Campenon que le ofrece seguir desarrollando la tecnología del hormigón pretensado poniendo los medios técnicos y humanos necesarios a su disposición. Desarrollarán las diversas técnicas del pretensado en muy diversos campos, como presas, tuberías, puentes, diques, tablestacas,... casi todos los campos de

la obra civil. Durante la guerra el trabajo resulta más complejo en muy diversos aspectos en tanto que debe seguir desarrollándose, pero no quieren beneficiar a los alemanes (Eugene Freyssinet 2003). Aún así, en estos años desarrollará la tecnología necesaria para la construcción de puentes por dovelas prefabricadas, culminada por el Puente de Luzancy y sus puentes réplica.

Tras ver los trabajos de recuperación de la estación marítima de Le Havre, Edme Campenon ofrece a Freyssinet un acuerdo de colaboración exclusiva. El empresario se ocupa de las cuestiones económicas relativas a las pruebas y ensayos de Freyssinet que recupera su laboratorio de Besons y crea un equipo de colaboradores a los que transmite su pasión por el pretensado. En 1936, Freyssinet participa en el segundo congreso de la Asociación Internacional de Puentes (Berlín-Munich), donde se reúnen unos 1200 congresistas de todo el mundo, entre los cuales se encuentran 600 ingenieros alemanes. Ante ellos, Freyssinet explica sus procedimientos para salvar la estación marítima de Le Havre recibiendo una cálida ovación (Fernández Ordóñez 1978). En el mismo año, 1936 publica su libro "une révolution dans techniques du béton" (Espion 2012).

6.2.18 Puentes de Freyssinet durante la ocupación alemana

En el primer puente de la Francia ocupada, el Elbeuf-sur-Andelle en Rouen, en 1942, con una luz de 10,50 m. En el, Freyssinet pudo probar el funcionamiento de sus conos de anclaje de hormigón, desarrollados en 1939. Además acercándose a su ideal de eliminar la totalidad de las fisuras utilizó el pretensado en las tres dimensiones, tanto el pretensado postesado longitudinal con tendones curvos, como unos pretensados transversales (Grote and Marrey 2000).

Los cables se empaquetaron en grupos de 10 o 12 elementos que se tensaron y anclaron al mismo tiempo contra el hormigón

endurecido. Los cables no se adhieren al hormigón hasta después del tesado cuando se añade una lechada, para lo que se recubrieron con asfalto. Así se consigue evitar las camas de pretensado y lo que era más ventajoso permitía las formas curvas en los tendones de pretensado adecuándose mejor a la distribución de tensiones.

Este puente es el primer puente con pretensado curvo y transversal, ya que en ese tendido disponía de tendones rectos de la misma clase. En lo que respecta a la no adherencia al hormigón existía una patente alemana de Richard Farber de 1927 y concedida en 1932, que proponía la utilización de parafina o un revestimiento con metal o papel con el fin de permitir posteriormente el pretensado contra el hormigón endurecido (Grote and Marrey 2000).

En 1943, se realizó un puente losa de 20 m de luz sobre el río Bresle en Longroy cerca de Le Trèport, con el mismo método que el anterior, aunque pretensando en tres etapas. Freyssinet calentó los cables con una corriente de baja tensión para reducir la fricción, de esta forma evitaba el uso de betún caro, escaso y de alta fricción.

En la primavera de 1942, se ordena la construcción de un puente peatonal de dos vanos sobre la vía del tren al norte de Lens con luces de 30 y 31 m, que fue completado en abril de 1944. Las luces y disposición de las vigas venían impuestas por el asentamiento minero (Grote and Marrey 2000).

Estos tres puentes de hormigón pretensado, diseñados por Freyssinet, no los realizó la empresa de Campenon Bernard, sino por la empresa que colaboraba con los alemanes. La empresa Saainrapt & Brice, pudo desviar tanto cemento como acero destinado a la construcción de Muro Atlántico, para la realización de estas obras y otros propósitos.

Se debe señalar que las construcciones del Muro Atlántico

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Presa de Portes-de Fer sobre el Oued-Fodda (Espion 2012, p. 13)

Oued-Fodda, sección transversal de la presa (Grote and Marrey 2000, p. 23)

Vista sobre la presa del rebosadero (Grote and Marrey 2000, p. 24)

Vista del rebosadero desde aguas abajo (Grote and Marrey 2000, p. 25)

necesitaron de unas 11 To de hormigón y un millón de toneladas de acero.

6.2.19 El puente de Djedeïda en Túnez precedente del puente de Oelde

Durante el invierno de 1939-1940 Freyssinet pudo informar a Campenon-Bernard, que estaba en Algeria, y también a Mautner, que estaba en Gran Bretaña, para llevar a cabo la construcción de un puente en Djedeïda, a unos 20 Km de Túnez y también de un hangar en Meerut (India) con su nuevo sistema de pretensado (Marrey and Grote 2003).

El puente de Djedeïda fue el primero con vigas segmentadas. Fue solicitado por el General Mast, desconociéndose por qué insistió en que fuese en hormigón pretensado, ni siquiera como conoció el método. El puente tenía tres luces, un vano principal de 50 m que apoyaba en dos elementos en voladizo de 7,5 m cada uno y el apoyo de la viga de 35 m, dos luces externas cada una con 12,5 m, lo que le confería una longitud total de 75 m. No se conoce el porqué de la disposición de este puente, si se hubiese realizado una única viga para el tramo principal habría sido la luz más larga de puente pretensado.

El tablero tenía un canto de 1,60 m, se configura mediante una losa hueca construida colocando nueve vigas de 1 m de ancho una al lado de la otra. Las vigas a su vez, consisten en segmentos de 3 m y 7 y de peso cada segmento, que se ensamblaron utilizando el pretensado longitudinal y probablemente con cables curvados (Grote and Marrey 2000).

Se pretensó también transversalmente mediante cables rectos roscados. Sus conos de anclaje del tipo inventando en 1939 fueron utilizados como elemento decorativo. Los estribos no estaban pretensados. Las piezas se producían en la línea de producción instalada por Freyssinet en 1936, en Oued Fodda, Algeria. Tras

Puente de Luzancy (Fernández Ordoñez 1978, p. 221)

Puente de Luzancy. Vista lateral (Fernández Ordoñez 1978, p. 221)

Antiguo puente colgante de Luzancy, destruido en la guerra (Fernández Ordoñez 1978, p. 363)

rellenar las juntas de lechada entre los segmentos alineados, los cables de pretensado se enroscan a través de aberturas longitudinales. Los cables se pretensaron en dos pasos y desde ambos extremos.

Las vigas ensambladas se colocaron con ayuda de una viga de lanzamiento con una estructura de acero. Se cortaron desde Europa y se hicieron pruebas en la fábrica de Oued Fodda. En octubre 1945 se completó el puente, tras catorce meses de trabajo (Marrey and Grote 2003).

6.2.20 La presa y el puente de Oued Fodda. Algeria

La presa de hierro se desarrolla a lo largo de 75 m de largo y 17,5 m de ancho y dispone de un pretensado en las dos direcciones. Dispone de refuerzos no adherentes transversales anclados aguas arriba en los bules y tesados por la acción de los gatos planos en un bloque de hormigón. Longitudinalmente se pretensa ligeramente (3 MPa) mediante la utilización de fatos planos dispuestos en la articulación central de la presa, la cual apoya sus extremos contra las rocas existentes a ambos lados del valle. Las puertas de la presa de 19 m de longitud también se pretensan por hilos.

Puente en Oued Fodda, Algeria, se construyó entre 1936 y 1937 y consistía en 4 vanos con un total de 12 vigas prefabricadas con una luz de 20 m (Fernández Ordóñez 1978).

6.2.21 La construcción por segmentos. El puente de Luzancy

El puente de Luzancy es el regalo más hermoso que Freyssinet nos ha legado a los ingenieros de todo el mundo, porque es el mejor resumen de toda su vida y su obra inmensa, así como la justificación de su permanente actitud de honradez técnica, más allá de reglamentos, dogmas, costumbres y vacilaciones

Puente de Luzancy. Anclajes de las armaduras transversales (Fernández Ordoñez 1978, p. 222)

Puente de Luzancy. Vista lateral (Fernández Ordoñez 1978, p. 222)

Puente de Luzancy. Vista inferior del tablero (Fernández Ordoñez 1978, p. 225)

administrativas. Luzancy es el premio a su audacia, sin miedo nunca a soluciones nuevas, a su coraje, su generosidad, su paciencia y su fe por encima de tantas soledades e incomprensiones.(...)

Todo lo que caracteriza la genial creación de Freyssinet está aquí profundamente concentrado: rigor, potencia, pasión, simplicidad, originalidad, unidad y belleza. Desde la más pequeña herramienta a Plougastel, la obra de Freyssinet tiene una impronta inconfundible. El puente de Luzancy lleva su sello.
(Fernández Ordóñez 1978)

La prefabricación era un interés central en obra de Freyssinet, ya había utilizado este método de trabajo en los puentes de Laon y Saint Pierre de Vauvray en los años veinte. Su primera aplicación del pretensado fue la prefabricación de postes eléctricos, traviesas y tubos para la empresa Forclum en Montargis, donde dedicó 5 años al desarrollo de la prefabricación y el pretensado de piezas. Sin embargo el puente de Luzancy representa en la construcción de puentes llevar el método de la prefabricación al máximo valor y significación expresiva, determinando la creación de una tipología específica nueva para los mismos, la de puentes pretensados postesados de dovelas prefabricadas.

En 1941, Freyssinet comienza la construcción del puente de Luzancy, sobre el río Marne, siendo posteriormente detenida su construcción ese mismo año por la ocupación alemana de Francia, cuando los pilares ya habían sido completados, y se reanuda y finaliza en el año 1946. Era el primer puente prefabricado por segmentos y postesado, con una luz a salvar de unos 55 m, y un ancho de 6 m de calzada y dos andenes de 1 m. Debido a las exigencias de navegación la altura de la viga quedaba muy limitada. La solución clásica, por tanto, hubiese pasado por disponer la viga por la parte superior al tablero o bien realizar un arco por encima del tablero. Sin embargo se optó por la solución de Freyssinet, que tipológicamente sería una viga-pórtico, pero que

EL PRETENSADO

Puente sobre el Marne en Luzancy (Freyssinet 2003, p. 91)

Esquema de construcción de los puentes sobre el río Marne (Moell 1958, p. 200)

en realidad es un arco muy rebajado (Fernández Ordóñez 1978).

La estructura queda constituida por tres vigas cajón paralelas con un canto total de tan solo 1,22 m en el centro y 1,82 m en los arranques, donde se encuentran unos cartabones hacia los apoyos, a tan solo 3,30 m debajo de la rasante. Todas las vigas están constituidas por 22 dovelas prefabricadas, que a su vez se formaban mediante tres piezas, con armaduras postesadas, entre cada dos vigas cajón se completa el tablero con unas losas independientes, apoyadas sobre esas vigas, formando del mismo modo las aceras, también, por trozos independientes, en los cuales quedan empotradas las barandillas. Las dos piezas de los extremos se conformaban mediante tres dovelas cada una, mientras que la pieza central junto con las otras 16 dovelas alcanzaba un peso de 30 to.

El número de elementos prefabricados del puente era de 1.016. La prefabricación fue estudiada detenidamente de forma que mediante las vainas y los rebajes previstos en las piezas facilitaba la puesta en obra y el posterior tesado, corrigiendo a medida que se iban produciendo los diferentes movimientos elásticos mediante la elevación del puente y el añadido de los diferentes elementos (Fernández Ordóñez 1978).

Si, como dice Hegel, a cada idea corresponde una forma apropiada y adecuada, a aquella antigua idea que germinó en el espíritu de Freyssinet en 1903 corresponde plenamente el puente de Luzancy. (...) Sin embargo, no hay en este puente ni tours de force ni esfuerzos sobrehumanos como tantas otras veces en su vida. Luzancy es una obra realizada con la naturalidad y la paz de los grandes maestros. Es el equivalente de Las Meninas para Velázquez. Freyssinet ya no lucha desesperadamente con la materia como antaño, sino que la domina y la modela con suavidad y elegancia, la eleva por encima de las fuerzas de la gravedad y consigue el milagro del vuelo de un arco plano, levitando en paz consigo mismo (Fernández Ordóñez 1978).

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Puesta en obra de una viga en Luzancy (Grote and Marrey 2000, p. 99)

Instalación de tramo central del puente de Luzancy (Freyssinet 2003, p. 15)

El resultado es una esbeltez extraordinaria para una viga de puente y un hormigón de una calidad excepcional gracias a la vibración a la que fue sometido y a la escasa relación agua-cemento de poco más de 0,4. Para asegurar la eficacia del vibrado que es mayor cuando el hormigón se somete a alguna presión, los moldes de las piezas se cerraban por la cara superior y se prolongaban en forma de chimenea, continuando hasta dicha boca el hormigonado y retirando después la masa sobrante. El hormigón obtuvo una resistencia en cubos superior a los 400 Kg/cm² a los 28 días. El pretensado era tanto longitudinal como horizontal y vertical en las secciones rectas.

Las armaduras se formaban con alambres de 3 y 5 mm de diámetro, 150-170 Kg/mm² de carga de rotura, 120-145 Kg/mm² de límite elástico y el 7-8% de alargamiento. La puesta en tensión de los alambres garantizaba su seguridad ya que nunca habrían de soportar unos esfuerzos mayores a los de este momento. El trabajo posterior, vendría realizado en su totalidad por el hormigón a compresión. Los alambres se tesaban mediante un dispositivo especial y dado el alargamiento previsto de las armaduras había de repetirse la operación de tesado varias veces. Cuando los alambres habían de ajustarse a una trayectoria curva la eficacia del tesado disminuye, por lo que se repitieron las operaciones calentando la parte de las armaduras que quedaba al descubierto por la parte inferior de la viga, para ayudar a su dilatación, Freyssinet indicaba que también podría utilizarse el calentamiento por corriente eléctrica (Torroja Miret 1947).

Pretensados rectos, curvos, longitudinales, transversales, verticales, pretensados en todos los sentidos, formando lo que para Freyssinet era una estructura perfecta, esto es elástica, en todo el sentido de la palabra, de modo que todas sus secciones contribuyan efectivamente a su resistencia variando de manera continua y no sufriendo cambio apreciable en el curso de las deformaciones que resultan de las cargas a las que son sometidas. Una estructura noble, de primera categoría, donde en ningún

Montaje por tramos del puente de Luzancy (Fernández Ordoñez 1978, p. 367)

punto aparezcan tracciones en el hormigón, donde la conservación es por tanto nula, donde las armaduras no tienen otra misión que la de crear fuerzas previas aplicadas al hormigón de forma que éste permanezca sin tracción alguna a lo largo del proceso de construcción y más tarde, cuando aparezcan las sobrecargas. De este modo, el acero es sustraído a la acción directa de las cargas. Basta que permanezcan tendidos para que el puente esté seguro, pero Freyssinet había inventado sus anclajes de conos que garantizaban la tensión de sus alambres (Fernández Ordóñez 1978).

El sistema utilizado para el montaje de las piezas prefabricadas también fue diseñado específicamente para este puente, dado que se trataba de construir el puente sin cimbra, por lo que habían de lanzarse las tres partes del puente. La dificultad principal en esta maniobra era el lanzamiento de la zona central que tenía 39 m de longitud y 90 To. de peso. Para ejecutar este lanzamiento se establecieron dos plumas de 23,50 m de altura, montadas sobre estribos a unos 60 m de distancia una de otra. Las plumas disponían de unas patas en su parte inferior para permitir el paso de la viga que se sujetaban en su cabeza por medio de vientos. Estas plumas disponían de un sistema de poleas y tambores especiales, diseñados por el propio Freyssinet en dos mitades de hormigón que pretensaba después con un zuncho, que enrollaban los cables. Se iban equilibrando de forma que maniobrando ambos cables se llevaba la viga a su posición definitiva. Este mismo procedimiento se utilizó para colocar en primer lugar los elementos externos, apoyando inicialmente estos segmentos en los cartabones que se habían hormigonado in situ y anclándolos elementos a continuación. Estos elementos quedaban temporalmente en estado de voladizo hasta recibir la zona central del puente (Fernández Ordóñez 1978).

El lanzamiento de los elementos prefabricados y el montaje, fue otra formidable aportación de Freyssinet en el puente de Luzancy. Por medio de un sistema de plumas verticales

EL PRETENSADO

Apoyo triangular del puente de Luzancy (Fernández Ordoñez 1978, p. 223)

Moldes de dovelas prefabricadas. Luzancy (Fernández Ordóñez 1978, p. 363)

Montaje de dovelas en voladizos sucesivos (Fernández Ordóñez 1978, p. 387)

y cables enrollados en tambores especiales de radio variable, se equilibraron en todo momento las desiguales tracciones de los cables y no se producían otras pérdidas de energía que las debidas al rozamiento. Un sistema genial de montaje de vigas prefabricadas que no se ha podido superar hasta el día de hoy, a pesar del avance de la prefabricación en todo el mundo (Fernández Ordóñez 1978).

El enlace de las piezas se realizó a tope rejuntando posteriormente con mortero de cemento de unos 2 cm de espesor. Para lograr un conjunto monolítico se estableció sobre el conjunto de los tres bloques extremos un pretensado previo provisional y sobre los 16 centrales las armaduras definitivas. Tras rejuntar la unión entre la viga central y las ménsulas laterales se aflojó la armadura que sostenía a estas últimas en voladizo quedando el arco definitivamente cerrado trabajando en toda su luz (Torroja Miret 1947)

En orden a corregir los movimientos elásticos que necesariamente sufrirían los estribos y al tiempo mejorar el reparto de momentos flectores ajustándose a las previsiones, se dejó en previsión bajo la rótula del estribo un juego de gatos que permitía apretar las rótulas y llevarlas nuevamente a la forma establecida, apoyándose sobre cuñas de hormigón específicamente preparadas, las cuales entraban por efecto de la gravedad a media que se abrían las juntas entre las rótulas y el estribo.

Una vez se hubieron dispuesto las tres vigas cajón se colocaron entre las mismas las piezas del forjado que cubrían las luces entre vigas, se rectificó el trazado de las armaduras longitudinales y el de los estribos verticales que también estaban pretensados. Además se introdujeron otras armaduras horizontales que cruzaban de lado a lado las cabezas de las vigas, tesando todo ello con los mismos procedimientos dando lugar a que el hormigón trabajase comprimido en todas las direcciones, incluso entre viga y viga. Las aceras se sometieron también a una tensión

Diafragmas de guía de armaduras. Luzancy (Fernández Ordóñez 1978, p. 365)

Tambor de radio variable. Luzancy (Fernández Ordóñez 1978, p. 369)

Tambor para cable. Luzancy (Grote and Marrey 2000, p. 101)

longitudinal a través de los gatos que estaban en la clave de forma que colaboraban al trabajo de la cabeza de la viga.

Según los comentarios del propio Eduardo Torroja sobre la obra, en la misma no se ha prescindido de ningún perfeccionamiento: vibrado, pervibrado, pretensado en las tres direcciones, prefabricación de vigas por dovelas ensambladas por partes, unos originales medios auxiliares, un arco tremendamente tendido, unas aceras que colaboran como cabezas precomprimidas de la viga y todo ello con un máximo de sutileza y afinamiento en obra. Tanto es así, que Torroja, retóricamente, se extraña de que las barandillas solo cumplan su función de medio de protección sin incorporarse al trabajo estructural del conjunto (Torroja Miret 1947).

En los textos de Freyssinet no aparece una especial atención a la prefabricación, con la excepción de un artículo denominado "Prefabrication et batiment", donde desarrolla las dificultades que impedían que la prefabricación se impusiese en el campo de la edificación arquitectónica, donde Freyssinet ha tenido pocas intervenciones. Señala que la improvisación resultaba, a su juicio y en aquella época al menos, inherente a las empresas de construcción, con un nulo o escaso interés en las investigaciones y estudios. Consciente de la importancia social de la prefabricación Freyssinet confiaba en que con el tiempo se abriría camino en la construcción cotidiana. El mismo, tras la guerra desarrollará tipos sencillos de puentes prefabricados pretensados, así como distintos sistemas de postesados como los anclajes de conos (Fernández Ordóñez 1978).

