UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

**EL MODELO CONSTRUCTIVO. LA INFLUENCIA DE
LA TÉCNICA EN LA TEORÍA DE LA ARQUITECTURA
(1840-1899)**

TESIS DOCTORAL

ADELA RUEDA MÁRQUEZ DE LA PLATA
Arquitecta

2016

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y
TECNOLOGÍA ARQUITECTÓNICAS

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

**EL MODELO CONSTRUCTIVO. LA INFLUENCIA DE
LA TÉCNICA EN LA TEORÍA DE LA ARQUITECTURA
(1840-1899)**

TESIS DOCTORAL

Adela Rueda Márquez de la Plata
Arquitecta

Director:
Jesús Anaya Díaz
Doctor Arquitecto

POLITÉCNICA

Tribunal nombrado por el Sr. Rector Magfco. de la Universidad Politécnica de Madrid, el día.....de.....de 20....

Presidente:_____

Vocal: _____

Vocal:_____

Vocal:_____

Secretario:_____

Suplente:_____

Suplente:_____

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día.....de.....de 20...
en la E.T.S.I. /Facultad.....

Calificación

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

A

GRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a mi director de tesis, el profesor Jesús Anaya Díaz, todas las tardes de estudio, investigación y dedicación a este trabajo, porque sin él y sin su infinita paciencia hubiese sido imposible conseguirlo.

No me quiero olvidar de los miembros del tribunal. Agradezco mucho su esfuerzo y tiempo dedicados a la lectura de este documento y sus aportaciones más que necesarias para la mejora del mismo. Me gustaría agradecer de manera especial a la profesora Susana Mora Alonso-Muñoyerro las grandes oportunidades que me ha ido brindando a lo largo de estos años para formar parte de un maravilloso grupo de gente, de la que no me olvido tampoco, que me ha acompañado en este arduo camino de la tesis doctoral. Por supuesto, dentro del tribunal no podía faltar mi profesor, jefe y mentor Diego Cano-Lasso, que durante años ha tenido la paciencia de tenerme en su estudio y me ha enseñado infinidad de cosas, junto con sus hermanos, sobre lo que es la arquitectura, el compañerismo y la profesión tanto de arquitecto como de investigador.

A la Universidad de Extremadura, que me ofrece cada día la oportunidad de seguir aprendiendo y creciendo en la profesión de docente, profesión con la que disfruto muchísimo cada día.

No puedo evitar caer en el típico agradecimiento a mi familia. Mi padre, José Miguel Rueda Muñoz de San Pedro ha sido para mí un maestro y un modelo a seguir no sólo como arquitecto, sino como ejemplo de integridad en la profesión, de constancia en el trabajo y de pasión por la arquitectura. Después de mi segundo suspenso de la carrera (y del primero de mi vida y de muchos que llegarían después) me dijo: “recuerda que la arquitectura debe ser divertida” y aquí sigo, divirtiéndome cada día gracias a él. Mi madre María Justa Márquez de la Plata ha sido, y es, toda paciencia, con una profesión como esta que, en millones de ocasiones ha conseguido convertir su vida en un mar de maquetas, desorden y planos.

Al mecenazgo indiscutible de mi tío Manuel Márquez de la Plata, sin sus generosas aportaciones ni mi biblioteca ni este trabajo habrían sido posibles. A mis hermanos García y Manuel que con sus pequeños grandes detalles han facilitado infinitas veces mi labor. Por último y más importante, a mi abuela, Beatriz Muñoz de San Pedro, que es un pilar en nuestras vidas y un modelo de tenacidad, vitalidad, tesón y fortaleza.

A la primera persona del mundo que confió en mí, mi abuelo, Manuel Márquez de la Plata, que no dudó ni un segundo en que sería arquitecto. No sé si llegaré a cubrir sus expectativas algún día, pero sigo intentándolo porque él siempre vio en mí alguien por quien apostar y jamás olvidaré que fue él mi primer, y maravilloso, cliente que dejó a mi joven criterio su bien máspreciado.

A ti, Pablo, porque no tengo palabras para expresar lo que te debo. Necesitaría un libro sólo para agradecerte lo mucho que has hecho por mí y ni siquiera tengo claro que esta tesis sea la suficientemente buena como para dedicártela, pero aun así no dudes que eres el alma y el corazón de ella.

A la preciosidad que estar por llegar, gracias por venir al mundo. A ti dedico este trabajo. Unas cosas acaban, otras no hacen más que empezar...

NDICE

RESUMEN	XVII
ABSTRACT	XXI
1.INTRODUCCIÓN	25
1.1. HIPÓTESIS DE PARTIDA	25
1.2. OBJETIVO DE LA TESIS	27
1.3. EL PERÍODO DE ESTUDIO ELEGIDO. LOS AÑOS 1840 Y 1899	33
1.4. PUNTOS DE INFLEXIÓN ENTRE LOS AÑOS 1840 Y 1899	41
1.5. ESTADO DEL ARTE Y CONTEXTUALIZACIÓN HISTÓRICA DEL PERÍODO DE INVESTIGACIÓN.	45
1.5.1. Estado del arte	45
1.5.2. Contextualización histórica del período de investigación	51
1.6. PROPUESTA METODOLÓGICA	59
1.6.1. Metodología aplicada para el cálculo gráfico de estructuras de fábrica	59
1.6.2. Metodología aplicada para el cálculo por elementos finitos de estructuras de fábrica.	63
1.6.3. Metodología aplicada para el análisis de las fuentes teóricas	65

2. LA CORRECCIÓN GEOMÉTRICA APLICADA A LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL EN LOS MÉTODOS DE RECONSTRUCCIÓN	67
2.1. LA CORRECCIÓN GEOMÉTRICA APLICADA A LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL EN LOS MÉTODOS DE RECONSTRUCCIÓN.	73
2.2. EL PROYECTO DE LA ABADÍA DE VÉZELAY	79
2.2.1. Las nuevas tecnologías al servicio del sentido histórico	81
2.2.2. Antecedentes de la reconstrucción	89
2.3. LA CORRECCIÓN GEOMÉTRICA APLICADA POR VIOLLET LE DUC EN LA ESTRUCTURA DE VÉZELAY	95
2.4. RESULTADOS	103
2.5. DOCUMENTACIÓN GRÁFICA RELATIVA AL CÁLCULO MEDIANTE ESTÁTICA GRÁFICA DEL PROYECTO ORIGINAL Y DEL PROYECTO DE RECONSTRUCCIÓN DE VIOLLET LE DUC DE SANTA MAGDALENA DE VÉZELAY.	109
2.6. ANÁLISIS GEOMÉTRICO Y CONSTRUCTIVO DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA ABADÍA DE SANTA MAGDALENA DE VÉZELAY. 1250, 1840 Y 1868.	121
2.7. ESTUDIO COMPARATIVO DE CENTROS DE GRAVEDAD Y LÍNEAS DE EMPUJE DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA ABADÍA DE SANTA MAGDALENA DE VÉZELAY. 1250, 1840 Y 1868..	143