Si Plougastel impresionaba por su novedad y su tamaño, en Luzancy se siente la intensa emoción de una obra de arte verdadera. En Luzancy se muestran tanto la racionalidad, pureza y elegancia de lo estructural, la huella de los pretensados con sus cabezas de anclaje superiores e inferiores al ritmo justo, la impronta de la prefabricación y del propio proceso

constructivo, como el misterio de lo ingrávigo, la belleza y la paz del arte. Lo racional y lo mágico. El puente de Luzancy es la catedral de Chartres del pretensado. Freyssinet tiene ya 67 años en 1946 cuando finaliza el puente, permanece en la vanguardia de la ingeniería mundial, y seguirá siendo hasta el final un ingeniero moderno en el buen sentido de la palabra, es decir, eterno. A pesar de poseer un pensamiento tan rico, inconformista y fértil en invenciones, nunca mantuvo Freyssinet la doctrina del predominio de la novedad. Su línea es ascendente pero profundamente coherente y dialéctica.

Quince días después de finalizado el puente de Luzancy, escribe: "En todos los dominios, el perfeccionamiento de las técnicas y la extensión de sus posibilidades son debidas a una aplicación más precisa y más exacta de las leyes físicas; ellas someten al ingeniero a un respeto más estricto de la verdad científica y moralizan las técnicas. El hormigón pretensado no escapa a esta ley. Altamente perfeccionado y dotado de posibilidades muy extendidas, el hormigón pretensado perdona menos que otro material las contradicciones entre las hipótesis y las realidades. Esta es en el fondo la razón por la que el hormigón pretensado es tan rico en promesas de orden estético; es difícil de hacerle mentir" (Fernández Ordóñez 1978).

Como resultado de la satisfactoria realización del Puente de Luzancy, la empresa Campenon-Bernard fue invitada a ofertar otros cinco puentes similares por todo el río Marne, con vigas paralelas que van de los 76 a los 80 m. Lógicamente las ofertas de esta empresa fueron las más ventajosas (Grote and Marrey 2000).

En 1947, Freyssinet, junto a Chaudesaigues, proyecta y construye cinco puentes sobre el río Marne, en Annet, Trilbardou, Esbly, Ussy y Changis-Saint-Jean, del mismo tipo y soluciones constructivas del puente de Luzancy, pero con una luz de unos 74 m. La imagen de los cinco puentes se difundió ampliamente en las revistas del sector, dando una imagen ligera, esbelta y depurada

del hormigón pretensado anteriormente pesado y poco elegante.

Komendant hace una reseña del puente del Esbly en su libro *Prestressed Concrete* de 1952. Establece que las diferencias entre los cinco puentes mencionados anteriormente solo se relacionan con los estribos que varían en función de las condiciones locales de los suelos.

En su crítica determina que la esbeltez y apariencia son muy atrevidas, y además resulta económico. Estos puentes para Komendant serían la prueba que se pueden realizar puentes mediante el ensamblaje de piezas prefabricadas dado que el pretensando las hace actuar homogéneamente. Debido a ello se pueden aplicar estas técnicas a la producción en fábrica consiguiendo así ahorros económicos a la par que el refinamiento de los productos (A. Komendant 1952).

6.2.22 Una teoría general del fraguado de conglomerantes hidráulicos y fenómenos de retracción y deformación lenta de morteros y hormigones de E. Freyssinet.

En los primeros números de la revista *Hormigón y Acero*, dirigida, entre otros por E. Torroja expone Freyssinet en los números del 2 al 5 su teoría sobre el fraguado de conglomerantes hidráulicos y fenómenos de retracción y deformación lenta de morteros y hormigones . Es en el Congreso de Lieja de 1930 donde expone sus ideas, sobre estas cuestiones, determinando algunas de las inexactitudes recogidas en los Reglamentos.

Sus investigaciones comienzan en 1905 apoyadas en los estudios sobre su grandes obras. Freyssinet entrego una primera comunicación referente a la deformación de morteros y hormigones a la Comisión Técnica encargada del Reglamento en la Cámara Sindical del Hormigón Armado. Ya en el año 1911, aproximadamente, estaba convencido de la existencia de una deformación lenta creciente con

las cargas. Sin embargo, no quiso dar pública cuenta de sus ideas en tanto no tuviese las pruebas experimentales completas. Debido a diversas causas, entre ellas, el desarrollo de la I Guerra Mundial, no dispuso de los experimentos de comprobación hasta julio de 1926. No obstante, desde el principio los resultados se mostraron firmes, de manera que solo unos meses más tarde, el 22 de septiembre de 1926 pudo dar cuenta en la Subcomisión Técnica, de la que formaba parte, de la influencia de las cargas en las deformaciones lentas, para que éstas se pudieran tener en cuenta en el Reglamento que se estaba preparando entonces (Eugène Freyssinet 1934d).

En tanto que Freyssinet desarrollaba estos experimentos que entendía debían durar un lapso de tiempo importante (se comenzaron en agosto de 1926 y se finalizaron en marzo de 1929), el ingeniero inglés Oscar Faber, desconociendo la existencia de estas investigaciones, comenzó las suyas propias a principios de 1927 sobre el mismo tema, presentando sus conclusiones en una reunión de los Ingenieros Civiles el 15 de noviembre de 1927. Tras unas comprobaciones sobre las mismas llevadas a cabo por el Building Research, bajo la dirección del Dr. Glanville, durante los años 1929 y 1930 se admitieron las mismas.

Entretanto, Freyssinet comunicó sus conclusiones en el Congreso de Viena de 1928, sin que se abriera una discusión sobre el tema y tan solo algunos ingleses conocían los estudios de Faber. Más tarde estableció su teoría sobre los fenómenos haciendo varias exposiciones públicas de sus investigaciones durante el año 1929.

Fue sin embargo, en el Congreso de Lieja de 1930, cuando coincidieron sobre la cuestión los estudios de Freyssinet, los de Faber y de los de Glanville, quien a su vez al americano Davis, conclusiones semejantes. Las teorías sobre deformación diferida del hormigón quedaron así establecidas y más tarde en el Congreso de Puentes y Estructuras de París, tuvieron un

lugar preeminente. A su vez, la Asociación Internacional para el Ensayo de Materiales dispuso una Comisión especial dedicada a su estudio.

Los diferentes estudios además de confirmar los resultados obtenidos, mostraban un acuerdo importante en los valores numéricos, aún teniendo en cuenta los métodos y circunstancias diversas de los experimentos.

Freyssinet señala únicamente una divergencia notable en relación a la reversibilidad del fenómeno, que Faber no detectó. Achaca esta divergencia a la corta duración de los experimentos de Faber y a la atmósfera mucho más seca en la que se desarrollaron éstos.

Comienza el estudio explicando los fenómenos de retracción y las anomalías en relación con los coeficientes de dilatación y elasticidad del hormigón en relación con los fenómenos de capilaridad que se producen en el interior de los poros del material que están a su vez influidas por las variaciones higroscópicas y térmicas a las cuales se ve sometido el material.

Realiza las primeras observaciones en relación las desviaciones detectadas en el puente Le Veudre, tal y como se ha explicado anteriormente, donde las luces son de 72'5 m y la proporción del orden de 1/15. En las probetas de los hormigones de dicho puente el módulo de Young aumentaba regularmente con el tiempo, mientras que en el puente parecía reducirse progresivamente o bien que la retracción tomara valores muy elevados y proporcionales a las cargas. Ante el inminente colapso se levantaron las bóvedas y se anuló la articulación en la clave, estabilizando la obra (Eugène Freyssinet 1934d).

Freyssinet expone cómo la Comisión del hormigón armado, colocada frente a un problema completamente nuevo y de alta complejidad, aplicó directamente las ideas de la ciencia de la

resistencia de materiales conformadas en base a los estudios de las estructuras metálicas. Traspuso sin comprobar o con una comprobación mínima, a criterio de Freyssinet, algunas leyes de la deformación de los hormigones. Las deformaciones lentas del hormigón eran el resultado, no obstante de complejos equilibrios que dependían de muy diversos parámetros (Eugène Freyssinet 1934d). En realidad ya había suficientes datos que demostraban la no linealidad de las deformaciones pero consideran que error en los márgenes admisibles estaba dentro de la seguridad (Pamies Rahan 2011).

Freyssinet realizó estudios sobre los grandes puentes de Plougastel y de Sandö, a lo largo del tiempo, controlando diversos parámetros como la dosificación, las cargas, las variaciones de la temperatura y del estado higroscópico. Desde 1905 a 1914 realizó numerosos experimentos, tanto en estos puentes como en el arco de ensayo de 50 m construido con anterioridad a los puentes sobre el Allier, y para la ejecución de éstos (Eugène Freyssinet 1934d).

Tras la I Guerra Mundial prosiguió sus investigaciones, utilizando la vibración mecánica para el apisonado de hormigones en delgadas láminas curvas de hormigón armado, en las cuales introducía acero en armaduras finas.

En sus estudios Freyssinet postulaba que las propiedades mecánicas de los hormigones serían más una consecuencia de la disposición física de sus elementos que de la constitución química de los elementos del hormigón, a la cual otorgaba la posibilidad de variar esa disposición física. Siguiendo este discurso, deduce la posibilidad de transformar las propiedades de los hormigones mediante un tratamiento enteramente físico con independencia de los perfeccionamientos que hubiese lugar en la fabricación de los cementos.

El hormigón es un material muy heterogéneo, con una gran

variedad de parámetros que pueden modificar el estado físico del mismo. Estos parámetros dependen de la composición del hormigón, de su naturaleza y dosificación, además dependen de la dosificación del agua, de las sales disueltas en la misma, de su viscosidad y también de las propiedades físicas y químicas de los áridos agregados, de su tamaño, forma, naturaleza, superficies, etc (Eugène Freyssinet 1934d).

Analiza las tensiones internas del hormigón que tienden a provocar deslizamientos entre las superficies pasta-árido que son irreversibles y no proporcionales a las fuerzas que los causan. Estas deformaciones irreversibles reciben el nombre de histéresis y son propiedades generales del estado sólido. En el hormigón revisten gran importancia debido a las diferentes propiedades de sus elementos constitutivos. A ello se ha de sumar el distinto comportamiento del hormigón a tracción y a compresión, dado que producen una deformación permanente en el caso de las tracciones que dan lugar a un aumento de volumen.

En el caso de piezas de grandes dimensiones este aumento de volumen puede ser tan importante que deje en un segundo término otros fenómenos y puede explicar los resultados incoherentes de ensayos anteriores relativos a la retracción (Eugène Freyssinet 1934b).

Es en Plougastel, en 1927, donde comienzan los experimentos de Freyssinet relativos a la retracción y encaminados a la comprobación de su hipótesis de que el estado mecánico del hormigón es determinante en los fenómenos de retracción.

Aborda Freyssinet los fenómenos de deformación lenta del hormigón entendidos como el resultado de un equilibrio entre los sistemas de fuerzas exteriores y los sistemas de fuerzas interiores, ligado en todo momento a las condiciones del medio.

Observa entre el estado líquido y el estado sólido una gama

continua de estados intermedios que se ligan a la variación de la energía cinética de las moléculas debido a diferentes causas (Eugène Freyssinet 1934d).

Los pseudosólidos tendrían propiedades diferentes a las de los sólidos compactos, en tanto que su dimensión variaría no sólo en función de la temperatura y de un módulo de dilatación fijo, como en los metales, sino que dependería del módulo de dilatación de la parte sólida y de la correspondiente al líquido, del coeficiente higroscópico, de la atmósfera de la variación de la temperatura, así como de otra serie de condicionamientos. Ello daría lugar a que el coeficiente de dilatación no tenga un valor fijo, más que si su saturación es completa.

También el módulo de Young y el coeficiente de Poisson variarían entre unos límites bastante amplios, en función de distintos factores independientes de las fuerzas exteriores, salvo para casos de saturación o cargas mantenidas indefinidamente. Al no mantenerse una isotropía en los poros interiores y comprimirse en sentido paralelo a la presión, habrá esfuerzos variables según la dirección tomada y máximos paralelos al esfuerzo de compresión que disminuye el acortamiento y aumenta la dilatación transversal, fenómenos que se superponen al de Poisson. Todo ello produce un aumento del módulo de Young y del coeficiente de Poisson.

El fenómeno de retracción diferida sería más importante que la deformación instantánea y que la retracción puramente higroscópica. Freyssinet busca entonces establecer una expresión general de la deformación diferida en la que intervengan las propiedades generales de los cuerpos pseudosólidos (Eugène Freyssinet 1934c).

Esta deformación diferida sería, a igualdad de las demás condiciones proporcional a la deformación instantánea debida a esa misma carga. Además sería función de su estado higroscópico, de tal forma que sería nula tanto para un hormigón saturado como

para uno perfectamente seco.

La retracción tendería a aumentar los efectos de la heterogeneidad de la estructura de los hormigones, aumentando las tracciones internas locales.

Concluye Freyssinet que las propiedades mecánicas de los hormigones, tales como resistencia y deformaciones, dependen de las condiciones geométricas y elásticas de sus intersticios (Eugène Freyssinet 1934d).

Se obtiene un aumento de la compacidad de los hormigones sometidos a un envejecimiento artificial del mismo, que da lugar a una deformación permanente. Posteriormente la repetición de las compresiones que fuesen inferiores a las ya realizadas sobre una pieza produciría deformaciones únicamente de carácter elástico. Los mayores a los ya producidos darían lugar a una nueva deformación de carácter plástico.

La resistencia del elemento crecería a la par que su indeformabilidad, pero no se puede obtener una compacidad completa debido a la forma en que se han producido los cambios moleculares por la difusión en un vehículo líquido. Estos cambios son posibles debidos a la organización de una red vascular entre los elementos sólidos en formación que sea suficiente para permitir las aportaciones de las moléculas necesarias para la constitución de elementos sólidos en todos los puntos de su superficie. La red de huecos ofrecería al sólido zonas permeables que conferirían sus características mecánicas (Eugène Freyssinet 1934a).

La retracción del hormigón será más acusada cuanto menos agua quede sin emplearse en el fraguado. Es una característica común a todos los hormigones incluso si el fraguado es bajo el agua.

Concluye su exposición estableciendo que lo importante no

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Viaductos en Caracas. Montaje de cimbras (Fernández Ordóñez 1978, p. 393)

Proceso de montaje de viaducto en Caracas (Freyssinet 2003, p. 94)

Dos de los tres viaductos de la autopista Caracas-La Guaira (Fernández Ordóñez 1978, p. 236)

es tanto la certeza de la teoría que expone sino que la misma sea capaz de guiar investigaciones posteriores y adquirir nuevos conocimientos prácticos (Eugène Freyssinet 1934a).

6.2.23 Difusión del hormigón pretensado

Freyssinet continuará trabajando hasta su muerte, el 8 de junio de 1962, y realiza numerosas charlas difundiendo el hormigón pretensado, pero no materializa sus conocimientos en un texto de referencia propio. Aún así, sus obras y su investigación continúan perfeccionándose y rompiendo barreras, aplicándose tanto a obra civil como a edificación.

Posteriormente a la construcción de estos puentes, sus amigos y colaboradores le solicitan que realice un libro sobre el Pretensado, recogiendo su experiencia, a lo que Freyssinet da una respuesta muy reveladora en relación a lo que piensa sobre la comunicación que establecen las propias obras:

Creo que la creación de un nuevo tipo de depósito o de esclusa tiene más importancia que algunas páginas de un libro... He comprendido que una descripción general de los medios y las aplicaciones del pretensado sobrepasa en muchos mis posibilidades y apartaría de la investigación las fuerzas que me quedan.

Serán otros ingenieros los que se dediquen a la difusión de este sistema mediante escribiendo libros sobre el tema. Sobre estos libros decía Freyssinet que no habían aportado nada realmente nuevo al pretensado, habiendo uno que le irritaba profundamente (Fernández Ordóñez 1978). Se podría suponer que que ese último hacía referencia al texto de Magnel dado que entre los primeros libros sobre el tema, que también cita Fernández Ordóñez, solo hay dos en francés y el otro libro está escrito por su discípulo Guyón, al que prologa. No obstante realiza un artículo retrospectivo en 1949 y una conferencia que fue publicada en 1954, traducida al inglés y publicados en A half-century of

Basílica de Lourdes (Fernández Ordóñez 1978, p. 237)

Basílica subterránea de Lourdes (Fernández Ordóñez 1978, p. 237)

Puente Saint Michel, en Toulouse (Freyssinet 2003, p. 96)

French prestressing technology como "Eugène Freyssinet by Himself" y "a general introduction" (David P Billington 2013).

En 1952, Freyssinet intervino activamente en el proyecto y construcción de los puentes de la autopista Caracas-la Guaira en Venezuela, tres arcos biarticulados de 152, 146 y 138 m de luz.

Son especialmente interesantes en estos puentes los procesos de construcción empleados porque en ellos se inició el procedimiento de avance por voladizos sucesivos atirantados en los arcos de hormigón, aunque sólo se utilizó este sistema en los arranques; el resto del arco se hormigonó sobre una cimbra metálica apoyada en los voladizos atirantados ya construidos; la cimbra, igual que los voladizos, se atirantaba desde la pilas del puente (Fernández Troyano 1999).

Realiza junto al arquitecto Pierre Vago, la basílica subterránea de San Pio X en el Santuario de Lourdes, inspirada en el puente del Esbly, la diseñó junto Jean Chaudesaigues y la construyó con la empresa de Campenon Bernard de 1956 a 1958. Consiste en 29 pórticos de apoyos inclinados capaces de albergar a 20.000 personas, solución similar a la utilizada en la construcción de puentes. Antes fue estudiada por P.L. Nervi, que había propuesto una solución similar. Esta obra representa la luz máxima realizada por el procedimiento de Freyssinet (Manterola Armisén 1998)(Manterola Armisén 1999).

Entre los años 1959 a 1962 construye el puente número 10 en el aeropuerto de Orly.

El último trabajo de Freyssinet comienza en 1959 y finaliza en 1962, solo tres meses antes de su muerte, construye sobre el río Garona en Toulouse el puente Saint Michael, con cinco vanos de 62,5 m de luz. Un puente pretensado en pórtico con pilas en forma de V (Xercavins, Demarthe, and Shushkewich 2010).

y sección transversal en la pila (Fernández Ordóñez 1978, p. 398)

La idea central de la obra de Freyssinet vendría, tal vez, más impuesta por un entendimiento artesanal de la construcción en el que los medios auxiliares y el propio material son los generadores de las formas y geometrías que han de simplificarse al máximo. Así, pone su acento en el dominio del material y no se recreaba en exceso en las formas finales que éstas adquirirían.

Entendía que las formas devenían del proceso constructivo, muy a la manera de Kahn, y que su correcta utilización habría de traer, por si misma, una armonía global a la construcción final. Y el mismo se sorprende al percibir los resultados en obras como los hangares de Orly, en la cual el interés primordial de Freyssinet, según dice, era en la economía de los medios materiales allí dispuestos (Fernández Ordóñez 1978).

Mediante su sistema puede conseguir que el hormigón se comporte como un material isótropo, homogéneo y con una elasticidad casi perfecta (Fernández Ordóñez 1978). Consiguiendo un material así, no admitiría estados intermedios, de tal manera que no podía sino rechazar los caminos propuestos por Abeles y el pretensado parcial, que posteriormente sería comúnmente utilizados por ingenieros como C. Menn.

6.2.24 Inventos y Descubrimientos de Freyssinet

En Freyssinet podemos observar una cuidada atención hacia todo el proceso constructivo, incluso más que hacia la propia obra acabada. Le fascinaba no sólo el estado final de la obra sino las invenciones que contenía el poder llevarlas a efecto, las nuevas herramientas, los nuevos medios de ejecución y métodos de análisis. Todos estos medios dominaban su ideas y su imaginación. Las obras de Freyssinet resultan más emocionantes en su ejecución que en su estado final. Estaba fascinado por el nuevo material que había inventado y quería crear un sistema completo para él. Para ello ideó numerosos inventos (David P Billington 2013):

En 1913 había inventado las bóvedas con nervaduras por encima y, en 1916, las cimbras deslizantes. Si hubiera patentado tales inventos, me habrían hecho multimillonario. Pero, claro, ya se sabe: sólo las patentes estúpidas enriquecen a sus autores (Eugene Freyssinet 2003).