3. LA INFLUENCIA DEL COMIENZO DE LA INGENIERÍA EN LA PRÁCTICA DE LA ARQUITECTURA	151
3.1. LA EXISTENTE Y EXTENDIDA EXIGENCIA DE UNA NUEVA ARQUITECTURA ENTRE 1842 Y 1851	151
3.1.1. La valorización del patrimonio arquitectónico: los monumentos	153
3.1.2. El trabajo en equipo en la restauración	157
3.1.3. Consecuencias de esta exigencia	161
3.2. PRIMERAS EXPRESIONES DE LA INFLUENCIA DE LA TÉCNICA EN LA ARQUITECTURA	163
3.3. ORÍGENES DE LA RELACIÓN ENTRE ARQUITECTURA E INGENIERÍA EN FRANCIA	167
3.4. ANÁLISIS SEGÚN LAS PUBLICACIONES PERIÓDICAS EN FRANCIA E INGLATERRA	175
3.4.1. La importancia de los Tratados como base teórica y su relevancia dentro de los contenidos de la publicación periódica francesa “ <i>Revue Générale de l’architecture et des travaux publics</i> ”.	199
3.5. LA EXPOSICIÓN DE 1840. ARQUITECTURA DE PARÍS A TRAVÉS DE LAS PUBLICACIONES PERIÓDICAS	287
3.6. RECONOCIMIENTO DE LOS CAMBIOS GEOMÉTRICOS PRODUCIDOS POR LA INFLUENCIA DE LA TÉCNICA EN LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EN 1850	293
3.7. RESULTADOS	297

4. CÁLCULO CON ELEMENTOS FINITOS DE UNA BÓVEDA IDEADA POR VIOLETT LE DUC EN 1850	299
4.1. METODOLOGÍA Y CONSIDERACIONES INICIALES	303
4.2. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EMPLEADOS EN EL MODELO	307
4.2.1. Roca natural	307
4.2.2. Fundición dúctil	307
4.2.3. Mortero	307
4.3. MODELO GEOMÉTRICO	309
4.3.1. Interpretación geométrica	311
4.3.1.1. Sistema de bielas y tirantes	311
4.3.1.2. Empuje de arco transversal	311
4.3.1.3. Empuje de la cúpula	313
4.3.2. Otras consideraciones	315
4.4. PREDIMENSIONAMIENTO DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS	317
4.4.1. Predimensionamiento de la cúpula	317
4.4.2. Predimensionamiento de los arcos	319
4.4.3. Predimensionamiento de los muros	321
4.5. MODELADO TRIDIMENSIONAL PARA UN CÁLCULO ELÁSTICO	323
4.5.1. Primer modelo	323
4.5.1.1. Esfuerzos en el apoyo. Orientación de la biela	325
4.5.1.2. Movimiento del muro. Dimensionamiento de las bielas	327
4.5.2. Segundo modelo	329
4.5.3. Tercer modelo	333
4.5.4. Otros modelos	335
4.6. MODELADO TRIDIMENSIONAL PARA UN CÁLCULO NO LINEAL	339
4.6.1. Cuarto modelo	339

4.6.1.1. Material piedra	339
4.6.1.2. Elementos placa	341
4.6.2. Resultados	341
4.7. SIMULACIÓN DE FASES CONSTRUCTIVAS EN ANÁLISIS LINEAL	343
4.7.1. Límite de tensión de tesado	343
4.7.2. Carga de tesado	343
4.7.3. Rigidez de sistema en la fase 1	345
4.7.4. Resultados	347
4.7.5. Resultados con tesado definitivo	349
4.8. RESULTADOS DE TENSIONES Y ESFUERZOS	353
4.8.1. Tensiones en la cúpula	353
4.8.2. Tensiones en la bóveda	355
4.8.3. Tensiones en los muros	355
4.8.4. Esfuerzo en los arcos	355
4.8.5. Esfuerzos en bielas y tirantes	357
4.9. VIABILIDAD DE LA ESTRUCTURA	359
4.10. DOCUMENTACIÓN GRÁFICA RESPECTO AL CÁLCULO Y TRAZADO GEOMÉTRICO OBRA DE LA AUTORA DE UNA SALA PRESENTADA POR VIOLETT LE DUC EN L'ENTRETIENS SUR L'ARCHITECTURE	365
5.CONCLUSIONES Y DESARROLLO FUTURO DE LA INVESTIGACIÓN	383
5.1. CONCLUSIONES	383
5.2. DESARROLLO FUTURO DE LA INVESTIGACIÓN	389

6. ANEXOS	391
ANEXO I	
TRADUCCIÓN AL INGLÉS DEL CAPÍTULO 1 “INTRODUCCIÓN”	393
6.1. INTRODUCTION	393
6.1.1. Hypothesis	393
6.1.2. Purpose of the thesis	395
6.1.3. Study period chosen. Years 1840 and 1899	399
6.1.4. Turning points between 1840 and 1899	405
6.1.5. State of art and historical contextualization of the research period	409
6.1.5.1. State of art	409
6.1.5.2. Historical context	413
6.1.6. Proposed methodology	421
6.1.6.1. Methodology applied for the graphic of masonry structures.	421
6.1.6.2. Methodology applied to the finite element calculation of masonry structures	425
6.1.6.3. Methodology applied for the analysis of theoretical sources	425
ANEXOII	
TRADUCCIÓN AL INGLÉS DEL CAPÍTULO 5 “CONCLUSIONES Y DESARROLLO FUTURO DE LA INVESTIGACIÓN”	429
6.2. CONCLUSIONS AND FUTURE DEVELOPMENT OF THE RESEARCH	429
6.2.1. Conclusions	429
6.2.2. Future development of the research	433
BIBLIOGRAFÍA	435
ÍNDICE DE FIGURAS	461

R ESUMEN

La hipótesis de partida de esta tesis es que existe una influencia directa entre la técnica que se desarrolla durante el segundo período del s. XIX y el cambio sustancial de los conceptos y de la teoría arquitectónica que se da en esos mismos años. Dicha influencia genera nuevos modelos constructivos que serán la base de la arquitectura moderna.

Para llegar a la confirmación de la hipótesis, se han planteado tres objetivos principales que responden a los tres capítulos principales de la misma.

En primera instancia, se establecen las condiciones teóricas del debate arquitectónico entre las fechas estudiadas. Se analiza el concepto de modelo y «estilo» para evaluar si, efectivamente, hubo cambio o no. También se analizará si los arquitectos eran conscientes de la necesidad de una nueva arquitectura que respondiese a la funcionalidad que el progreso requería.

Para comprobar que dicho cambio se ha producido a todos los niveles hasta el punto de redefinir el modelo constructivo se escoge un ejemplo práctico que cumpla las condiciones necesarias para sustentar o no la tesis y se investiga sobre si sucede o no el cambio.

A continuación, se analizará la situación de la técnica y de los avances tecnológicos en el período estudiado. Es importante contrastar que realmente hay un conocimiento y una conciencia verdadera de cambio entre los teóricos y los arquitectos que están construyendo en ese momento. Confirmar que dicha conexión existe es vital para la investigación; para eso, se analizará y se profundizará en las conexiones entre la arquitectura y la ingeniería (o los avances tecnológicos)

para entender la implicación de uno con el otro. Con este fin, se han estudiado las distintas publicaciones periódicas de la época; sobre todo la más relevante y la que primero se editó, que fue La revue générale de l'architecture; me he apoyado en ella. Es un documento que mensualmente recoge cambios, avances y debates. Tuvo una grandísima divulgación; todo docente, arquitecto e ingeniero de la época tenía un acceso fácil y directo a dicha publicación.

Por último, a raíz de una construcción ideal proyectada por uno de los grandes arquitectos teóricos de la época, se reflexiona sobre si esa arquitectura supone realmente una comprensión y una conciencia de los nuevos modelos arquitectónicos, definidos por una técnica en progreso, o si responde exclusivamente a una utopía arquitectónica como tantas otras se habían esbozado con anterioridad por grandes teóricos.

Para poder definir la geometría de este elemento estructural, se ha realizado un modelado tridimensional que permite calcular la estructura a través de un proceso de elementos finitos. El propósito de este cálculo no es exclusivamente saber si la estructura era viable o no en aquella época, sino también comprender si la definición de estos originales elementos estructurales implicaba una concepción nueva de las estructuras tridimensionales y eso significa que empezaba a germinar un cambio sustancial en la teoría de la arquitectura, con la búsqueda de un nuevo modelo constructivo derivado de los avances técnicos.