6.2.25 Deformaciones lentas del hormigón

Una de las mayores aportaciones de Freyssinet al hormigón es el conocimiento de las deformaciones lentas del hormigón, que conocemos actualmente como fluencia.

Sólo he publicado un breve resumen de mis investigaciones sobre las deformaciones lentas y el gran libro que había esbozado sobre ellas probablemente no llegará a imprimirse nunca. Lo lamento hasta cierto punto, ya que en él mostraba los motivos del error en que han incurrido los anglosajones; error que les ha llevado a dar el nombre de fluencia a unas deformaciones que no son, en su mayor parte, sino deformaciones elásticas retardadas y reversibles. Ellos las han declarado irreversibles sin darse cuenta de que, en sus experimentos, sólo variaban las condiciones de carga, sin alterar las condiciones higrométricas del hormigón que, húmedo al principio del experimento, estaba seco al final y así se quedaba.

Los mismos autores se han equivocado también en la observación de las leyes de variación del módulo de Young en función de las tensiones, al haber tomado por un fenómeno único la suma de dos fenómenos. Uno de ellos es la expansión plástica y continua del hormigón, previa a la carga, bajo el efecto de las variaciones termo-higrométricas a las que se somete cualquier bloque de hormigón. Esta expansión crea un estado comparable al de una barra doblada mucho más allá de su deformación elástica: su módulo aparente es entonces cercano a 0. De ahí procede la ilusión de que el módulo aumenta primero con la carga y a continuación disminuye, cuando en realidad disminuye desde el

inicio cuando crecen las cargas (Eugene Freyssinet 2003).

6.2.26 Comportamiento del hormigón a cortante

Antes de Freyssinet se venían utilizando los zunchos helicoidales para mejorar la resistencia a cortante del hormigón. Sin embargo él se percató de que este sistema en secciones que no eran circulares no era el más apropiado y era menos eficaz que un sistema de armaduras transversales dispuestas en planos perpendiculares a las tensiones, con dos series perpendiculares entre sí, de hilos paralelos y enlazados por elementos semicirculares.

Desde Consideré se venía estudiando el aumento de resistencia conseguido con el zunchado.(...). Freyssinet emplea este tipo de zunchado en casi todas sus obras y especialmente cuando realiza sus articulaciones de bóvedas muy rebajadas, sometidas desde 1912 a presiones medias de servicio de 250 kg /cm². En resumen, pensaba que en los puentes de hormigón bien concebidos, cualquiera que fuera su luz, la armadura longitudinal debería permanecer siempre como algo secundario.

Cuando más adelante, inventa el cono de anclaje de las armaduras de hormigón pretensado, vuelve a usar este tipo de zuncho sinusoidal para armar la zona de hormigón de transmisión de los esfuerzos de pretensado (Fernández Ordóñez 1978).

6.2.27 Vibrado del hormigón.

Durante la 1ª guerra mundial, Freyssinet construyó numerosas barcasas de hormigón armado, también inventó un tipo de cureña que disponía de unas paredes muy finas por lo que su hormigonado se hacía complicado. En 1917 aplica la vibración mecánica del hormigón, transformando y perfeccionando los vibradores que se empleaban en cimentaciones, hasta patentar la técnica en 1917 por la Sociedad Limousin, así podría "utilizar morteros muy

Articulación Freyssinet en el puente Candelier (Fernández Ordóñez 1978, p. 136)

Esquema de articulación Freyssinet (Fernández Ordóñez 1978, p. 136)

Patente de *système de trailles d'équipage* (Fernández Ordóñez 1978, p. 26)

fluidos para hormigonar entre armaduras complicadas, eliminando por vibración el exceso de agua". Reduciendo los intersticios entre las partículas por medio de la vibración se disminuye consecuentemente el volumen de hidratos necesarios para el endurecimiento y así el tiempo de fraguado

6.2.28 Articulaciones Freyssinet

Las articulaciones Freyssinet se utilizaron por primera vez en el puente de Boutiron, en 1911. Plantea la estrangulación de la pieza en una zona que se denomina garganta o cuello de la articulación, en la cual el hormigón trabaja a elevadas tensiones debido a este estado. Esta garganta se atravesaba con una fila de hierros verticales, y se armaban las dos piezas en el borde mediante parrillas para resistir las tracciones que produce la incurvación de las compresiones al tener que canalizarse por la garganta. Posteriormente, se comprobó, mediante ensayos, que la mejor solución es no poner ningún hierro pasante a través de la garganta.

Anteriormente las articulaciones habituales se configuraban mediante dos superficies cilíndricas en piedra y hormigón con radios de curvatura semejantes. También fueron utilizadas en el Puente del Veurdre con un mortero rico provisto de una fuerte armadura transversal. Este tipo de articulaciones eran de difícil construcción y reflaje y los intersticios entre las dos superficies se llenaban de fangos o limos alterando su funcionamiento. Junto con la Articulación tipo Messnager ha sido la más utilizada en el hormigón (Fernández Troyano 1999).

6.2.29 Traille

En 1990 durante su servicio militar inventa la "traille", que desde entonces lleva su nombre en el ejercito francés. Se trata de una barcaza unida a un cable tendido por encima del río y que hacía las veces de pontón.

Descimbramiento por gatos. Villeneuve-sur-Lot (Fernández Ordóñez 1978, p. 298)

Pretensado con gatos planos, con y sin armaduras (Fernández Ordóñez 1978, p. 269)

Arcos de hormigón en masa (Fernández Ordóñez 1978, p. 301)

6.2.30 Descimbramiento por gatos

Habiéndose graduado en 1905 y con la idea de las deformaciones inducidas a la vista de los voladizos de Rabut, ya en 1907, inventa el descimbramiento por gatos mediante la creación directa de empujes. Logró un procedimiento eficaz en el descimbramiento del puente de tres articulaciones de Praireal-sur-Besbre, de 26 m de luz.

El procedimiento consistía en colocar unos gatos en la articulación de la clave, gatos que se utilizarían para crear empujes horizontales en las dos mitades del arco. Como resultado el arco se precomprimía y rotaba ligeramente alrededor de las articulaciones de los estribos. Así las dos mitades de los arcos se levantaban desde el centro de manera que el encofrado se podía retirar mucho más fácilmente. Posteriormente se retiraban los gatos y el arco de tres articulaciones funcionaba normalmente. Esta técnica se adoptó muy pronto internacionalmente (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

Este invento sería el origen del posterior invento del pretensado, puesto que conlleva la creación deliberada de deformaciones y esfuerzos previos.

Vuelve a utilizar este sistema, de forma más imperiosa y urgente, en el puente de Le Veudre, tanto para su desencofrado como para su recuperación.

Tras dos años de su construcción, Freyssinet observó que las bóvedas del puente se deformaban inexorablemente. Para salvar la construcción volvió a colocar los gatos en los espacios dejados a ese efecto para el descimbramiento y tirando con los gatos volvió a elevar el puente, dejando las bóvedas en su posición.

Esta situación le dio pie a estudiar las deformaciones diferidas del hormigón. A través de la regulación de las

deformaciones con los gatos conseguía su control, este control podría conseguirlo con los gatos o imponiendo solicitudes previas que llevaran a un estado de deformación dado.

Mientras que las realizaciones se suceden y afirman su maestría mayor, la idea-fuerza se alimenta a través de ellas. Es necesario llegar a reglar toda la carga, y no pudiendo ser soportada más que por bóvedas, es necesario aumentar los empujes para rebajar estas bóvedas más allá de sus formas naturales para inscribirlas a su voluntad en espacios restringidos, crear por gatos curvas de presión suficientemente tensas para que queden en la materia y hagan imposible la fisuración. Es necesario forzar la materia a obedecer, es necesario obtener la permanencia de las tensiones que se le han impuesto.

Esta idea, la del Pretensado, terminó por llegar a ser en Eugenio Freyssinet la esencia misma del subconsciente; nada podrá en adelante impedirla brotar (Fernández Ordóñez 1978).

Mediante el descimbramiento por gatos pudo economizar cimbras y hacerlas a la par muy resistentes. Puesto que las bóvedas eran muy rebajadas era necesario elevarlas creando empujes adicionales en la clave.

El levantamiento de las claves utilizando gatos, que después se denominaron Gatos Freyssinet, son de uso común en muchas estructuras, como ejemplo en los cimientos de la Torre CN de Toronto, en Canadá, de 1976, estructura independiente más alta del mundo con 550 m hasta la inauguración de la Torre Burj Dubai (828 m), en 2010, disponen de estos gatos en su cimentación (David P Billington 1976).

Una operación conceptualmente similar sería la puesta en tensión de los tirantes de las bóvedas de cubiertas en naves industriales, además de facilitar el descimbramiento, compensa los efectos de la retracción del hormigón y permite la utilización de

aceros con tensiones elevadas, cuestiones decisivas con grandes luces. Freyssinet, citado por Fernández Ordoñez lo explica:

(...)Es una idea natural para todo carpintero de obra, que sabe por tradición tensar un tensor por medio de cuñas. Yo reemplacé las cuñas por gatos, que son más potentes y más cómodos; y llevé el esfuerzo hasta el valor necesario para descimbrar, lo que simplificaba mis cimbras y las hacía menos vulnerables a las avenidas ¿Dónde está el genio en todo eso? Es trabajo de artesano. ¿No lo había hecho nadie antes que yo? Antes y después. A lo sumo, todo eso justificaba apenas un ensayo. Como no me gusta correr riesgos sin necesidad, hice ese ensayo. Pero si, después de haber demostrado que un determinado dispositivo era bueno y útil, yo hubiera vacilado en emplearlo con la excusa de que no se había usado antes, me habría considerado como el último de los cobardes (Fernández Ordóñez 1978).

El ensayo al que hace referencia Freyssinet era un arco de 50 m y 2 m de canto:

El tirante de esta bóveda -dice Lebellet- era un prisma de hormigón atravesado en sentido longitudinal por 1200 hilos de 10 mm., no adheridos al hormigón, tensados por pares, apoyados contra él y anclados por medio de cuñas metálicas. Bajo la acción de cargas puestas en juego en el curso de los ensayos, el hormigón de este tirante permanecía siempre comprimido. La pieza, así realizada, era pues -de hecho- la primera obra de hormigón pretensado, en el sentido que Freyssinet ha dado a esta expresión (Fernández Ordóñez 1978).

6.2.31 Cimbras de madera. Introducción del clavo en la construcción.

Los cabrios del andarivel de Plougastel son otro magnífico ejemplo de este tipo de mástiles. Este procedimiento de cimbras de madera que ideó Freyssinet, conocido con el

nombre de charpentiers cloués, le permitía realizar sus obras más conocidas, los hangares de Orly y las bóvedas de Plougastel. En este último puente, y para el hormigonado de sus tres arcos idénticos, proyectó una inmensa cimbra-arco de 150 m. de luz, construyéndola en una orilla y trasladándola flotando sobre dos barcazas sucesivamente a cada uno de los arcos (Fernández Ordóñez 1978).

La cimbra de Plougastel es un reto estructural por si mismo, con 176 m de luz, desarrolló la técnica de maderas delgadas, claveteadas con puntas pequeñas y múltiples y rejuntó los ensambles a compresión con mortero de cemento. Anteriormente las cimbras se construía con madera ensamblado por medio de bulones, en las que los agujeros posteriormente debido a las tensiones adquirirían una forma ovalada, lo que daba a que la presión variase entre los elementos, de tal forma que los entramados estaban sujetos a importantes deformaciones. Además estas uniones, conllevaban una considerable labor de carpintería.

Por ello Freyssinet dispuso la utilización de planchas o tiras flexibles de madera logrando la rigidización por medio de clavos.

Otro de los elementos fundamentales de las cimbras de Freyssinet era el mástil, constituido por un prisma de sección triangular variables mediante tres nervios principales, dando lugar a una forma de huso, rigidizado por diagonales en los tres planos.

Sin embargo esta técnica en las cimbras, falló en el puente de Sandö probablemente por no adaptarse durante la construcción al antifunicular de las cargas, perecieron 17 personas, y se realizó una nueva cimbra más conservadora. En la autopista de Caracas diseñó una cimbra de madera especial con la técnica de la estructura de madera clavada que en este caso asoció a tableros contrachapados. Al tener estos tableros la misma resistencia en

Gato plano (Fernández Ordóñez 1978, p. 267)

Gato plano inserto en bloque de hormigón (Fernández Ordóñez 1978, p. 267)

todas las direcciones pueden funcionar como cartelas de unión.

6.2.32 Cimbras deslizantes

Las cimbras deslizantes que facilitan el desencofrado y el encofrado de tramos sucesivos se maniobran en las obras de Freyssinet por medio de la deformación transversal de tirantes, por parejas de cables, de forma que se compensaba los efectos de la retracción con aceros de alta resistencia. Este medio auxiliar puede ser considerado como una utilización precursora del pretensado. Esta posibilidad del hormigonado sucesivo mediante el movimiento de la cimbra fue utilizada en los hangares de Orly en 1921.

También contribuyó al desarrollo de las bóvedas de hormigón armado la idea aplicada por Freyssinet en 1913 de realizar los arcos formeros o nervios hacia el exterior en vez de por debajo de las mismas. De esta manera las cimbras se podían ir desplazando por debajo, realización que hizo en 1916 (Fernández Ordóñez 1978).

6.2.33 Gato plano

Anteriormente a la invención del gato plano Freyssinet había desarrollado los gatos flexibles que eran de cuero en forma de tubos cerrados o globos que se inflaban con agua y disponían de una gran capacidad de carga. La patente del gato plano se presenta el 01 de agosto de 1938, se concede el 21 de agosto de 1939, habiendo sido utilizado por Freyssinet por primera vez en las Puertas de Hierro de la Presa del río Fodda en 1936.

Un gato plano consiste en dos chapas iguales, inicialmente en contacto, sometidas a la única condición de tener un contorno común, sin ángulos vivos. Estas láminas están unidas a lo largo de todo su borde por medio de un anillo hueco de hierro de muy buena calidad, cuya sección tiene la forma de tres cuartos de círculo. Se obtiene así un saco estanco; cuando se le infla con

un líquido a presión, las planchas se separan, y el diámetro de los anillos aumenta a expensas de la zona de acortamiento. Naturalmente, los esfuerzos en el metal sobrepasan en mucho el límite elástico (en todo este dominio, los espíritus que no pueden comprender nada fuera de esquemas elásticos lo pasan muy mal).

El gato plano es otro invento genial de Freyssinet. Simple envoltura plana de chapa, de una ligereza admirable y una potencia estática ilimitada casi gratuita, permite utilizar fuerzas de una magnitud incomparablemente superiores a las empleadas jamás por el hombre en la historia de la construcción. Sin necesidad de cables ni armaduras, a un precio muy reducido de la unidad de compresión, se pueden modificar las condiciones de equilibrio de un terreno fisurable, o las características de los terrenos esponjosos o blandos, compactándolos con compresiones, actuando en cualquier dirección; se puede actuar en pistas para aviones, esclusas, ataguías, grandes presas, muelles, barcos, rompeolas, y todas aquellas grandes obras públicas en que el hombre construye sujeto y atrapado por la tierra y el mar (Fernández Ordóñez 1978).

6.2.34 Bóvedas laminares

Una vez dominada la técnica del descimbramiento, desencofrado, hormigonado con vibración y endurecimiento rápido, cimbras rodantes y descimbramiento por medio de gatos, en 1918 Freyssinet construye sus primeras bóvedas laminares, realiza unas bóvedas de arista invertidas, trabajando a tracción como membranas, construye las marquesinas laminares de la Gare d'Austerlitz, que tienen entre cuatro y seis centímetros de espesor y llevan un tirante horizontal pretensado donde atacan los tirantes inclinados.

A pesar de su espesor y de los años transcurridos, las marquesinas de Austerlitz presentan un formidable aspecto.

No se aprecian grietas ni flechas. Su hormigón, ya viejo, ha tomado ese color indefinido y hermoso entre gris y siena de la piedra antigua, de las esculturas de hormigón de Chillida. Son muy bellos los encuentros de las pechinas que se forman al encajar las marquesinas en las naves laterales. Esta obra, pionera de las láminas de hormigón armado, muy anterior a las de Maillart y Torroja, arrinconada y olvidada en una vieja nave de expediciones de una estación de París, desconocida de la mayoría de los ingenieros, críticos o estudiosos, como tantas obras de Freyssinet, impresiona con su soberbia y solitaria dignidad (Fernández Ordóñez 1978).

Sus resultados son, como dice J.A. Fernández Ordoñez, “guiados por una estricta utilización de los materiales, lejos de toda especulación teórica o estética” (Fernández Ordóñez 1978).

Billington, no obstante, determina que estas bóvedas conoides de Freyssinet están dotadas de una gran fuerza visual, en mayor medida que las que estaban realizando entonces los alemanes. Sin embargo, Freyssinet no se decantó por las cuestiones estéticas del material, desviándose, según Billington del Arte Estructural (David P Billington 2013).

6.2.35 Alas de avión

En 1953 se publicó un artículo en la revista “Technique et science aéronautique, nº 5, por Jean Brocard y Georges Bruner. Ambos trabajaban en los talleres de aviación Louis Breguet como director de investigaciones y como jefe del departamento de estudios respectivamente. En 1946 proyectan la construcción de un planeador de tipo aire-suelo, que se soltase desde un avión portador que se sacrificaría en cada vuelo. La fabricación había de ser rápida y económica.

El 9 de febrero de 1949, la primera ala de hormigón pretensado pasa con éxito una prueba estática de flexión. Su peso

Armadura de timón para barco de hormigón (Fernández Ordóñez 1978, p. 293)

era sólo un 15% superior al de un ala metálica de construcción tradicional. No obstante, los tiempos de fabricación se reducían de 3,4 a 1 para una serie de cincuenta alas y de 5 a 1 en el caso de una serie de quinientas.

Posteriormente, se conoció el destino final de estos planeadores que no era otro que tratarse de bombas planeadoras (Breguet 910). Esta bomba debía poder cargarse con una tonelada de melinita. Medía 4,80 metros de largo y 4 metros de envergadura; podía alcanzar los 800 km/h desde una altura de 5.000 metros, con un alcance de 50 kilómetros.

Se probaron seis aparatos en los años 1952 y 1953, pero la fabricación de cuatrocientos aparatos más fue detenida en 1954 debido a la falta de fiabilidad del sistema de control remoto (Eugene Freyssinet 2003).

Hace algún tiempo, dos ingenieros de aviones Breguet, los señores Brocard y Bruner, vinieron a pedirme que les ayudase a construir alas de avión en hormigón pretensado. Al principio, a modo de prueba, deseaban aletas para espoletas de obús. Confieso que mi primera impresión fue de estar tratando con dos locos. Pero cuando me expusieron todos los aspectos de su problema, vi que difería muy poco del de mis postes de Montargir. En unas horas de trabajo, y siguiendo el modelo de mis materiales de 1933, pude definir varios métodos de construcción de moldes que permitían colar morteros similares a los hormigones de Montargis en torno a cuerdas de piano tensadas, y a una escala aún más reducida.

Aplicados por hombres con una fe tan profunda como la que me animaba a mí, estos métodos han permitido que Breguet pudiese producir, en poco tiempo, unas alas impecables que han resistido todas las pruebas impuestas por los servicios de recepción. Presentadas en el último salón de la aviación, llamaron la atención de constructores de aviones de todo el mundo

Barco de hormigón armado en construcción (Fernández Ordóñez 1978, p. 293)

por sus sorprendentes cualidades y su coste reducido (Eugene Freyssinet 2003).

6.2.36 Barcos de hormigón

Ante la escasez de acero los Servicios Públicos franceses recomiendan la construcción de barcos de hormigón. El 29 de julio de 1918 el Comisario de Transportes Marítimos francés encarga a distintos constructores un pedido de barcos de 1.000 Tn. Ingenieros como Owen Williams, crean su propia firma, la Williams Concrete Structures Limited, para el desarrollo industrial de estos barcos. La industria llegó a tener un desarrollo considerable hasta 1921 (Bernabeu Larena 2007b)

Freyssinet, junto a Limousin, formó una sociedad de barcos de hormigón armado en Rouen, con astilleros en Grand-Quebilly. En 1921 consiguieron botar 16 naves de tipo "Lezard" de 55 m de longitud. Se utilizaban los gatos flexibles, también inventados por Freyssinet para desencostrar los barcos.

6.3 Antecedentes a la patente de Freyssinet

Tal y como aclara Freyssinet, en el prólogo del libro de su discípulo Guyon, sobre la naturaleza del pretensado, "Esta idea es de una extrema sencillez en su fundamento, incluso si no lo es en la ejecución". Es por ello, también, que pese a que estaba muy presente a lo largo de la historia de la construcción y se realizaron diversas tentativas tanto en el hormigón, como anterior y posteriormente con otros materiales, fue más complicado acceder al "cómo" que acceder al "qué", y en sentido inverso, hacer posible el "cómo" es lo que ha dado pie a la comprensión de todas las implicaciones alojadas en la idea del pretensado, el "qué".

M. Sanabra-Loewe y J. Capellà-Llovera (2014) realizan un artículo muy pormenorizado y pertinente sobre las etapas en las que ha tenido que desarrollarse la idea del pretensado hasta la comprensión completa del concepto, etapas que, en todo caso, también podrían aplicarse a cualquier otro material que se haya desarrollado o que se desarrolle en el futuro. Estas fases o edades serían, siguiendo la terminología de sus autores: la intuición, la ingeniería optimista, tratando de minimizar las pérdidas y el pretensado eficaz (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

En la primera etapa correspondería a aquella en la que los beneficios de la tecnología eran intuitivos por el diseñador, pero sin una comprensión clara de las implicaciones tecnológicas de la misma.

En la segunda etapa, se aplican los principios rectores de la ingeniería estudiando metódicamente la tecnología y buscando de forma empírica y racional los principios rectores de dicha tecnología. En el caso concreto del pretensado se diseña específicamente el sistema de cargas opuesto a la carga muerta para obtener un sistema calculado de antemano en servicio.

En la tercera etapa edad se revisan los errores del sistema planteado, en el caso que nos ocupa, se reconocerían las pérdidas existentes, si bien queda un largo camino para poder cuantificarlas y controlarlas eficazmente.

En la cuarta etapa se completa la comprensión del funcionamiento del material y de su comportamiento a largo plazo, de tal manera que se ofrecen soluciones basadas en un conocimiento racional y científico que son capaces de dar una respuesta positiva a los problemas planteados en el sistema, esto es, a los efectos de las pérdidas.

Entendemos que esta división resulta adecuada a la comprensión de la tecnología del pretensado y a los pasos que se han ido dando hasta conseguir el conocimiento presente. En este escenario, el hormigón no sería en ningún caso ni el único ni el primer material en el cual se ha aplicado esta tecnología, pero sí sería el que ha conseguido tomar conciencia de su desarrollo y entrar con plenitud en su cuarta etapa. Por tanto, su estudio también podría ser aplicable a otros materiales que apliquen la presente tecnología u otra que pudiera asimilarse, según los conceptos a estudiar (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

Entre las primeras pruebas de la formalización de la precompresión del hormigón en los Estados Unidos, habría de citarse la de Jackson de San Francisco (Leonhardt 1988).

En 1886, solicitó una patente para la "construcción de piedra artificial y pavimentos de hormigón", en los cuales la precompresión se introducía tensando las varillas de refuerzo dispuestas en la losa. En la patente no se hace mención expresa a evitar con el tesado de las barras de hierro las grietas de tracción en hormigón, pero las indicaciones de los detalles de construcción resultan elocuentes por sí mismas (Moell 1958). Se cita a menudo esta patente como origen del pretensado, y de la misma derivan los estudios de Curzon Dobell, que dispone de una

patente de pavimentos pretensados de 1958, el cual se remonta a dicha patente de 1886. Fernández Ordoñez entiende que se trata de mero chauvinismo.

Otra injusticia histórica, basada en un desconocimiento del tema, la comete el americano Curzon Dobell estudiando los orígenes del pretensado (Journal of the American Concrete Institute, Mayo 1950) cuando analiza las primeras patentes. Revestido de un trasnochado chauvinismo, Dobell nos pretende hacer creer que la mayoría de los primeros inventos del pretensado eran americanos. Se remonta nada menos que a 1886, considerando que la patente de Jackson es la primera de la historia del pretensado, y tras ella describe muchas otras más. Sin embargo a partir de 1886 es evidente y bien cierto que un país tan grande como los Estados Unidos, con la mayor potencia industrial y económica del mundo, no fue capaz de construir un sólo elemento pretensado, por pequeño que fuera, antes de que Freyssinet introdujera sus procedimientos Norteamérica, el 11 Mayo de 1934 (Fernández Ordóñez 1978).

No obstante, es en los Estados Unidos donde se desarrolla la tecnología del pretensado a través de entramados de madera y metálicos, por lo que el traslado de la idea de un material a otro no sería tan descabellado, ni simplemente a un deseo de preeminencia. De hecho, Peter Jackson (1829-1908), dedicó tres décadas, desde 1858 a 1888, al estudio y desarrollo de la aplicación del pretensado, obteniendo al menos cinco patentes para el desarrollo de estos sistemas, si bien sus patentes carecen de ciertos elementos básicos de ingeniería en relación a la mecánica y a la eficiencia. Ciertamente el acercamiento de Jackson tenía mucho de intuitivo y es probable que no existiese un verdadero entendimiento de cómo trabajaban sus propias patentes, las cerchas de entonces se pretensaban para mejorar su rigidez y simplificar las uniones entre elementos, las del tipo Whipple podían estar en su mente cuando Jackson patentó sus sistemas ya que eran muy populares por aquel entonces.

Jackson tomó la técnica de construcción de cerchas y la del pretensado, ambas de la construcción de puentes y las aplicó a la edificación, tanto a la mampostería como al hormigón. Sus soluciones originales y sugerentes, carecen, sin embargo de rigor científico (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

6.3.1 Aplicación histórica del pretensado

El principio del pretensado es tan antiguo como el hilo de coser, el arco, los tambores, las tiendas temporales o los toldos y en todos estos descubrimientos era consustancial las pérdidas de la tensión y la necesidad de un reajuste de mantenimiento, en realidad consustancial a todas las estructuras, si bien con diferentes fases temporales.

Los egipcios pretensaban el mástil de sus veleros estabilizándose por el pretensado mantenido, y también pretensaban las estructuras de estos barcos mediante cuerdas retorcidas para evitar el abollamiento. También se pueden pretensar las estructuras induciendo esfuerzos térmicos en los materiales, como en los barriles que unían sus piezas mediante un zuncho metálico caliente que cuando enfriaba dejaba la estructura comprimida.

También se puede utilizar el peso para crear una tensión previa beneficiosa, como los pináculos de las catedrales góticas que ayudaban a prevenir el deslizamiento de los contrafuertes por una compresión previa de los mismos (Gasparini 2006).

Más adelante en la historia aparecen arcos de fábrica atados por postes de madera como en la Mezquita de Kairouan SIX dC o bien con barras de hierro, como en las iglesias medievales lombardas como la catedral de Parma, SXII dC, en cuyo caso, esos arcos, cuya técnica se hizo clásica en el Renacimiento italiano, no son estrictamente pretensados o lo son sólo ligeramente, no obstante sirvieron de inspiración a otros ingenieros, ya que lo nombran entre otros Whipple o Freyssinet (Sanabra-loewe and

US Patent X5862 (Long 1830, p. 01)

US Patent 4726 (Howe 1846, p. 01)

Capellà-llovera 2014).

6.3.2 Entramados americanos

En la segunda etapa de las estructuras pretensada, la denominada por los autores Sanabra-Loewe y Capellà-Llovera, como ingeniería optimista, encontramos estructuras de madera, como las desarrolladas por el ingeniero militar, Stephen Harriman Long, que participó en el diseño y construcción del ferrocarril de Baltimore a Ohio. Construyó el puente pretensado con cerchas de Baltimore en 1829, llamado puente Jackson, en honor al séptimo presidente de los Estados Unidos (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

Disponía de una luz de unos 15 m, compuesta de dos cerchas transversales arriostradas. Las armaduras se construyeron con una forma ligeramente arqueada y antes de finalizarse se cargaron previamente, se arriostraron, manteniendo así la pretensión que mejoraba el comportamiento del conjunto estructural. Después del arriostramiento y posterior liberación la estructura deviene más rígida.

Lo que no tuvo en cuenta Long fue la fluencia y las pérdidas de tensión con el tiempo que hacían perder al mismo tiempo su eficacia. No obstante el puente se desmontó en 1860. Long hizo otras propuestas en madera pretensada y sugirió la posibilidad de pretensar hierro.

S.H. Long patentó dos versiones de entramado, uno en 1830 y otra en 1839. En la primera pretensa las diagonales del entramado a compresión como las verticales a tracción. El efecto de estas en el entramado es tal que se evita cambio de forma mediante la tracción. En la patente de 1839 las cuñas se disponen entre el poste vertical y el cordón precomprimiendo los montantes verticales y tensando las diagonales (Gasparini and Porto 2003).

Harbach 1946 (Gasparini 1997, p. 124)

Amasa Stone 1849 (Gasparini 1997, p. 124)

Otros diseñadores, técnicos y artesanos se inspiraron en su trabajo, entre ellos: Nathaniel Rider, Stephen Moulton William, y Thomas y Caleb Pratt. Los cuales patentaron y construyeron sus propias variaciones de estructuras de madera pretensadas o estructuras de hierro y madera pretensada combinadas. Sus estructuras de madera pretensadas, en particular la de Howe, fueron ampliamente utilizadas durante la mitad del SXIX (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

El pretensado en estos puentes se lograba introduciendo cuñas de madera o de hierro o bien apretando con tuercas en varillas roscadas de hierro. El nivel de pretensado era controlado de forma cualitativa, mediante la observación de las holguras o utilizando una carga pesada en esa luz. Lo más significativo de estos pretensados, era que se lograba una simplificación en las conexiones, pudiendo incluso eliminar algunas conexiones a tracción. Además mientras se mantenía el pretensado, aumentaba la rigidez del puente (Gasparini and Porto 2003).

William Howe, también consiguió dos patentes para puentes pretensados, en 1840, una julio y otra en agosto. La primera patente era un diseño todo en madera, utilizando también cuñas, pero de un modo distinto a Long. En la segunda patente sustituyó los postes de madera vertical por barras de hierro forjado roscado y pretensaba el puente apretando las tuercas, un procedimiento mucho más simple y eficaz que mediante cuñas.

El detalle utilizado por Howe para transferir la fuerza de tracción de la barra a las diagonales es crítica, ya que si la fuerza se transfiere por un soporte perpendicular a la fibra del cordón, se puede producir el aplastamiento del cordón. Además, la contracción en las direcciones radial y tangencial en la madera es mucho mayor que la que se da en la dirección de las fibras (Gasparini and Porto 2003).

Así, el aplastamiento de las fibras del cordón como la

contracción podrían provocar una pérdida de pretensado. Para evitarlo se estudian dos mejoras, que resultan críticas y que le permite a Howe, realizar la armadura dominante en los Estados Unidos, en el periodo de 1840 a 1870. Esta mejoras fueron, en primer lugar; la utilización de diagonales que se extendían sobre un único panel. Y en segundo lugar la introducción de piezas de función de hierro con almas que se extendían a través del cordón con el fin de transferir la fuerza axial en la varilla directamente a las diagonales, la eliminación las tracciones en los apoyos perpendiculares a la fibra de los cordones.

No se sabe si fue el propio Howe, o su cuñado Amasa Stone, que era contratista, quien ideó estas mejoras, pero Amasa Stone construyó algunas de las primeras cerchas Howe en Nueva Inglaterra. A partir de 1845, las cerchas Howe completamente de hierro se comenzaron a construir por Richard B. Osborn, Frederick Harbach y Amasa Stone (Gasparini and Porto 2003).

También se probó a pretensar el hierro forjado, Squire Whipple, que trabajó con Long en el ferrocarril de Baltimore, desarrolló un sistema propio en los Estados Unidos, en 1840, patentada poco después y construida en 1845, semejante a la que posteriormente realizará Wild para el Arno. En ella el cordón superior conforma un arco, mediante segmentos de hierro fundido atornillados, mientras que el cordón inferior es un tendón de hierro forjado recto. Este tendón se tensa y precomprime los montantes verticales. Este sistema tuvo éxito fundamentalmente en las décadas de 1850-1860.

El caso de las cerchas americanas sería paradigmático de los descubrimientos que representan un paso adelante y se descartan a favor de opciones que, con el tiempo, nos pueden parecer menos fértiles.

Entre 1860 y 1880, hicieron comunes en ingeniería los procedimientos para el análisis de cerchas estáticamente

US Patent 63714 (Fink 1867, p. 01)

US Patent 104110 (Cartter 1870, p. 01)

determinadas, mientras que las versiones de las cerchas Howe y Pratt que eran pretensadas e hiperestáticas, fueran abandonadas por los ingenieros. Parece que primaba la fiabilidad de los cálculos y la conciencia analítica de los mismos frente a unas mejoras innegables pero que hacían presente la ignorancia del conocimiento de los materiales aún cuando funcionaran mejor y fuesen más eficientes (Gasparini 2006).

Otra interesante aportación al pretensado es el de la Viga Fink, desarrollada en 1850, que será utilizada posteriormente en edificación. Dispuso varias vigas con este sistema en la línea de ferrocarriles de Louisville a Nashville, de la cual era responsable. Se puede destacar el puente de Green River de 1857, con cinco arcos y una longitud de unos 300 m con una altura máxima de 40 m, apoyado en pilares de piedra, que fue destruido durante la Guerra Civil americana (Brufau Niubó 2007).

Algo similar ocurriría con los métodos de cálculo plásticos, más sencillos y adaptados a materiales como el hormigón, que fueron descartados a favor de los complejos cálculos matemáticos cuando las herramientas disponibles pudieron acometerlos. Probablemente la complejidad de los mismos ofrecía una imagen de seguridad y preparación en los calculistas que les otorgaba por ello una mayor veracidad, lo cual puede no ajustarse a la realidad.

6.3.3 Entramados Europeos

En Europa, las primeras estructuras pretensadas con criterios ingenieriles serían las de hierro fundido en celosía, con vigas compuestas para puentes diseñados y contruidos principalmente entre 1836 aproximadamente, por el ingeniero Robert Stephenson y el contratista George Parker, ambos ingleses, si bien hay autores que consideran que fue Charles Blacker Vignoles el que realizó la invención (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

La disposición de estos tendones no era correcta, no

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Dee bridge disaster (The Illustrated London News 1847)

obstante se construyeron numerosos puentes hasta que colapso uno de ellos sobre el río Dee, ocasionando la muerte de cinco personas. Este desastre obligó a Stephenson a reforzar numerosos puentes y decidió dejar de utilizar este sistema.

El puente sobre el río Arno, que habían encargado a Stephenson fue rediseñado, aparentemente por Wild, dando como resultado un puente de hierro fundido pretensado eficiente. El puente resultante conserva la idea de utilizar segmentos de hierro fundido atornillados, pero formando un entramado en el que el cordón inferior era plano y el superior arqueado, por lo que resultaba eficientemente comprimido. Los tendones pretensados eran rectos y paralelos al cordón inferior, esto es, donde era preciso (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

6.3.4 Pretensado aplicado al hormigón en los Estados Unidos

Como ya se ha mencionado anteriormente las patentes de Jackson recogen la creación de pavimentos, pisos y cubiertas, donde se colocan unas barras de hierro con la finalidad de absorber las tensiones de tracción y el empuje horizontal de las bóvedas, si bien no expresa que quiera evitar la fisuración del hormigón. En Norteamérica, las distintas patentes de Jackson, aun carentes de rigor técnico, tenían una clara intuición y sirvieron de inspiración a otros trabajos (Moell 1958).

Entre estos cabe señalar el de Thomas A. Lee, que consiguió una patente en 1890 para pisos planos realizados con fábrica pretensada de bloques huecos. Las ventajas de este sistema también las sitúa su propio autor en las propiedades ignífugas, por lo que en sus dibujos aparecen azulejos (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

En 1892, consigue una nueva patente introduciendo algunas variaciones para que ampliar la gama de los tipos estructurales.

También consiguió dos patentes de cables de unión realizados con dos o cuatro hilos, siendo este la primera aplicación del acero de alta resistencia a las estructuras de hormigón (o fábrica) pretensada, y también la primera aplicación de tensión con un refuerzo por adhesión, incluso describe un sistema de anclaje rudimentario adecuado para cargas bajas en los cables (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

Después Lee lanzaría su propia empresa Lee Fire Proof Constuction Co, especializada en la aplicación de su sistema, teniendo considerable fortuna. De hecho, todavía en los años 1940-1960, había compañías en todos los estados produciendo elementos como baldosas prefabricadas y pretensadas, así como elementos segmentales de hormigón pretensado. En el SXX se conocía este tipo estructural como el Dox Plank (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

La importancia de las pérdidas debidas a la retracción del hormigón fue reconocida en primer lugar por Charles R. Steiner en los EEUU hacia 1908. Reconocía su contracción, pero no la fluencia, que sería analizada por Freyssinet. El sistema de Steiner consistía en la colocación de varillas en el interior del hormigón con objeto de precomprimirlo para lo cual había dejado en el mismo unos huecos a tal efecto. La carga previa se aplicaba en varias fases mientras se vertía el hormigón (Moell 1958).

6.3.5 Pretensado aplicado al hormigón en Europa

Algunos años después, en 1888 C.F.W. Doehring, un fabricante alemán de losas y pequeñas vigas, solicita una patente para pretensado de armaduras en elementos de hormigón armado ejecutados in situ, sobre todo para paredes y suelos, que se cita como el primer sistema de estructura pretensada en Europa. No obstante, cabe señalar que esta patente no se refiere a elementos estructurales (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

US Patent 347474 (Doerhing 1886, p. 01)

US Patent 672379 (Koenen 1901, p. 01)

Estos elementos, según Doehring servirían como protección contra el fuego en suelos de madera. Doehring pensaba que la fuerza de tracción haría que ambos tanto el mortero como los alambres, rompiesen simultáneamente dado que los alambres habían sido estirados previamente. Desarrolló este procedimiento y confió en que entre ambos materiales existiría una buena adherencia (Ayats Calsat 2004a).

La idea era empotrar a través de unos orificios en unos soportes empotrados en paredes o sujetos a las vigas de techo, unos cables o alambres o varios de ellos que se extenderán por toda la superficie, en una sola pieza que se tensará traccionando de los extremos. Para realizar el tesado posteriormente se enrollará el alambre fijándolo a un objeto con forma de barra, fijándose posteriormente. Las celosías tenían como misión funcionar como acabado a prueba de fuego en los sistemas estructurales de pisos de madera (Moell 1958).

En 1894, Françoise Chaudy, francés, fue el primer ingeniero europeo que diseñó una solución efectiva de postesado en una viga de hormigón previamente endurecido. Su propuesta consistía en realizar una viga con una ranura a lo largo del centro de la cubierta. Posteriormente, se disponía en dicha ranura una barra que sería tesada contra unas tapas de hierro fundido colocadas en ambos extremos. De esta forma se produciría un momento negativo. Consideraba que el sistema podía también utilizarse con otros materiales que eran débiles a tracción como la fundición.