De este modo queda demostrado que el modelo constructivo ha cambiado definitivamente por un modelo mucho más versátil y sobre todo con una gran capacidad de adaptación, esto combinado a su vez con una proliferación de patentes que intentan y buscan una estandarización del modelo constructivo y que no son, en ningún caso, un modelo en sí.

Como última conclusión, queda argumentado que en aquella época ya se tenía una gran intuición estructural; a pesar de que el cálculo matemático era todavía algo relativamente nuevo, se manejaban de forma instintiva líneas de cargas, combinación de materiales y nuevas formas, que ayudarán a crear los modelos de los próximos años y que serán la base del cálculo numérico posterior.

A

BSTRACT

The hypothesis of this thesis is that there is a direct influence between the technique developed during the second period of the XIX century and the substantial change in the concepts and in the architectural theory that occurs in those years. This influence develops new building models that will be the basis of modern architecture.

To confirm this hypothesis, we present three principal objectives that corresponds to the three principals chapters of the text.

First, we establish the theoretical conditions of the architectural debate between the dates studied. We analyze the concepts of model and “style” to assess whether there was a change or not. We consider as well if architects were aware of the need for a new architecture to respond to the functionality needs that progress demanded.

To verify that the change occurred at all levels to the extent of redefining the building model we choose a practical example that fulfills the necessary conditions to support or not the thesis and we investigate whether or not the change happens.

Next, we analyze the status of technical and technological advances in the

study period of study. It is important to contrast that there is a real knowledge and awareness of change between the theorists and architects who are building at the time. Confirming that that connection exists is vital for the research; for that, we will analyze and deepen into the connections between architecture and engineering (or technological progress) to understand the implication of one into the other. To this end, we have studied various publications of the time; especially the most relevant and the first published, *La Revue générale de l'architecture*; I have relied on it. This is a monthly document that includes changes, developments and debates. It had a very great disclosure; every teacher, architect and engineer of the time had a direct and easy access to this publication.

Finally, following theoretical ideal construction projected by one of the great architects of the time, we reflect on whether that architecture really represents an understanding and awareness of the new architectural models defined by a technique in progress, or if it only responds to an architectural utopia as the ones outlined earlier by the great theorists.

To be able to define the geometry of this structural item, we have carried out a three-dimensional modeling that enables us to calculate the structure through a process of finite elements. The purpose of this calculation is not exclusively understanding whether the structure was viable or not at the time, but also understanding if the definition of these original structural elements involved a new concept of three-dimensional structures and if that involved the beginning of a substantial change in theory of architecture, with the search for a new construction model derived from technical advances.

In this way it is demonstrated that the building model has definitely changed for a much more versatile one and above all with a high adaptation capacity, this combined in turn with a proliferation of patents that try and seek a standardization of the building model and are not, in any case, a model in itself.

As a final conclusion, it is argued that at the time a major structural intuition was present; even though the math calculation was still relatively new, in an instinctively way load lines, combination of materials and new forms were taken into account, that will help to create models in the coming years and which will form the basis of subsequent numerical calculation.

1

INTRODUCCIÓN

1.1. HIPÓTESIS DE PARTIDA

La hipótesis de partida de esta tesis es que existe una influencia mutua y directa entre la técnica que se aplica de modo práctico durante el segundo período del s. XIX y el cambio sustancial de los conceptos y de la teoría arquitectónica desarrollados en esos mismos años. Dicha influencia genera nuevos modelos constructivos que serán la base de la arquitectura moderna.

1.2. OBJETIVO DE LA TESIS

La presente tesis busca establecer hasta que punto el salto tecnológico que se desarrolla entre los años 1840 y 1899 influye en la teoría de la arquitectura que se reescribió durante estos mismos años, y establecer si esto constituyó el comienzo de un nuevo modelo constructivo.