Sus ideas se publicaron en una revista científica, precedidos por otro pequeño artículo sobre el cálculo de placas de cualquier material. Su medio, el Boletín de la Sociedad de ingenieros civiles francés (Société des Ingénieurs Civil in Paris), era la principal publicación de esta sociedad y por lo tanto era muy influyente. Sin embargo, la influencia de Chaudy sobre otros ingenieros no ha sido aún explorada (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

US Patent 461028 (Lee 1891, p. 01)

US Patent 513794 (Lee 1894, p. 01)

En 1896, el austriaco Mandl en su escrito "Zur Theorie der Cementeise-Konstruktionen" concluye que la carga en una placa Monier produce en las armaduras tensiones de tracción que originan en el hormigón fuerzas de compresión excéntricas, de forma que disminuyen los esfuerzos interiores de las piezas. Este efecto favorable, continúa, podría aumentarse mediante el tesado de las armaduras con una fuerza exterior que fuese suprimida una vez endurecido el hormigón. De esta forma, se produciría en la pieza de hormigón aún sin cargar, una fuerza de compresión excéntrica que actuaría sobre el hormigón en sentido contrario a la carga. Cuidando la elección de las fuerzas tensoras introducidas en la armadura, se podría aprovechar mucho mejor la resistencia del hormigón. El pretensado podría lograrse por medios mecánicos o bien por medios térmicos colocando la armadura en el hormigón a una temperatura elevada y manteniéndola hasta que este hubiese endurecido. Establece incluso que con una diferencia de temperaturas de 40°C se podría obtener una tensión de 1100 Kg/cm². Así, en el documento queda la teoría definida, ahora resta como decía Freyssinet su puesta efectiva en ejecución (Moell 1958).

Tanto este artículo como otras publicaciones suyas tenían algunos aspectos similares al de Chaudy, aunque incluía novedades de interés. Estos artículos eran considerablemente más extensos y se presentaban como un intento de resolver teóricamente el diseño de las estructuras de hormigón armado. En el estudio se desarrolla y describe que la función del pretensado sería la de inducir una fuerza de compresión en la zona traccionada de la viga de hormigón para que ambas se contrarrestasen (Ayats Calsat 2004b).

Al igual que Chaudy, estudio inicialmente el problema de una placa de hormigón. Tras el desarrollo matemático preciso, proponía pretensar la placa mediante el tesado del refuerzo, que se realizaría en los alambres, antes de verter el hormigón para liberarlos después de endurecida la pieza.

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Charles Rabut, 1909, Paris, Ménsulas en hormigón armado. Foto: Jacques Mossot.
<http://structurae.info/photos/137051>

Wayss había convencido anteriormente al ingeniero Koenen, que entonces trabajaba para la Administración Pública, para utilizar el hormigón armado. Y tras ello Koenen se interesa por este material intentando mejorarlo con distintos métodos entre ellos el de tensar la armadura para evitar las fisuras. En el mismo año de las pruebas de Mandl, 1896, Mathias Koenen deja su trabajo en la Administración para asociarse con Gustav Adolf Freytag, que formaría posteriormente la empresa Wayss & Freytag AG. En el mismo año, 1896, se completa la primera estructura enteramente en hormigón armado, el Liceo Víctor Hugo en París (Grote and Marrey 2000).

Mandl, al igual que Koenen, consideraba que la pérdida del pretensado con el tiempo era debida al acortamiento elástico del hormigón, no tomando en consideración los efectos de retracción y fluencia que se descubrirían más tarde.

Así el artículo contendría las bases de una propuesta europea para hormigón pretensado-pretensado utilizando hilos tesados. Es factible que Mandl se inspirase en la propuesta de Doehring, pero fue mucho más lejos comprendiendo el concepto del pretensado y sus beneficios estructurales (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

Trabajando sobre el tema Koenen y Lundt en Alemania fueron más lejos desarrollando un informe en 1907, sobre las pérdidas del pretensado debido al acortamiento elástico del hormigón. Ellos acometieron experiencias sistemáticas con la intención de ampliar el campo de aplicación del hormigón armado. Estos estudios tuvieron relevancia a posteriori debido a que los alemanes intentaron apropiarse de la invención en base a la patente de Koenen de 1912 y ahorrarse los pagos a Freyssinet por medio de este registro previo alemán.

Estos conflictos comerciales de patentes en este ambiente de guerras y entreguerras se intentaron "nacionalizar" para la

causa. Los profesores alemanes Morsh, Grat y Pucher mantuvieron la validez de la patente de Freyssinet. En todo caso Koenen en la propia patente determinaba que se producía la pérdida de la tensión con el tiempo y para resolver este problema proponía el hormigonado en dos fases, solución que se muestra poco válida en su ejecución.

Se debe nombrar al francés M. Rabut, profesor de Freyssinet que construyó en 1903 un voladizo de hormigón pretensado con una luz de 7 m para soportar una calle, de forma que se ampliaba la estación de tren de Saint Lazare sin renunciar a la anchura de la calle Roma, adyacente, que quedaba soportada por el voladizo. M. Rabut fue el primer ingeniero que impartió cursos sobre el hormigón en la École Polytechnique en 1897, y redactará de las Experiencias sur la resistance et les deformations e'ouvrages construits por L'Exposition de 1900. Este texto sirvió de base a las que serían las primeras normas europeas para el empleo del hormigón, denominadas "Circulaire Ministerielle Francaise sur l'emploi de béton armé de 1906, en las que también participará A. Mesnager (Anaya Díaz 2004).

El voladizo se construyó en tres fases. En la primera fase se colocó la parte inferior de las vigas de hormigón. En la segunda fase se pretensaba la parte superior del refuerzo, levantando el voladizo de forma que compensara parcialmente las cargas muertas. Y en la tercera y última fase se realizaba el resto del voladizo. Esta obra impresionó a Freyssinet y se puede decir que sembró en él la idea de pretensar las estructuras.

Antes de esta obra, Rabut ya había realizado un voladizo entre 1897 y 1900 en el Pereire Boulevard, pero no se conoce si ya utilizó el método de pretensado de Saint Lazare. No se conoce si para realizar la obra tuvo las influencias de Chaudy o de Julius Mandl, o incluso de Armand Cosidère, que era conocido suyo (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

Fig. 5.

Fig. 6.

Fig. 7.

Fig. 8.

En 1907, el noruego Jens G.F. Lund aseguró dos patentes en algunos países europeos sobre fábrica pretensada. Entendía Lund que los suelos de los interiores de los edificios actuaban como bóvedas, y que las fuerzas horizontales debían, por tanto, recogerse mediante tirantes. Al aumentar las cargas los tirantes dilatarían. La colocación de tirantes, de esta manera no impediría la dilatación del hormigón, ni evitaría la formación de fisuras en la superficie del mismo. Para evitarlo, habría que acudir a tesar los tirantes con un tensión apropiada, ello antes de proceder al desencofrado de los techos. Si los suelos se conforman mediante piezas sueltas prefabricadas, como pueden ser unas piezas huecas de hormigón armado, se puede conseguir este efecto comprimiendo las piezas sueltas, unas contra las otras mediante el tesado de los tirantes (Moell 1958).

Una de las patentes de Lund consistía en losas tesadas en una sola dirección colocando unas varillas de unión dentro de largas costillas de hormigón prefabricado. Se aplicaba el postesado una vez endurecido el hormigón.

Lund propone también, en otra patente, el postesado bidimensional para estas para estas piezas. En ella se organizaban los bloques de hormigón prefabricados en filas de dos direcciones con algo de separación entre las piezas en las dos direcciones para alojar los tirantes. Posteriormente se vertía el mortero en los espacios entre las filas y se procedía al tesado de los tirantes utilizando tuercas.

El problema de este sistema era que la precompresión conseguida era demasiado baja, el mortero de los huecos tendía a derramarse y era fácilmente comprimido. Todo ello ocasionaba una pérdidas de tensión de bastante consideración (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

En 1916, el encargado de obras británico Walter Wilson aseguró una patente para forjados y vigas de hormigón pretensado.

Fig.1.

Fig.2.

Fig.3.

Fig.4.

Fig.5.

Fig.6.

La propuesta carecía de rigor técnico pero mostraba una brillante intuición. El sistema de refuerzo sería en líneas generales un cordón superior y uno inferior ambos pretensados y fijos en sus extremos. Se tesarían mediante unos cables alrededor de ellos en forma de apoyos a 45°. Además, Wilson colocaba un cable principal con un diseño poligonal paralela a alma descrita anteriormente, la disposición de este cable sería plana y se situaría en la mitad de la luz en la parte inferior y en las articulaciones se situaría en la parte superior. Todo ello tratando de inducir un momento positivo mediante la tensión previa.

En 1918, el ingeniero británico Frederick Bolton aseguró una patente para un sistema de moldes de hormigón en segmentos, realizados en forma de U, para vigas o arcos donde el hormigón se disponía posteriormente. La idea de la utilización del pretensado aquí era para disponer los moldes juntos, pero no era aprovechada para el hormigón en sí (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

En 1918, el italiano Ernesto Mezzetti patentó un procedimiento para fabricar placas, vigas y tuberías incluyendo alambres colocados en dos direcciones dispuestos aislados o con varios hilos entrelazados. Estos alambres se colocarían en ambas caras de los elementos, con la excepción de las tuberías.

En 1919, el Checoslovaco Karl Wettstein comenzó a producir pretensado, vigas prefabricadas de hormigón utilizando cables delgados unidos directamente al hormigón. Poco después patentó sus sistema y lo extendió a placas, enrejados y otros elementos planos y planos.

En una proposición posterior de Weststein, posiblemente para la patente austriaca, menciona que los hilos dispuestos en la masa del hormigón debían tener un diámetro muy pequeño de 0,1 mm a 0,5 mm. Muy cercanos unos de otros y muy cercanos a las superficies finales. Los hilos se tesan al ser colocados en el molde y se relaja la tensión cuando el hormigón endurece. Con

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Fig. 1.

Fig. 5.

Fig. 4.

este procedimiento se fabricaría losas, placas y otras piezas de entre 6 a 10 y hasta 30 mm, con unas anchuras de 35 a 60 cm y longitudes de 2 a 6 m. Así el diseño resultaría muy similar a la propuesta de Hoyer, si bien de forma menos efectiva al pretensar a dos caras (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014) (Moell 1958).

Las placas están referidas en el libro de Moell dedicado a los diferentes sistemas de pretensado, como sistema de pretensado de placas. Para la armadura que se disponía en estas placas se utilizaban alambres de la máxima resistencia que estaban entonces a disposición con una resistencia a rotura de 14.000 a 20.000kg/cm². Tras la retracción y deformación lenta del hormigón todavía quedaban tensiones residuales elevadas (Moell 1958).

En 1923, el austriaco Fritz Emperger describió un sistema para producir tuberías de hormigón pretensado por procedimiento mecánico, con alambres de acero de alta resistencia pretensados. Estas tuberías eran capaces de soportar tensiones que iban de lo 160 a los 800 n/mm².

El procedimiento consiste en envolver un tubo de hormigón armado que hace de núcleo con un alambre tensado. Tras ello, se envuelve el conjunto con una capa de hormigón que protege a la armadura. Tiene cierta dificultad el que el tesado sea homogéneo con el procedimiento totalmente mecánico. Por ello a este procedimiento se puede combinar y/o modificar con procedimientos térmicos o hidráulicos (Moell 1958).

Hay que señalar también, que el tema del agrietamiento del hormigón armado y su resolución ha sido analizado con más intensidad a causa de la condición impuesta para la construcción de ferrocarriles prusianos. Solicitaban para sus construcciones a los contratistas que las tensiones de tracción que se producían en la parte inferior de las vigas de hormigón debían tener un coeficiente de seguridad contra las fisuras comprendido entre un

1,5 y un 2,5. Ello hacía prácticamente imposible la utilización de suelos de placas de hormigón armado en sus obras.

Para solucionar este problema Mathias Koenen, ingeniero del Estado Alemán, propone la creación de una tensión inicial de compresión en el hormigón, en la zona que se traccionaría con las cargas tesando la armadura colocada antes de hormigonar. En 1906, realizó una serie de pruebas sobre elementos de hormigón cuyo refuerzo había sido pretensado antes del vertido del hormigón. Koenen publicó los resultados de las pruebas, donde indicaba que las barras se habían pretensado a 58,9 MPa, pero reconocía que dicha fuerza se iba perdiendo con el tiempo (Moell 1958).

Más adelante, en 1912, el mismo Koenen patentó un nuevo sistema para vigas y losas tratando de evitar las pérdidas de tensión observadas en 1906. Pensaba que las pérdidas eran debidas a la contracción "recientemente descubierta". Su idea consistía en utilizar esa contracción para desarrollar la precompresión (Moell 1958).

Su nuevo sistema consistía en verter el hormigón en dos fase para que la contracción de la segunda fase, en la parte superior causase la compresión de la primera fase, en la parte inferior. Este sistema no funcionaba debido a que las pérdidas de tensión tenían más factores y a que no eran correctos los planteamientos de Koenen en cuanto a la disposición geométrica y hubiese aumentado el agrietamiento en vez de evitarlo (Moell 1958).

Sobre Koenen, se ha de referir, que fue el primero en 1886 en sentar las bases de una teoría para el cálculo de las placas del sistema Monier, avanzando el concepto de línea neutra (Anaya Díaz 2004).

6.3.6 Últimos antecedentes al pretensado en el hormigón

Siguiendo en la consideración de la armadura postesada y sin adherencia al hormigón, considerando además su colocación dentro de la masa del hormigón entre 1925 y 1928, varios investigadores trabajaron de forma independiente, fundamentalmente en el aspecto del tesado con posterioridad al endurecimiento del hormigón.

Se pueden citar las proposiciones del americano Dill (EEUU), donde las barras de acero eran sumergidas en asfalto líquido con carácter previo a su tesado para evitar la adherencia con el hormigón. Dill solicitó en América su patente en 1925 y le fue otorgada en 1928 (Moell 1958).

El sistema de Dill para pretensar el hormigón requería tendones hechos con "acero de alta resistencia" pretensados hasta cerca de su límite elástico. Dill no se refería al alambre de acero de alta resistencia moderno sino simplemente para varillas de acero (límite elástico f_y 200 MPa) en lugar de hierro. Antes de que le fuese concedida la patente, presentó otro modelo reemplazando el anterior, la justificación del cambio queda expresada en la memoria:

Mi ya mencionada aplicación, que precisa estirar el acero y mantenerlo estirado durante el proceso de fraguado, casi tan cerca de su límite elástico como sea posible, no producirá el resultado deseado por las siguientes razones: (1) El hormigón durante el proceso de fraguado, se contrae. El grado de contracción es variable. En general cuanto más rico es el hormigón en cemento mayor es la contracción. (2) El Hormigón, después de que el conjunto está aparentemente terminado, se contraerán con la pérdida de humedad (3) El hormigón se encogerá bajo la compresión a la misma velocidad en que se expande bajo la tensión.

Es reseñable que en el punto (3) parece describirse la deformación elástica más los efectos de la fluencia. Parece que no era totalmente consciente del concepto de fluencia pese a que utilizó en diversas ocasiones la palabra flujo. Dill ya estableció la idea de que la diferencia de que el hormigón y el acero habían de ser combinados de manera científica, justificando sus calidades, para obtener un hormigón sin fisuras y libre de tracciones. No obstante, no expresó que la elevada resistencia de los aceros fuera necesaria para obtener una fuerza de pretensado residual efectiva tras las pérdidas (Ayats Calsat 2004b).

Dill entendió que el hormigón sometido a pretensión sería un material que se ajustase a muy diversas aplicaciones, incluyendo puentes, forjados, vigas, postes, tanques y tuberías de presión (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

El americano Hewett aseguró en 1927 una versión mejorada de su sistema de tanques que hacía la construcción más sencilla a la vez que mejoraba la estanqueidad. El sistema según el autor podría aplicarse a otros elementos estructurales como vigas (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014). En esta patente de Hewett las varillas se frotaban con asfalto o con un material equivalente que prevenía la unión del acero con el hormigón. Además se añadían tensores para permitir el reapriete.

Cabe la posibilidad de que Hewett copiase la idea de Dill, pero no se dio conflicto inicialmente entre ambos, quizás debido a que Hewett era un contratista especializado en la construcción de tanques, mientras que la patente de Dill era más valorada para la construcción de postes.

Una vez que Dill autorizó su patente a la empresa Preload Corp, para la construcción de tanques, cuando no se establecía ningún detalle en la misma sobre el particular, si parece que surgieron roces (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014). En los Estados Unidos de América, la utilización del pretensado

US Patent 1413405 (Hewett 1922, p. 1-2)

US Patent 1818254 (Hewett 1931, p. 01)

comenzará por la construcción de depósitos de almacenamiento cilíndricos. Aparecen distintas compañías entre ellas la Crom Corporation y tal vez la más activa, la Preload Company de NYC.

En Alemania Faerber solicitó en 1927 una patente para un procedimiento aplicable a la fabricación de vigas de hormigón armado evitando la adherencia con el hormigón mediante un recubrimiento de la armadura, frotándola con parafina y luego envolviéndola en una lámina de metal o vendaje, para luego tesar barra por barra y anclarlas mediante un roscado, los aparatos tensores son ligeros. También propone que las armaduras estén dentro de tubos de chapa o de cartón relleno con un material apropiado. Uno de los inconvenientes del tesado de las armaduras antes del hormigonado sería que el encofrado requiere mucha rigidez para soportar las fuerzas ejercidas por el dispositivo tensor (Moell 1958).

La contracción del hormigón fue pronto aceptada por técnicos y científicos, la aceptación de la fluencia tendría un recorrido más complejo. Antes de la década de 1920 existían pocos estudios sobre este tema y la mayoría de los investigadores vivían en los Estados Unidos, Ira H. Woolson (1905), W.K. Hatt (1907), Franklin R. McMillan (1915) y E.B. Smith (1916) (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

Franklin R. McMillan (1915), estudio la retracción y la fluencia y también su interacción, aunque se enfocó principalmente en la retracción. Fue el primero en diseñar unas pruebas sistemáticas destinadas a comparar la deformación de los elementos en carga y sin carga, esenciales para medir la fluencia y la retracción (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

En la década de 1920 en el entorno académico, la fluencia era todavía en gran medida ignorada, con la excepción del inglés Oscar Faber que también se dedicó a analizar el fenómeno en sus investigaciones sobre el hormigón pretensado. Faber llegó

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

a ser una autoridad en el hormigón armado al publicar el libro Reinforced Concrete Design en 1912. Este libro en poco tiempo se hizo indispensable en las enseñanzas de ingeniería en el Reino Unido. Además de sus estudios sobre la fluencia, también realizó investigaciones sobre el rendimiento plástico del hormigón, analizando los dos temas en un extenso trabajo que presentó en 1927. Sus estudios se vieron corroborados posteriormente por los de William Henry Glanville (Sanabra-loewe and Capellà-llovera 2014).

Esto es, Faber hizo avances en la comprensión de las mismas dos propiedades que Freyssinet encontró obligatorias para comprender el hormigón pretensado. Sin embargo, las ideas de Faber parecen haber sido recibidas con frialdad por la comunidad ingenieril. Freyssinet realizó pruebas y ensayos durante la construcción del puente de Plougastel entre 1926 y 1929 en las cuales cuantificaba la fluencia. Los resultados de estos estudios de Freyssinet se publicaron en 1930, otros solo se publicaron tras su muerte (Eugene Freyssinet 1934).

Tras las pruebas de Glanville y los artículos de Freyssinet con el crédito de la realización de un puente como el Plougastel los científicos e ingenieros comenzaron a interesarse seriamente por la fluencia. Freyssinet consideraba que las interpretaciones inglesas sobre la fluencia eran incorrectas, dado que en sus estudios mezclaban los conceptos de la fluencia y el acortamiento elástico (Eugene Freyssinet 1934).

Franz Dischinger en Alemania también realizó estudios sobre el hormigón pretensado y la fluencia en el tiempo, sin embargo los estudios antes mencionados fueron por delante en el tiempo. Tras los antecedentes expuestos, se puede entender que la idea de tesar los cables en las piezas de hormigón había estado muy presente tanto en Europa como en América, pero que solo tras el conocimiento de la fluencia y retracción del hormigón su aplicación pudo ser efectiva.