Para demostrar esta hipótesis se plantearán tres objetivos que marcarán el camino de la investigación.

Objetivo 1. En primera instancia, se establecen las condiciones teóricas del debate arquitectónico entre las fechas estudiadas. Se analiza el concepto de modelo y «estilo» para evaluar si, efectivamente, hubo cambio o no. También se analizará si los arquitectos eran conscientes de la necesidad de una nueva arquitectura que respondiese a la funcionalidad que el progreso requería. (Fig. 1)

Para comprobar que dicho cambio se ha producido en todos los niveles hasta el punto de redefinir el modelo constructivo se escoge un ejemplo práctico que presumimos cumple las condiciones necesarias para sustentar la tesis y se investiga la manera en que se produce el cambio.

Con este fin el objetivo uno tendrá definidos dos hitos claros, el primero será el del análisis teórico del debate arquitectónico y el segundo es la demostración práctica sobre la redefinición del modelo constructivo con la aplicación de métodos gráficos de cálculo. A raíz de la resolución de estos dos hitos se establecen unos resultados parciales que formarán parte de las conclusiones finales de la tesis.

Objetivo 2. A continuación, se analizará la situación de la técnica y de los avances tecnológicos en el período estudiado. Es importante contrastar que realmente hay un conocimiento y una conciencia verdadera de cambio entre los teóricos y los arquitectos que están construyendo en ese momento. Confirmar que dicha conexión existe es vital para la investigación; para eso, se analizará y se

Fig. 1. Detalle arquitectónico. Imagen dentro del capítulo Estilo del diccionario razonado de Viollet Le Duc. 1854-1868.

profundizará en las conexiones entre la arquitectura y la ingeniería para entender la implicación de una y otra con los avances tecnológicos. Con este fin, se han estudiado las distintas publicaciones periódicas de la época; sobre todo la más relevante y primera en editarse, que fue *La revue générale de l'architecture*; que ha servido de apoyo fundamental de la tesis. Es un documento que mensualmente recogía cambios, avances y debates. Tuvo una grandísima divulgación; todo docente, arquitecto e ingeniero de la época tenía un acceso fácil y directo a dicha publicación.

Para lograr cumplir el objetivo dos, éste se ha diferenciado a su vez en dos hitos, uno de ellos es el estudio de las publicaciones periódicas que comenzaron a formar parte del panorama arquitectónico internacional y que, al contrario que la publicación de libros y tratados, definían y divulgaban los hechos acaecidos de manera inmediata, de ahí su importancia. Como hito segundo dentro de este objetivo es la comparativa del avance de la técnica con los progresos constructivos que se estaban poniendo ya en práctica en el mundo, casi siempre, de la ingeniería. Como consecuencia derivada de la determinación de estos dos hitos se extraerán de nuevo unos resultados parciales que se cotejarán con las demás partes para dar lugar a las conclusiones finales.

Objetivo 3. Por último, a raíz de una construcción ideal proyectada por uno de los grandes arquitectos teóricos de la época, se reflexiona sobre si esa arquitectura supone realmente una comprensión y una conciencia de los nuevos modelos arquitectónicos, definidos por una técnica en progreso, o si responde exclusivamente a una utopía arquitectónica como tantas otras se habían esbozado con anterioridad por grandes teóricos.