Dischinger, Test planetarium, Jena, 1923.

6.4 El hormigón y las formas laminares

Otro enfoque estructural para el hormigón armado, sería incidir no en las cualidades del material, sino aprovechar unas formas concretas en las que el uso del material se vería optimizado.

En ese sentido avanzan las estructuras laminares que busca la resistencia a través de su forma gracias al comportamiento de membrana. Aquí el objetivo y también la posterior aplicación del pretensado estaría más ligado a mantener la forma geométrica propuesta en tanto que la misma es la que resulta óptima y la desviación con respecto a ésta, por diferentes eventualidades provoca flexiones o pandeos o falta de rigidez.

Siguiendo este discurso, podría incluso resultar paradójica su aplicación en las estructuras que buscan la resistencia mediante una forma que se adapte completamente a las cargas y sin embargo ello es oportuno en tanto que el pretensado estaría en este caso buscando estabilizar o rigidizar estas formas.

Dentro de estas estructuras, que resisten las cargas gracias a su forma y características geométricas, se encuentran las bóvedas, las cúpulas, las láminas y en general todas las estructuras cuya geometría deriva de líneas curvas y sistemas antifuniculares, en las cuales no aparecen momentos de flexión dado que las fuerzas se transmiten al terreno siguiendo el recorrido de la geometría de la forma (Gianoloa 2007).

La lámina o cáscara es un tipo de estructura que consigue salvar grandes luces utilizando pequeños espesores de material, lo cual es posible gracias a la forma de las mismas. Pueden disponer de curvatura simple o doble. Esta última, la doble hace factible que pueda soportar distintos estados de carga por su comportamiento de membrana, donde se dan únicamente tracciones y compresiones, evitando las flexiones y por tanto los momentos.

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Dishinger 1929, Leipzig Market Hall, exterior, planta, sección e interior.

Las primeras formas laminares disponían de una geometría sencilla, ya que además de las cuestiones estructurales había que dar respuesta a las cuestiones constructivas. El origen de los fundamentos se encontraría en la imitación de la naturaleza para producir formas estructurales, encontrando ejemplos como cáscaras de semillas, caparazones de insectos, etc (Orta Rial 2005).

Los primeros en aplicar estos conceptos a la práctica serían los alemanes, los cuales habían ido construyendo un cuerpo teórico para estas estructuras. Así, en 1887, G.A. Wayss describe la teoría de la membrana aplicada al diseño de depósitos de hormigón armado, de paredes circulares y destinados a transportar agua o gas. La teoría de la membrana ya había sido enunciada, sin embargo, en 1831 para cuerpos sólidos homogéneos, por G. Lamé y B. Clapeyron.

En 1908, la teoría matemática sobre láminas en su forma moderna quedaría plenamente formulada. Colaboran para ello, el ingeniero alemán H. Reissner (1874-1967) y, más tarde, el ingeniero austriaco Fritz Edler von Emperger (1862-1942). Según los razonamientos y desarrollos matemáticos que conforman la teoría de la membrana, con carácter general, el comportamiento de las láminas dependería de la curvatura, el grosor y los límites de la membrana (Martínez Martínez 2015).

Gracias a su forma y condiciones de sustentación, el espesor de la lámina podría ser muy pequeños, siempre y cuando los esfuerzos en la misma fuesen exclusivamente de compresión, tracción y tangenciales, sin producir flexiones. Con estas consideraciones, el tratamiento matemático sería el de una membrana.

En las láminas con las condiciones referidas anteriormente, la estructura se configura gracias a la forma y no debido a la sección. Este sistema que ofrecía grandes ventajas estructurales y también económicas se adaptaba completamente al hormigón armado

Fig. 1.

Fig. 2.

Fig. 1.

Fig. 2.

Fig. 3.

Fig. 4.

Fig. 5.

US Patent 1940401 (Dishinger 1933a, p. 01)

US Patent 1940402 (Dishinger 1933b, p. 01)

(Martínez Martínez 2015).

En cuanto a su puesta en práctica, Franz Dischinger, comenzó a trabajar en la constructora Dyckerhoff und Widmann AG en 1913, que era en aquel momento, junto con la compañía Wayss und Freitag la compañía líder en el proyecto y construcción de estructuras de hormigón armado.

En 1922, Walther Baursgeld de la empresa óptica Zeiss proyecta junto con Dischinger la realización de una lámina delgada con forma cupular hemisférica para un planetario en Jena, a semejanza de la primera cúpula geodésica, ejecutada para el primer planetario y construida en el mismo año para el Deutsche Museum en Munich. En este momento la empresa alemana Dyckerhoff & Widmann se convertirá en líder internacional en el desarrollo de estructuras laminares de hormigón armado.

Dischinger y Bauersfeld obtuvieron patentes conjuntas de lo que terminó conociéndose como el sistema Zeiss-Dywidag de láminas delgadas para cubiertas. A partir de ese momento la empresa buscó aplicaciones más generales para este sistema como mercados o fábricas. Debido a la tradición alemana por la ciencia y la matemática encontraron una forma de analizar matemáticamente estas cúpulas (García García and Osuna Redondo 2009).

Posteriormente, en 1923, Dischinger intenta diseñar otra cúpula para cubrir esta vez, un espacio de planta casi cuadrada. No obstante, los cálculos, para este tipo de cubierta, resultaron ser tan complejos que la construcción no pudo llevarse a cabo. Ante esta dificultad, y dado el limitado alcance de las cúpulas, Dischinger, empezó a investigar como diseñar cáscaras cilíndricas de una única curvatura y cuya sección transversal estuviera constituida por una elipse, consiguiendo así que las tangentes en los apoyos fuesen verticales (Martínez Martínez 2015).

En 1928 Dischinger presentó un tratado con la formulación

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Finsterwalder 1931, Budapest Market Hall, May 2015.

Zeiss-Dywidag, Fuente Bilington.

analítica para el cálculo completo de cúpulas en el que incluía varias ejemplos de proyectos terminados o en construcción basándose en dichos cálculos. Conjuntamente con los estudios teóricos realizó toda una serie de ensayos a pequeña escala que serían los que le proporcionarían la confianza necesaria para seguir profundizando en la construcción de este tipo de estructuras.

Sin embargo, Dischinger no encontraba una teoría matemática que describiera satisfactoriamente el comportamiento estructural a formas no cupulares. Este desarrollo lo realizaría posteriormente su compañero en la otra compañía, Ulrich Finsterwalder (Martínez Martínez 2015).

Finsterwalder, tras terminar su carrera de ingeniería civil, en 1922, comenzó a trabajar en Dyckerhoff & Widmann, donde desarrolló su carrera profesional. Comenzó a trabajar con la teoría matemática de cubiertas laminares cilíndricas en su proyecto de final de carrera pero no publicó su primera formulación práctica hasta 1933, que se conoce actualmente como teoría de membrana.

En esta teoría de membranas se considera que la lámina no tiene ninguna resistencia a flexión. Indicaba también que a menos que la pendiente de la lámina en sus bordes fuese vertical, los ejes longitudinales de la cubierta necesitaban un apoyo inclinado. Por ello, proyectó cubiertas con una sección transversal semielíptica que proporcionaba una pendiente vertical en los arranques. Como comprobó que esta forma de cubierta era difícil de construir, probó con otra forma sugerida por la teoría más general de 1933. Esta forma tenía una sección transversal circular y las vigas de borde longitudinales. Pero esta teoría precisaba que la lámina estuviera apoyada verticalmente en sus secciones extremas. Este requisito llevó a Finsterwalder a proyectar un delgado muro vertical en esas dos secciones.

La teoría de 1930 quedaba entonces restringida a láminas

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Dyckerhoff, Widmann y Rainer 1968, Informes 21, n 204.

cilíndricas de sección circular con vigas de borde longitudinales y muros de apoyo transversales. Esto para los alemanes significaba que las formas estructurales se realizarían conforme a esta teoría (Manterola Armisén 1999).

En 1933, Donnel, ingeniero aeronáutico norteamericano, formula unas ecuaciones para cáscaras cilíndricas, donde se incluyen tanto las acciones de membrana como los momentos flectores (Bradshaw et al. 2002).

En todo caso, la nueva forma fue económicamente muy competitiva y mostró como las láminas de hormigón podían ser mucho más ligeras que otras formas empleadas para cubiertas de hormigón. Dischinger demostró que cada una de sus cubiertas para el mercado de Leipzig de 1929, de 70 m de luz, pesaba un tercio de lo que pesaba la cúpula de Breslau de 1913, construida también por Dyckerhoff & Widmann, todo ello a pesar de que las cúpulas de Leipzig cubrían un área un 30% mayor (76 m de luz en las cúpulas de Leipzig de 1929, y 67 m de luz en la cúpula de Breslau) (David P Billington 2013).

Será a partir de 1940 cuando se produzca una gran revuelo entre los calculistas de las estructuras, como consecuencia de las discrepancias, que cada vez eran mayores, entre los resultados matemáticos obtenidos siguiendo las directrices de la teoría de la elasticidad y los resultados de los ensayos de laboratorio o sobre estructuras reales construidas.

Y es que las estructuras de cáscara no tienen un comportamiento elástico únicamente, sino que acomoda su funcionamiento por medio de diferentes mecanismos para mantener el equilibrio. Por ello resultaba fundamental admitir la posibilidad de las deformaciones plásticas en las secciones críticas, es decir, donde se pudiese alcanzar antes la máxima capacidad de resistencia a los esfuerzos. Al producirse este hecho se crearía en ese punto de la estructura una semiarticulación.

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Candela 1958, Xochimilco, Mexico, proceso construcción por Juan Guzmán,
(Elisa Lozano 2010, p. 232)

Pero, tal y como señala Candela, este hecho depende exclusivamente de nuestra voluntad, puesto que la capacidad para crear estas semiarticulaciones depende a su vez de la disposición y magnitud de las armaduras que se encuentran en la estructura. Siguiendo este razonamiento se podría variar el diagrama isostático para conseguir la distribución de momentos que considere el proyectista más adecuado, disponiendo las armaduras conforme a esta elección.

Candela, además señala otra limitación más que impide que aparezcan las grandes deformaciones plásticas, siendo éstas la base del proceso. Esta limitación tiene que ver con la cantidad de armadura dispuesta en las secciones donde han de producirse las semiarticulaciones. Si el porcentaje de dicha armadura es superior al crítico, es decir, si la rotura del hormigón por compresión se produce con anterioridad a la entrada de la armadura en su periodo plástico, entonces no podrá producirse la redistribución de momentos puesto que previamente ya se habrán producido roturas inadmisibles en dichas secciones críticas de la estructura.

Concluye su ensayo Candela, indicando que gracias a la teoría de la plasticidad el cálculo de cáscaras cilíndricas largas puede asemejarse al cálculo de una viga de hormigón armado. En definitiva su análisis y cálculo se reduce a un problema de equilibrio de fuerzas y momentos que puede resolverse de manera muy sencilla.

Resulta sorprendente que el principal inconveniente para ser considerado el método ideal de cálculo para ciertos tipos de cáscaras fuesen la extremada sencillez del método, todo ello frente al sentimiento de seguridad establecido durante tanto tiempo por la teoría de la elasticidad.

Tanto es así, que con la posterior aparición de los ordenadores se volvió nuevamente a acudir a los métodos elásticos

Torroja 1935, Frontón Recoletos (Chías y Abad 2005, p. 55)

Torroja 1935, perfiles comparados (Chías y Abad 2005, p. 54)

para la resolución de estas estructuras, en tanto que la misma ofrecían un aparente mayor rigor matemático (Martínez Martínez 2015).

Sostengo que la deducción matemática, sin el apoyo de la experiencia, es sólo una fuente de errores, tanto más peligrosa cuanto que está llena de atractivos. He flirteado lo suficiente con esta seductora sirena para conocer lo prodigioso de las delicias que dispensa a sus adoradores. Pero atención: abusar de estos placeres, tan solitarios como estériles, constituye un onanismo intelectual que, tan rápidamente como el otro, conduce a sus víctimas al peor de los embrutecimientos. (Eugene Freyssinet 2003)

En este sentido son interesantes las aportaciones de A. Scordelis y los Elementos finitos al cálculo de la láminas, cooperando en el estudio de láminas como la del coliseo de San Juan en Puerto Rico, la Catedral de St. Mary en San Francisco, en el que colaboró con P. L Nervi, o el Estadio Oklahoma junto a T.Y. Lin (Clough and Lin 2008).

Posteriormente Chan se desarrollaría programas específicos para el estudio de vigas de borde e incorporaba, entre otros, el comportamiento no lineal del material. Serían Roca y Marí (1993) quienes realizarán un modelo numérico específico para el cálculo de láminas de hormigón pretensado (Tomás 2007).

El planteamiento de Candela en relación al comportamiento de las láminas cilíndricas asemejándolo a una viga, lo recoge ya Eduardo Torroja en su planteamiento para el Frontón de Recoletos, de 1935, edificio que debía ser conocido por Candela. El Frontón de Recoletos, construido por Eduardo Torroja, como ingeniero, y Secundino Zuazo, como arquitecto, constituye una espectacular innovación, no es tanto fruto de la disposición de la estructura en sí, sino más bien, de la asimetría de la misma, las luces utilizadas, y la disposición de aperturas en las láminas.

Eduardo Torroja 1935, maqueta (Lozano 2011, p. 20)

Torroja 1935, Frontón Recoletos (Chías y Abad 2005, p. 56)

Torroja 1935, Frontón Recoletos (Chías y Abad 2005, p. 56)

De tal manera que su lámina abovedada, junto con su pliegue en forma de alas de gaviota le otorga el canto y rigidez necesarios. Así esta estructura lleva al límite las formas relativas a las láminas estructurales, constituyendo una de las obras más relevantes desde el punto de vista de la tecnología del hormigón armado, a juicio de M. Aguiló, construidas todas ellas entre los años 1930 a 1935 (Aguiló Alonso 2003).

La concepción general del edificio del Frontón de Recoletos goza de una íntima fusión entre los elementos esenciales del conjunto y tuvo la voluntad, desde su concepción, de suprimir los elementos superfluos que pudieran ocultar o alterar la forma estructural pura derivada de la imposición funcional.

Se trata de una lámina cilíndrica asimétrica de unos 8 cm de espesor, realizada en hormigón armado con generatrices horizontales de 55 m y como directrices dos arcos de círculo desiguales que arrancan con tangentes verticales en los bordes y se encuentran ortogonalmente, la distancia entre generatrices extremas es de 32,50 m. En parte de las dos láminas, se sustituye la misma por celosías triangulares también de hormigón armado. La lámina cilíndrica de doble lóbulo permitía con una total ligereza cubrir el vano mayor. Completan la estructura las tribunas con formas curvas y los entramados de apoyo de las láminas que quedan embutidos dentro de los muros.

La lámina se sujeta por los puntos medios de las generatrices de borde, permitiendo así la libre dilatación longitudinal, mientras que las directrices extremas apoyan sobre entramados verticales que se encuentran embutidos en los muros laterales, con elasticidad suficiente para permitir el libre desplazamiento de estas directrices rigidizadas, las generatrices de borde apoyan también sobre pequeñas bielas que permiten la dilatación longitudinal. La dilatación transversal no resulta problemática en tanto que la lámina es muy flexible en este sentido.

La forma de la sección, según el propio E. Torroja, surge de la necesidad funcional de abrir dos grandes ventanales situados en esa posición y con esa misma inclinación para dar luz desde el norte e iluminar la pista con el lucernario más alto, así como enviar luz complementaria a las tribunas altas sin que perjudicase el juego. Se intentó alejar conscientemente la impresión de que pudiera tratarse de dos bóvedas de cañón y por el contrario aprovechar el fenómeno resistente de la estructura laminar, con más fuerza en la intersección misma o "gaviota", y así trasladar las cargas al contorno sustentante con el mínimo trabajo posible. El trabajo de estas láminas está explicado con un ejemplo en su libro "Razón y ser de los tipos estructurales" (Torroja Miret 2000).

Si se coge una hoja de papel y se la quiere sostener horizontalmente sobre dos de sus bordes paralelos, se observa que se doble y se cae por falta de resistencia a la flexión. Pero, si se la sostiene de los centros de esos lados, dejándola que se curve por su peso a uno y otro lado de la recta que une los puntos de apoyo se sostiene perfectamente gracias a la forma curvada que ha tomado. La superficie cilíndrica, así formada, trabaja como una viga cuya sección transversal viene determinada por la directriz del cilindro. (...) La lámina, aunque tenga la forma de una bóveda, es tensionalmente otra cosa completamente distinta; mucho mejor que a una bóveda podría asimilarse a una viga. Si en lugar de sostener el papel por dos puntos solamente, se le apoya sobre dos paredes o vigas de rigidez que fijan el contorno por las directrices extremas, las condiciones de resistencia y de rigidez se mejorarán mucho. Es fácil apreciar que, si las directrices no terminan en tangentes verticales, las zonas próximas a las generatrices de borde y estas mismas generatrices se curvan ligeramente, venciendo la escasa resistencia del papel a doblarse ¿Cuál es, en realidad, el fenómeno tensional de este elemento estructural; cómo se sostiene y cómo trabaja?

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

Heinz Isler, maquetas de membranas colgadas de bordes libres (Chilton 2000, p. 37-38)

Ante la novedad, riesgo e importancia de la cubierta la empresa constructora solicitó un informe sobre los cálculos a dos importantes ingenieros de la época, J. Eugenio Ribera y J.M. Aguirre que aprobando las líneas generales del proyecto dispusieron algunas modificaciones y consideraciones a adoptar que se referían en su mayor parte a la ejecución. También consideraron necesario el estudio de las succiones de viento, que en principio no se habían tenido en cuenta, la comprobación de los resultados del cálculo sobre un modelo reducido para una mayor garantía de estos, y el establecer en la propia obra una instalación de control de los movimientos y cargas de trabajo. Entre los otros puntos tratados en dicho informe destacan el punto de partida de la nulidad de flexión longitudinal de la membrana y la indeformabilidad también de los apoyos de la misma, para el cumplimiento de todo ello se solicita la rigidización de la carrera sobre la que apoya uno de los bordes. Se recomienda el uso de contraflechas para asegurar la perfecta horizontalidad de todas las generatrices y lo que resulta más sorprendente en la actualidad de todos estos consejos, que sería, el uso de cemento aluminoso.

Siguiendo las recomendaciones del informe de Ribera y Aguirre, se recurrió al estudio experimental del mismo mediante un modelo a escala reducida. El modelo comprendía no solo la lámina sino las condiciones de sustentación de los piñones y el sistema de bielas y anclajes, montándose todo ello sobre muros o vigas similares al marco de apoyo real. A tenor de los resultados obtenidos se hicieron correcciones de detalle en cuanto a la cuantía y disposición del armado en los lucernarios y en la zona de encuentro en "gaviota". Durante la ejecución de las obras también se ejerció un control exhaustivo de los procedimientos y de los movimientos de la estructura, particularmente en el momento del descimbramiento.

El mismo E. Torroja realiza un informe sobre las fisuraciones, que llegó a tener el edificio, y sus causas, estableciendo que, a

EL PRETENSADO
LA DISOLUCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS EN LA ARQUITECTURA DEL SXX

CNIT, ing. Nicolas Esquillan, arq. Robert Edouard Camelot, Jean de Mailly, Bernard Zehrfuss, 1958. Fotografía de la autora 2014.

tenor de las mismas, la gran diferencia de flexibilidad a la que se ha llegado en esta lámina entre la denominada "gaviota" y el resto de los lóbulos no se podría sobrepasar mucho, debido a la importancia que tomarían en tal caso los fenómenos de torsión.

Lamentablemente, se tuvo que ampliar el estudio del edificio por parte del proyectista al propio colapso de la estructura debido a los impactos recibidos durante la mencionada Guerra Civil, en 1937. En dicho informe, se determina que el colapso se habría producido debido a la falta de rigidez transversal de las directrices centrales del arco en el lóbulo grande, provocado por la rotura y brusca deformación de estas directrices bajo la acción de la onda expansiva.

Antes del mismo hundimiento de la estructura, con el edificio ya dañado, se plantea un anteproyecto para refuerzo de la estructura y mantenimiento de la misma, con carácter previo a su reparación. Este refuerzo consistía en colocar una serie de nervios de hormigón armado sobre el lóbulo mayor de la lámina siguiendo su directriz hasta el lucernario. Estos anillos estarían provistos de unos tensores y de unos estribos de anclaje a la lámina y a la cara exterior de la anillo. Es decir, se necesita recuperar la geometría original propuesta para que la estructura funcionase correctamente.

No obstante, estas obras de refuerzo no se llegaron a acometer nunca y en 1939 la cubierta se derrumbó totalmente.

En los estudios de esta estructura mediante el método de elementos finitos (Lozano-Galant and Payá-Zaforteza, n.d.), se comprueba mediante dicho método de calculo como mejora el comportamiento con estos anillos, recogiendo la aseveración del propio Torroja en la que señalaba que "si tuviera que construirla de nuevo (cubierta del Frontón de Recoletos), habría dispuesto anillos de refuerzo".

Isler 1968, Motorway Service Station, Súd, Suiza (Chilton 2000, p. 92, 94)

Isler 1990, Aquapark, Norwich, Suiza (Chilton 2000, p. 118)

Las flexiones aparecerían en las cáscaras debido a deformaciones transversales por incompatibilidad entre las tensiones en el plano del interior de la lámina, que estaría comprimida y el borde de la lámina que estaría traccionada (Mbakogu and Pavlović 1999).

En la práctica es conveniente introducir esfuerzos de pretensado en las láminas con luces superiores a los 30 m. No obstante, también puede ser conveniente introducir estos esfuerzos en láminas de menor luz puesto que evitan la rigidización de los bordes de la misma y, por tanto, la disposición de vigas de borde (Fornerod 1947).

El pretensado se introdujo inicialmente en las láminas en los anillos de tracción que equilibraban el empuje de las cúpulas, o bien procurando que estas láminas trabajasen a compresión con cualquier condición de carga (Peerdeman 2008).

Inicialmente el pretensado se alojaba en las vigas de borde, Isler lo utilizó para reducir el tamaño de estas vigas. Posteriormente se fue acomodando este pretensado dentro del espesor de la lámina o bien fuera de su estructura básica como en la cimentación o en las líneas diagonales. Además de ello la introducción del pretensado evita la formación de grietas debidas a cargas locales o a la temperatura, y durante la construcción facilita el descimbrado alzando la lámina sobre este.

Heinz Isler en la Estación de Servicio de Deitingen, donde aplica el pretensado por debajo de la superficie del suelo conectando los apoyos con la lámina.

El procedimiento de introducción de la fuerza de pretensión también tiene que llevarse con ciertas precauciones. En la cubierta del Aquapark en Norwich (1991) de Isler, con un espesor de 100 mm y unas luces de 35 m, el refuerzo consistía en dos capas con barras de 6 mm de diámetro a ejes de 100 mm centradas

La estructura del Frontón de Recoletos, de 1935, dispuso de la cubierta de lámina cilíndrica de mayor luz de todas las construidas hasta ese momento, contando además con una directriz asimétrica y la apertura a la luz de las láminas. Para el comportamiento estructural resultaba necesaria la rigidización de los apoyos laterales que recibían las cargas de las láminas que estaban comportándose como una viga, que disponía de un mayor canto gracias a la forma propuesta en proyecto. El cálculo de la misma se realizó llevando al límite las posibilidades de las teorías estructurales de la época y comprobando los resultados mediante la modelización de la estructura a escala. La forma resultante y su geometría tenían entonces el carácter de necesarias en tanto que era vital a los efectos de resistencia y estabilidad de todo el conjunto. Esta estructura logra de esta manera llevar al límite las formas relativas a las láminas de hormigón armado sin pretensar y tal advertencia es conocida y admitida por el propio proyectista.

En 1959, en Madrid, en el Primer Congreso de la Asociación Internacional de estructuras laminares, presidido por E. Torroja, presenta una comunicación Heinz Isler denominada "New shapes for shells", la cual dio pie a un interesante debate posterior.

Para Isler la conformación de las láminas era un problema primordialmente técnico cuya solución daría pie a posteriores efectos arquitectónicos. Pensaba que la forma de las cáscaras era tan determinante que su interés residía en prescindir de todo lo que no fuese necesario. Determina así que la forma será el resultado de un óptimo rendimiento estructura y la mayor economía de medios constructivos, tal y como sucede en la propia naturaleza (Kotnik and Schwartz 2011).

Entre los procesos utilizados por Isler para la búsqueda de formas de sus láminas se encontraba bañar telas o redes de hilos en un fluido y dejar que solidificaran, de forma que se obtenía un modelo de lámina ligera y delgada que resistía únicamente su

peso propio a compresión.

Otro de sus procedimientos era generar un modelo neumático donde se sometía la membrana a una presión uniforme perpendicular a la superficie (Orta Rial 2005).

Para asegurar una perfecta estanqueidad a las cubiertas laminares, bajo cualquier condición de carga, Isler introduce un pretensado a la lámina bien sea llevando hacia adentro ligeramente los puntos de apoyo utilizando cables de pretensado dentro de una viga que conforma un anillo en la cimentación o a través de las diagonales.

Esquilan realiza en 1952 el hangar del aeropuerto de Marignane, dos naves con cubierta laminar de 101,5 m de luz. Y en el año 1958 realizará el Palacio de la CNIT en París, de 218 m de luz, la mayor estructura de estas características (Manterola Armisen 1999).

Esta estructura es un triángulo equilátero de 218 m de largo en cada lado, con una altura de 48,8 m, que presenta dificultades debido a la inestabilidad de los bordes libres que potencialmente podrían pandear. Esquilan evitó este problema utilizando una lámina de dos capas separadas entre sí. El sistema tiene un canto total de 1,9 m en la clave y 2,7 m en los apoyos. El espesor de cada capa es de 6 cm. en la clave y de 12 cm en los apoyos. Las capas se unían mediante paredes transversales de 5,9 mm de espesor (Bradshaw et al. 2002).

Se puede aplicar el pretensado a las cáscaras de hormigón para que adquieran una mayor eficiencia estructural dado que se reducen o eliminan las zonas de tracción. Este pretensado también puede realizarse en toda la lámina o bien limitarse a los límites de la misma. La práctica más común sería pretensar estos bordes para eliminar en los mismos los esfuerzos de tracción (Peerdeman 2008).

Hossdorf 1954, Nave en Gossau, Suiza, exterior (Casinello 2006, p. 70)

Hossdorf 1954, Nave en Gossau, Suiza, interior (Casinello 2006, p. 70)

sobre una rejilla cuadrada. Los tensores estaban colocados en las vigas de cimentación. El primer estado del tesado se realizó a los tres días y fue inferior al 25% de la fuerza final. Se pudo desmontar entonces parte del encofrado. El resto del pretensado se introdujo por el mismo método tras 21 días más de fraguado.

Heinz Hossdorft 1961, realiza en Gossau, Suiza, una nave industrial con paneles curvados junto con los arquitectos Danzeisen y Voser, utilizando un sistema estructural similar al de la nave CASA de E. Torroja y a las bóvedas conoides de Freyssinet, empleando como este una armadura móvil, estas láminas estaban pretensadas. Posteriormente en su almacén de Wagen con módulos de 25,2 x 8 m donde alojaba los tendones del pretensado en la cara exterior para facilitar el desencofrado de las láminas (García García and Osuna Redondo 2009).

La lámina de Millau de Schlaich, prefabricadas con elementos curvos y pretensadas, con longitudes de 28 m y una altura máxima de 85 cm, huecas interiormente. El espesor es de sólo 10 cm. Los elementos se ponen en obra sobre un encofrado y posteriormente se tesan longitudinalmente. Los elementos se prefabrican en el lugar de la obra para minimizar los gastos de transporte, por lo que su peso y dimensión viene dada por la capacidad de la grúa.

El pretensado en las láminas consigue, por tanto, mantener su forma ante cargas puntuales o asimétricas y por tanto evitar las flexiones y el pandeo, confiriéndole rigidez. Además añade estanqueidad a la lámina al evitar el agrietamiento en las superficies de la lámina.

6.5 La aplicación del pretensado en otros materiales y con otros materiales

Aunque es probable que la conciencia de la utilización de la técnica del pretensado derive de su uso con el hormigón, no es una técnica privativa de este material. Puede ser, no obstante, que haya sido en este material en el que se ha desarrollado más abundantemente y con una mayor conciencia del objetivo a conseguir. En el hormigón la técnica se adapta a la naturaleza intrínseca del mismo mejorando su trabajo como ya se ha estado viendo a lo largo de este texto.

El hormigón tiene una baja resistencia a las tracciones y consecuentemente ante estas sollicitaciones se producen fisuraciones que crean un punto débil y de ahí que se vaya produciendo la degradación de la construcción. Mediante esta técnica, en principio se pretendía evitar estas fisuraciones, pero además lo que se produce es un considerable aumento de la resistencia y capacidad de carga en las construcciones.

No obstante, aunque, la técnica del pretensado es antigua en su práctica y ofrece ejemplos antiguos que eran abundantes tales como la rueda de carro o el tonel. En la rueda de carro, esta dispone de una estructura de madera rodeada por una banda metálica exterior que sirve también como superficie de rodadura colocada en caliente, que comprime a la anterior al enfriarse, mejorando su comportamiento estructural. El tonel está conformado por piezas de madera que se pueden ajustar a tope, unidas por flejes metálicos que se colocan en caliente, por lo que comprimen la estructura de madera al enfriarse, al igual que en la rueda de carro. En este caso al llenar el tonel se ejerce una presión interior que trata de abrir las juntas. Por tanto, el pretensado inicial ha de ser tal que no rompa la estructura de madera a compresión cuando el tonel está vacío, pero que a su vez no permita que la misma se descomprima totalmente cuando está lleno, asegurando además que las juntas permanezcan estancas y que no

se salga el líquido.

Se pueden pretensar las estructuras de madera, de acero, de cerámica, de piedra, de vidrio y en general de cualquier material que consiga una mejora del rendimiento o una estabilidad mayor de su forma mediante la introducción de tensiones impuestas a criterio por el proyectista. También se utiliza en la intervención estructural para estabilizar, rigidizar y fortalecer los sistemas.

Otro material con un buen comportamiento a compresión y más deficiente a las tracciones, al igual que el hormigón, sería la fábrica de ladrillo, muy vinculada a la cultura mediterránea.

El otro material histórico utilizado a lo largo de la historia de la construcción ha sido sin lugar a dudas la madera. De hecho la madera, ha sido de los primeros materiales en ser pretensados en diversas herramientas, como el arco, elementos de almacenamiento como los barriles, y otros como los barcos egipcios, de los que ya se ha hablado anteriormente. Dentro del ámbito de la construcción, las cerchas de cubierta se han ido pretensando para mejorar su funcionamiento. Este material, muchas veces se ha pretensado con hierro o acero. Además se utiliza esta técnica para mejorar el comportamiento del conjunto de las edificaciones ante la acción sísmica.

El mismo acero también se puede pretensar, mejorando así según los casos su comportamiento. El objetivo en este caso sería conseguir que los arriostramientos trabajen a tracción dado que la cantidad de acero requerida a tracción es menor que cuando éste trabaja a compresión. Contrarrestando las cargas aplicadas y las tensiones de trabajo con barras a tracción se ahorraría material. Como ejemplo, si se aplica, entonces, acero de alta resistencia situado por debajo del cordón inferior de una viga, se podría variar el grado de pretensado a lo largo de esta viga acomodándolo a cualquier patrón de carga (Architectural Forum 1954b).

En cuanto a la utilización de otros materiales para realizar el pretensado, cabe señalar, que si bien en el hormigón, por ejemplo, la forma más común de pretensar las estructuras consiste en introducir un esfuerzo de tensión mediante armaduras o cables de acero, llamadas armaduras activas o de pretensado, **está no tiene por qué realizarse de forma específica con este material.** Así, en los últimos tiempos, se está desarrollando la tecnología para realizar la precompresión en el hormigón con otros materiales como la fibra de carbono. Con este nuevo material se trata de mejorar la durabilidad de la unión ante los agentes agresivos como el agua y el aire que corroe y oxida el acero.

Esta nueva concepción de la estructura, desde la perspectiva del pretensado, es más próxima a la visión de la misma como mecanismo que como un elemento "inerte" con unas posibilidades resistentes dadas e inmutables. De esta manera, se abren de forma extraordinaria las posibilidades de estas estructuras aumentando en igual medida su posible complejidad.

Dentro de un concepto amplio de la Arquitectura podemos determinar que la denominación de Estructura corresponde con el Orden superior de los distintos elementos, de manera que la Estructura de la misma correspondería al Orden interno de dichos elementos, Orden que no siempre se muestra patente sino que a veces se presenta de forma velada.

Siguiendo este discurso, según Aroca, podríamos llamar estructura resistente a aquella parte del objeto que le permite tener una esperanza razonable de mantener la integridad física y la forma en condiciones normales de uso. En una estructura es preciso asegurar su resistencia en todo momento, pero esta condición necesaria no es suficiente dado que además es preciso que la misma estructura pueda ser utilizada adecuadamente en la función para la que ha sido concebida y construida (Aroca Hernández-Ros 2008).

Trabajar en el pretensado significa trabajar con el máximo rigor. Con el pretensado no se puede mentir. No se pueden exagerar las dimensiones ni las armaduras ni los coeficientes de seguridad porque sería contraproducente. Hay que situarse en el punto justo, allí donde las tensiones previas esperan a las futuras tensiones que produzcan las cargas para equilibrarlas. Ni más ni menos. En el pretensado, en su concepto puro, es imposible cubrirse; por eso es tan rico potencialmente en posibilidades estéticas. Con el pretensado el hormigón es un material noble y duradero, isótropo, capaz de deformarse elásticamente y dotado de una completa reversibilidad" (Fernández Ordóñez 1978).

Fernández Ordoñez está identificando estética o belleza con verdad, con pureza y con nobleza. El rigor y la proporción, y no otros, son los que potencian las posibilidades estéticas de la estructura y por derivación de la Construcción. Todas estas posibilidades se pueden aplicar de igual manera a otros materiales y con otros materiales

6.5.1 Eduardo Torroja y El pretensado

Alfredo Paez Balaca, todavía en vida de Eduardo Torroja señaló que la estructura del acueducto de Tempul (Jerez de la Frontera. 1926) era un precursor de esta técnica ya que en ella introdujo la precompresión en el acueducto mediante el tesado de los cables. Torroja, eleva mediante un gato el apoyo de los cables que sujetan los voladizos, de forma que se precomprimen las vigas que llevan el acueducto. Eduardo Torroja zanjó esta cuestión en 1951, comentando que al hacerlo "iba buscando otras cosas" y reconociendo que "la incorporación del pretensado a las estructuras fue posible gracias a la idea creadora de Freyssinet". No obstante, conscientemente o no, ciertos elementos estructurales resultan pretensados. En el acueducto de Alloz, de 1939, es claramente consciente de las implicaciones de la técnica.

La carencia de medios técnicos juega en contra de un

desarrollo más decidido en relación a esta técnica. No disponía de los sistemas de anclaje precisos ni tampoco de los sistemas de puesta en carga, por lo que tuvo que arreglárselas con ingenio, desarrollando finalmente un sistema como el de Tempul (Chías Navarro and Abad Balboa 2005).

En el proyecto original del acueducto de Tempul de José Antonio Ribera, disponía de catorce vanos de 20 m, de las que dos pilas se cimentaban en el lecho del río, y le pide a Torroja una variante del mismo, en la que suprimía las pilas que descansaban en el lecho del río Guadalete, sustituyéndolas por unos tirantes inclinados sobre los lados tipo Cantilever, que sostienen un viga central de otros 17 m, ofreciendo una luz en ese tramo de unos 57 m, y finalmente once luces rectas de 20 m. El propio Torroja comenta la obra en la Revista de Obras públicas en 1927:

La dificultad principal de construcción está, al parecer, en tensar el cable para que al entrar en trabajo no ceda excesivamente. Pero esto se resolvió con toda facilidad por el siguiente procedimiento: la cabeza o parte superior de la pila se hormigonó separada del resto, de tal modo que pudiera separarse verticalmente, para lo cual las armaduras verticales quedaban libres en tubos preparados al efecto y los cables apoyaban sobre camas de palastro empotradas sobre la cabeza de la pila.

Pasado el mes de fraguado de los tramos, se levantaron las cabezas de las pilas con gatos hidráulicos, tensando con ello los cables hasta hacer despegar los tramos de la cimbra, y se enclavó la obra terminando de hormigonar las pilas y haciendo el revestimiento de los cables.

Se dispusieron para elevar las cabezas de las pilas, dos gatos hidráulicos por pila, que se alojaban en cajas. Se hizo un seguimiento de los desplazamientos tanto horizontales como verticales, dado que se planteaban que pudieran tener entre ellos diferentes coeficientes elásticos.

La elevación total de la cabeza de la pila fue de 40 cm, y en la punta del tramo-ménsula, 5 cm; lo que representa un alargamiento total del 0,15 m, o sea del 1%, alargamiento nada exagerado si se tiene en cuenta que los cables en la posición inicial estaban simplemente apoyados sin tensión ninguna y difícilmente alineados.

Al sobrecargar el tramo con 600 kg por metro lineal se acusó un descenso de 0,020 m, de donde resulta un coeficiente de elasticidad del cable de 2,100,000 kg / cm³, cifra muy importante, pues señala la posibilidad de que el hormigón siga elásticamente al cable en sus deformaciones, una vez tensado y bien empotrado en sus extremos.

Los cables, como hemos dicho, están formados por un cordón central de 37 hilos de acero dulce y otros seis cordones análogos en hélice de acero alto en carbono, y que han sido suministrados por la Sociedad José María Quijano, Forjas de Buelna, en cuyo honor hacemos esta referencia.

Después de descimbrado y sobrecargado el tramo se retiró la cimbra y se esperó veinte días, observando durante este período las deformaciones plásticas de los cables, que se amortiguaron completamente en diez días y que alcanzaron en total al 0,08 por 100. Después de esto se hormigonó por partes los huecos que quedaban entre las pilas y sus cabezas, retirándose los gatos, y se vertió lechada por los pozos en que quedaban alojadas las barras verticales de la armadura.

Inmediatamente se procedió al hormigonado de los cables colgando el molde de éstos para que la pieza no sufriera esfuerzo inicial ninguno de flexión. Para mayor seguridad se dejaron dos juntas próximas a los extremos del tirante y se hormigonaron después de quince días, formando zunchos de mortero rico con una ligera armadura para asegurar la junta.

El resultado de la última operación si representa un pretensado, como señalan P. Chías y T. Abad, siendo consciente de la acción del mismo, a tenor del artículo al que se ha hecho referencia. No obstante, como señalan los mismos autores, no intentó generalizar lo que había obtenido, ni inventó por ello el concepto de pretensado ni el hormigón pretensado. Parecen sinceras sus declaraciones en referencia a esta obra en las que decía que él "iba buscando otra cosa", tal vez como señalan los mismos autores la posibilidad de que el hormigón del tirante pudiese considerarse resistente a tracción, o que la deformabilidad de su tirante estuviese controlada por la pérdida de compresión del hormigón en vez de por el alargamiento del cable.

El sistema sería asimilable al utilizado por el propio Freyssinet en Le Veudre cuando viendo que el puente se deformaba peligrosamente decidió suprimir la articulación de la clave tras volver a reposicionarla, rellenándola con mortero y precomprimiendo a través de esa clave extra el conjunto.

En el acueducto de Alloz, de 1939, la estructura propuesta por Torroja se componía por tramos de 40 m, con dos apoyos en los 20 m centrales y dos voladizos de 10 m a cada lado de cada soporte. De esta manera conseguía que los momentos debidos a la flexión de la viga fuesen negativos en toda su longitud, nulos en los extremos de las ménsulas y en el centro de la viga central y máximos sobre cada uno de los dos apoyos. Ello le permitía, con un postesado posterior longitudinal de los bordes superiores, conseguir compresiones longitudinales en toda la sección, y además que la compresión fuese mayor en la parte inferior de la sección, donde mayor es también la presión del agua (Chías Navarro and Abad Balboa 2005).

La compresión transversal se conseguía mediante la colocación de unos tensores de rosca que se separaban 4 metros entre sí y que se colocaban en los bordes superiores de la sección en forma de U. La actuación sobre dichos tensores producía

compresiones en el paramento interno y tracciones en el externo, que se soportaban gracias a la armadura exterior.

Dado que no disponía de sistemas de anclaje, ni de puesta en carga de los cables para realizar el pretensado longitudinal, dispuso un ensanchamiento en las cabezas de los costeros de la sección, en los que situaba un par de cables de alambre trenzado que anclaba doblándolos con forma de gancho a los costeros al hormigonarlos.

Estos dos cables se sostenían en dos puntos fijados previamente, y en el punto medio entre los dos se situaba un aparato de tijera que se accionaba mediante un gato hidráulico, aumentando progresivamente la separación entre los dos cables y mediante esta acción, tesándolos. Una vez se alcanzaba el alargamiento previsto, se disponía un separador que mantenía a los cables en la posición requerida. La anchura del cajero limitaba la separación máxima y por tanto la presión del gato. Si no se alcanzaba la presión prevista se repetía la operación en otra zona de la misma pareja de cables.

Después del pretensado los cables se cubrían provisionalmente con arena para poder comprobar la presión transcurrido un tiempo y corregir las pérdidas que hubiese lugar, finalmente, una vez estabilizado se procedía al hormigonado de los cables y se cerraban las juntas entre las ménsulas (Chías Navarro and Abad Balboa 2005). Este sistema de pretensado resulta muy similar al utilizado para la cerámica armada y pretensada del Ingeniero Uruguayo, Eladio Dieste, como se verá más adelante en sus bóvedas gausas.

Eduardo Torroja era un ferviente admirador del hormigón armado, considerándolo como "una de las más felices concepciones de la Ingeniería". Más tarde declarararía que la diferencia entre el hormigón pretensado y el hormigón armado era mayor que la existente entre el hormigón romano y el hormigón armado.

(Fernández Ordóñez 1978)(Discurso inaugural del Curso 1960-1961 en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, de la que era miembro de número) (Fernández Ordóñez 1978).

A pesar de ello, los hechos hablan tozudamente y pese a que se dijo que nunca estuvo cómodo con el pretensado y que no llegó a comprender su esencia y trascendencia, lo cierto es que en 1954, creó la Asociación Española de Hormigón Pretensado, ATEP, que finalmente en 1988, después de fundirse con el Grupo Español del Hormigón GEHO, pasó a denominarse Asociación Científica-Técnica del Hormigón Estructural, ACHE (Chías Navarro and Abad Balboa 2005).

En 1934, comienza el desarrollo de la revista, denominada Hormigón y Acero, dedicada al hormigón, cuya publicación se verá interrumpida a causa de la Guerra civil, cuyo Director es Eduardo Torroja junto con Enrique García Reyes. Se realizaron 26 números de la misma, Freyssinet ya aparece en el primer número como colaborador extranjero, y en el número 2 de la misma ya ofrece un artículo sobre cementos y hormigones. Da cuenta de la exposición de Freyssinet en Lieja, donde el propio Freyssinet considera a su teoría del Cemento como la más importante de sus obras. De todo ello se hablará en un apartado específico por su interés específico en la promoción en España del Hormigón Pretensado.

Es más ingenioso, si cabe, la forma en que introduce el pretensado en el depósito de Fedala. Este depósito tenía 3.500 m³ de capacidad y 35 m de altura. Se le requirió que modificara el proyecto cuando ya disponía de las cimentaciones y de los pilares. Diseñó una lámina de hormigón pretensado con forma de hiperboloide de revolución en la cual las barras pretensadas se colocaban siguiendo la posición recta de las generatrices. De esta manera conformaba una superficie que se moldease con facilidad y de forma continua, con un volumen apropiado de hormigón, gracias al escaso espesor de la lámina y de armado. Para encofrar esta lámina recurrió a las bóvedas a la catalana en rasilla, tanto

en la bóveda tórica del fondo como en la cubierta.

La bóveda tórica del depósito del fondo se apoyaba en su contorno, en el exterior, en los soportes de hormigón ya ejecutados previamente, y en el interior, sobre la chimenea central de acceso. El encofrado se montó sobre camones radiales de madera. En la unión de la circunferencia de la bóveda de fondo con el hiperboloide exterior aparecen tracciones, debidas a la dilatación del zuncho de hormigón que une ambos elementos, para evitarla se dispuso un cinturón de tirantes postesados según un plano horizontal. Los tirantes se sitúan perimetralmente según polígonos estrellados inscritos en la circunferencia inferior y anclados en las paredes mediante la prolongación inclinada, cada tirante llevaba en su parte central los correspondientes tensores de rosca para darles la tensión adecuada. El sistema de pretensado utilizado era el sistema Barredo. El tesado de estas armaduras se realiza desde el borde superior del depósito, contrarresta la tracción debida al agua de almacenamiento. Más adelante, propondría para estos depósitos unas soluciones con un pretensado diferente para conseguir la estanqueidad del muro.

La cubierta se construyó también utilizando dos bóvedas tóricas a la catalana de triple hoja: La exterior apoya sobre dos anillos de hormigón armado, uno más exterior sobre la pared del depósito y otro hacia el interior sobre soportes radiales que atraviesan el depósito desde la base y una bóveda interior, más rebajada, que se apoya sobre el mismo anillo sobre los soportes radiales y hacia el interior sobre otro anillo que actúa de zuncho para la chimenea central. Esta chimenea es la que trasmite los empujes de las bóvedas hasta la cimentación (Chías Navarro and Abad Balboa 2005).

El espesor de la pared era de 20 cm, y con ello se contaba para incluir todas las vainas además de la rejilla de acero normal para armar el hormigón por las dos caras. En el borde superior aparecían más dificultades, dado que unos anclajes tropezaban con

otros y no había apenas espacio para manejar los gatos.

Tres años más tarde criticaría su propia solución adoptada, proponiendo la siguiente alternativa: Un depósito a base de dos paredes concéntricas de ladrillo, con espacio entre ambas relleno de grava, y apoyadas sobre una chimenea del mismo material. La pared exterior iría armada con acero normal y se enfoscaría interiormente. Con el depósito lleno de agua se inyectaría el mortero que produciría una compresión en la pared interior que, una vez fraguado el material inyectado, queda comprimida y el hormigón entre las dos paredes no sufre tracción por efecto del agua; de este modo se lograría un efecto análogo contra la fisuración, pero de forma más económica que la del pretensado clásico.

En 1957, diseñó su depósito de fábrica pretensada sin recurrir a los sistemas de pretensado disponibles en el mercado. Se trata del depósito para la Societé Marocaine d'Entreprises Fernández (ETM-402). La propuesta de Torroja al gobierno tenía tres soluciones diferentes, dos de las ellas comportan un nuevo planteamiento para los depósitos. La tercera que fue la que finalmente se realizó tenía forma de copa y capacidad para 1.000 m³. El muro del depósito estaba diseñado para construirse de fábrica armada pretensada. La innovación consistía en pretensar el muro sin utilizar los sistemas convencionales de pretensado y con barras de acero normales. Una de las formas propuestas era un cilindro y la otra era un cono truncado invertido.

En el proyecto del cono truncado invertido que analiza Joaquín Antuña (Antuña Bernardo 2008), la pared del depósito dispone de tres capas concéntricas: una capa exterior de ladrillo de 25 cm de espesor, reforzado con algunas barras de acero de las habituales cada tres juntas, la segunda capa, intermedia, consiste en un muro de hormigón realizado con grava seleccionada al cual se le inyectaba un mortero especial de endurecimiento rápido y sin contracción, la inyección de este mortero se debía

realizar una vez terminada la tercera capa, la interior, también con ladrillos de 25 cm. La parte inferior también tiene la forma de un cono y se realiza con muro de fábrica también. La chimenea que permite el acceso al depósito soporta la cúpula que tiene la misma forma que la de la parte de abajo. Esta cúpula está realizada en hormigón armado, con sus límites sujetos mediante un anillo de hormigón armado en el muro exterior. El muro exterior continúa por el suelo hasta los cimientos.

El proyecto incluía la descripción de la manera por la cual se debía realizar la construcción para conseguir que el depósito fuese impermeable.

El muro de fábrica necesita construirse primero, la parte de abajo y las dos capas en la parte superior. Al mismo tiempo que se realiza la capa de ladrillo, el espacio entre las dos capas de ladrillo se rellena cuidadosamente con una grava seleccionada. Cuando la fábrica se ha finalizado y la capa intermedia está llena de grava, tanto el depósito como la zona con grava se rellena de agua. En este momento, la capa exterior estaría traccionada, pueden aparecer algunas grietas e incluso el agua puede filtrarse. Si ello sucediese, habría que añadir más aguas para mantener el mismo nivel. El muro interior sufre una ligera compresión como resultado de la diferencia entre la presión del agua en el depósito y la presión debida a la grava inundada en la capa intermedia. En este momento comienza la inyección, que debe ir desde la parte inferior en un nivel no superior a los 200 cm colocado en series de 50 cm más o menos. La presión debida a la mayor densidad del mortero en comparación con la presión debida al agua produce la tensión de la armadura colocada en la capa externa de ladrillo y al mismo tiempo, el incremento de la compresión en la capa interior. Cuando el mortero comienza a fraguar, el efecto de la presión hidrostática desaparece y las barras de refuerzo en la capa exterior las cuales estaban traccionadas, tienden a reducir su longitud y por tanto comprimen el muro de hormigón. De esta forma se asegura la impermeabilidad

del depósito. (Antuña Bernardo 2008)

Finalmente utilizó este método en otros depósitos, uno de los cuales se encuentra en la Junta de Energía Nuclear en Madrid, en 1958. El depósito no funcionó todo lo adecuadamente que se proyectó y en los años 70 se sustituyó por uno de hormigón pretensado, sin embargo es un sistema de construcción que puede implementarse con las mejoras que se estimen oportunas (Antuña Bernardo 2009).

Alfredo Páez ya señala que la cerámica y el vidrio podrían sustituir al hormigón y al acero en estructuras pre o postesadas.

Para completar estas nuevas orientaciones debería decir algo sobre cerámica pretensada y sobre la utilización de las fibras de vidrio o de cuarzo como sucedáneo de las armaduras. Pero no me atrevo. Temo las conclusiones que se podrían derivar. Si a alguien se le ocurre la idea de que lo bueno es sustituir el hormigón y el acero por la cerámica y el vidrio, se acabó el hormigón pretensado. Y entonces, ¿qué hago yo? (Páez Balaca 1988)

Heinz Hossdorf, desarrolló varias aplicaciones del pretensado a otros materiales, en 1964 postesó una lámina de poliéster reforzado con fibra de vidrio y en 1968 ganó un concurso, junto a Guttman para la Ópera de Basilea con una estructura laminar de grandes luces pretensada.

En 1954, propone la realización de un puente de piedra natural pretensado, iniciando, a través de esta obra una relación con el Instituto Torroja.

6.5.2 Acero pretensado

Las ruedas de bicicleta son, seguramente elemento metálico pretensado que nos podría resultar más familiar, pero también se pretensan las grúas, las torres de comunicaciones, las torres

eléctricas, hay puentes metálicos con pretensado exterior, puentes atirantados, etc.

El objetivo del pretensado en el acero sería que dado que el arriostramiento que se requiere en tracción es menor que el que se requiere cuando el acero trabaja a compresión, unas barras altamente traccionadas podrían contrarrestar las cargas aplicadas y las tensiones de trabajo. Así, aplicando el acero de alta resistencia por debajo del cordón inferior de una viga permite que se pueda variar el grado de pretensado a lo largo de la viga para acomodarlo a cualquier patrón de carga (Architectural Forum 1954b).

Al pretensar una estructura se persigue controlar sus deformaciones mediante una fuerza exterior de signo contrario al del resto de las cargas actuantes. También se reduce la sección resistente necesaria en la medida que se introducen esfuerzos que compensan los provocados por las cargas exteriores y además se emplea un acero de más alto límite elástico. Como resultado se obtienen diseños más esbeltos y un cierto ahorro económico por la reducción del material (Rui-Wamba Martija 2000).

Por una parte, el acero de alta tensión puede soportar ocho veces las tensiones de trabajo del acero normal, 1.103,16 N/mm² frente a 137,89 N/mm², mientras que cuesta solo tres veces como mucho su valor. En teoría esto podría permitir ahorros de hasta el 87% en peso y en dinero de aproximadamente el 62%. Previamente limitado a los cables de los puentes de suspensión, estos aceros de alta tensión están siendo ahora utilizados en las estructuras de acero pretensado en Europa y en los Estados Unidos (Architectural Forum 1954b).

Las ventajas de trabajar con acero pretensado residen en la posibilidad de rebajar los pesos y costes mediante la utilización eficiente de los materiales de altas capacidades y la consecución de una estructura más rígida y continua gracias

a la reducción de la holgura entre componentes.

Estas estructuras deben de estar protegidas convenientemente contra el fuego dado que están sometidas a tracciones muy altas. Los acero de alta tensión no pierden fuerza tan rápidamente como los normales a altas temperaturas, pero en caso de exponerse a las mismas han de ser remplazados.

También hay que tener un especial cuidado con la corrosión, utilizando la galvanización donde la acción corrosiva sea probable y utilizando preferentemente las barras pretensadas grandes a los cables de pequeño diámetro (Architectural Forum 1954b).

A mitad de siglo, en un artículo dedicado al tema de la revista Architectural Forum se recogen como edificios en los que se había utilizado el acero pretensado (Architectural Forum 1954b):

1. Un hangar Belga del profesor G. Magnel, donde se utilizaron 8 toneladas de cables pretensados en una viga de 153 m para dos luces. En este caso se consiguió un ahorro del 12% en peso y del 4% en costes de montaje.
2. La cubierta de una fábrica en Harlow, Inglaterra, del ingeniero estructural R.A. Sefton Jenkins.
3. La cubierta de un taller en Wigan, Inglaterra, también de Felix Samuely, donde utilizó cables de alta resistencia para pretensar la estructura en un espacio de 27,43 x 27,43 m² sin ningún tipo de apoyo interior y con un peso de tal solo 18,16 Kg/m².

En los Estados Unidos, con el desarrollo de las celosías hubo varias patentes en las que se incluían elementos pretensados. Cabría destacar entre las mismas la viga Fink desarrollada por Albert Fink en 1850. Se construyeron hasta 8 puentes con esta viga en la línea de ferrocarril que cubría el recorrido de unos

300 km de Louisville y Nashville. La viga disponía de un cordón superior horizontal, mientras que el inferior estaba atirantado de tal manera que se apuntalaban los montantes actuando como un pilar que no llegaba al suelo. Ello daba lugar a una viga muy esbelta.

En la revista anterior también anuncian el proyecto de la ingeniería Amman y Whitney para la realización de un viaducto para ferrocarril en Milwaukee con luces de 25,60 m. Pretendían utilizar barras de alta resistencia para reducir las tensiones de trabajo de las placas de las vigas principales. Traccionando tres barras de acero de alta aleación de 2,5 cm de diámetro situadas en el ala inferior de la viga se reducen las tracciones máximas.

Por otra parte también constatan que la Armada Americana está pretensado algunos de sus equipos para puentes estándar con barras de acero de alta resistencia de tal manera que se consigue doblar la capacidad de carga (Architectural Forum 1954b).

En la década de los 60, Robert Le Ricolais realizó unas variantes de la viga Fink, extendiéndolas a las tres dimensiones, creando unas vigas que denominó Polyten con las que podría cubrir grandes luces (Brufau Niubó 2007). La viga Polyten se generaría por un proceso de repeticiones fractales, de forma similar al de las radiolarias (Fontana Cabezas 2012).

En 1964, Cedric Price, Lord Snowdon y Frank Newby construyen el aviario de Londres, en aluminio, estructura basada en las estructuras tensegrity de B. Fuller (Bernabeu Larena 2006).

En España tenemos, entre otros ejemplos el Pabellón de los descubrimientos, se trata de un edificio situado en la Isla de la Cartuja incendiado poco antes de la inauguración de la Expo Sevilla.

Sus dimensiones eran de 126 x 66 m de planta y 24 m de

altura. La estructura combinaba elementos metálicos con elementos mixtos y se organizaba en torno a parejas de pórticos que formaban un entramado ortogonal. Los pórticos que formaban cada una de las parejas se separaban 6 m y la distancia entre los pórticos más próximas es de 24 m.

Cada uno de los pórticos está formado por tres niveles de vigas Vierendeel de 24 m de luz y 3 de canto, cuyo cordón superior recoge las vigas de las plataformas expositivas. Toda la estructura iba a ser vista, todas las dimensiones del edificio eran múltiplos de 3, por lo que el canto de las vigas Vierendeel sólo podía ser de 3 m. Además los perfiles no podían resultar muy pesados visualmente (Calvo 2012).

Por ello se pretensaron las vigas Vierendeel. Se suspendieron las vigas en dos puntos separados 12 m, mediante grupos de tensores inclinados 45° . En el otro extremo los tensores se unían al pilar del pórtico, elemento al cual se transmitía la reacción de la fuerza de pretensado. Los tensores cumplían una doble misión, en primer lugar actuaban como apoyos elásticos acortando la luz de la viga y en segundo lugar, provocaban mediante su puesta en tensión, una predeformación y unos esfuerzos de signo contrario a los producidos por las acciones gravitatorias.

En cada pórtico había cuatro tirantes formados, cada uno por cuatro barras Dywidag de 36 mm de diámetro con acero 110/125. Se preveía en proyecto una fuerza de tesado de 40 t y un movimiento ascendente las barras del pórtico de unos 25 mm. Para ello se empleo un gato hidráulico instalado en el nudo de unión de los tirantes con el pilar.

El tesado se realizó en tres operaciones consecutivas para evitar que los nudos se acercasen por el tirante. Primero se tesaban las 16 barras del pórtico a 20 t, seguidamente a 30 t y por último a 40 t. Toda la labor fue controlada para conocer el valor final de la fuerza real de los tirantes, en algunas de

las barras se procedió a un retesado (Crespo Rodríguez, Bellod Thomas, and Rui-Wamba Martija 1995).

Otro ejemplo de utilización del pretensado del acero en España, se daría en el Polideportivo de Anoeta, San Sebastian. En la cubierta de las instalaciones deportivas de Anoeta se ha adoptado una solución modular con elementos metálicos cuadrados de 11 m de lado, aproximadamente, con forma de "paraguas".

Se buscaba cubrir dos superficies rectangulares, una de 36 x 60 m sobre las piscinas y otra de 45 x 56 m sobre el polideportivo. Para ello se dispuso un entramado ortogonal de vigas celosía tipo "Warren" de 2,2 m de canto, dejando entre las mismas unos espacios de planta cuadrada aproximada de 11 m de lado, que eran ocupados por los denominados "paraguas" (Crespo Rodríguez, Bellod Thomas, and Rui-Wamba Martija 1995).

Exteriormente cada módulo tiene cuatro planos inclinados que dan lugar a cuatro aristas en las que se sitúan los tubos estructurales. En la parte inferior, los cuatro tubos se unen mediante cuatro correas (UPE-160) que forman un anillo perimetral y desde el vértice superior de la pirámide formado descende un mástil de 21,9 cm de diámetro, en cuya base confluyen las cuatro barras pretensadas que unen este punto central con las cuatro esquinas de la correa perimetral.

Los tirantes pretensados, en este caso absorben la reacción horizontal inherente a la solución estructural diseñada, permitiendo así el empleo de perfiles muy esbeltos.

Al tener una inclinación con respecto a la horizontal, introducen una fuerza vertical en el eje del mástil de forma que le mismo funciona como una apoyo elástico intermedio (Crespo Rodríguez, Bellod Thomas, and Rui-Wamba Martija 1995).