Para poder definir la geometría de este elemento estructural, se ha realizado un modelado tridimensional que permite calcular la estructura a través de un proceso de elementos finitos. El propósito de este cálculo no es exclusivamente saber si la estructura era viable o no en aquella época, sino también comprender si la definición de estos originales elementos estructurales implicaba una concepción nueva de las estructuras tridimensionales y eso significa que empezaba a germinar un cambio sustancial en la teoría de la arquitectura, con la búsqueda de un nuevo

Fig. 2. Sección transversal de un proyecto ideal de integración de la nueva arquitectura metálica dentro de la arquitectura medieval como parte de un proceso de la restauración.

modelo constructivo derivado de los avances técnicos. (Fig.2)

Para alcanzar el tercer objetivo, se ha dividido de nuevo en dos hitos, uno primer hito que consiste en el análisis teórico de una arquitectura ideal proyectada por uno de los grandes arquitectos teóricos dentro del período elegido que nos indicará si, efectivamente, comienza a haber un cambio de modelo constructivo. A continuación, el segundo hito dentro de este objetivo será el de analizar estructuralmente esta hipótesis estructural y comprobar si existe un cambio conceptual relevante derivado de los avances técnicos del momento como se sostiene en la tesis.

Fig. 3. Sección transversal de la entrada de la Iglesia de Santa María de Vézelay. Dibujo realizado por E. E. Viollet Le Duc para el proyecto de restauración en 1840.

1.3. EL PERÍODO DE ESTUDIO ELEGIDO. LOS AÑOS 1840 Y 1899

Para delimitar el alcance de la tesis, se ha considerado un período determinado de estudio, limitado por dos años concretos, uno de comienzo y otro del final de la época de análisis.

En este período de tiempo, entre 1840 y 1899, el salto tecnológico es evidente, estos avances necesariamente debieron influir de forma directa en la teoría de la arquitectura que durante estos años tuvo lugar. La cuestión es hasta qué punto la teoría de la arquitectura desarrollada en estos años vino influenciada por el inexorable avance de la técnica en el fin de siglo.

La presente tesis, como ya se ha dicho, parte de la hipótesis de que el salto tecnológico que se da entre los años 1840 y 1899 influye en la teoría de la arquitectura, que fue reescrita durante estos mismos años.

En 1840, convergen tres hechos relevantes que determinan la selección de esta fecha:

En primer lugar, el joven arquitecto francés Viollet Le Duc comienza el proyecto de restauración de la abadía de Vézelay. Este proyecto es el primero de envergadura. (Fig.3)

En segundo lugar, ese mismo año, sale el primer número de la revista *Revue générale de l'architecture et des travaux publics*, publicada en Francia y dirigida por César Daly; esta publicación será referencia no solo a nivel nacional, sino a nivel internacional dentro del panorama arquitectónico. Esta revista será el principio de una serie de publicaciones similares en el resto de países, que serán un reflejo directo y claro de los debates, de los intereses, de las líneas argumentales y editoriales de una época y sobre todo del impacto y divulgación que tenían las teorías y los proyectos que hasta ahora consideramos que fueron el modelo de una época. Otra publicación reconocida internacionalmente, y que tendremos en cuenta en el trabajo de investigación, es la inglesa *The Builder*, que no nació hasta

Fig. 4. Grabado de la portada del primer número de la revista “Revue Générale de l’architecture et des Travaux Publics” editada por César Daly en 1840.

Fig. 5. Portada del libro de las cartas sobre la inauguración de la primera línea de ferrocarril entre dos ciudades europeas. Publicado por M. Chevalier en 1841.

tres años después, y cuyo primer editor fue el arquitecto Joseph Aloysius Hansom, que solo estuvo un año; no llegó a tener una línea editorial clara y definida hasta el año siguiente, cuando el arquitecto George Godwin se puso al frente. Fue su editor hasta 1883 y de él dijo «que convirtió la publicación en la más importante y exitosa de su tipo y con un público mucho más allá del mundo de la arquitectura y la construcción»¹. (Fig.4)

Y en tercer lugar, tenemos un hecho que se podría subdividir en dos, porque es derivado de un avance en la técnica y se materializa en dos acontecimientos que son importantes y relevantes a partes iguales para la tesis. Uno de ellos es que fue también en 1840 cuando se inaugura el primer enlace por ferrocarril entre dos ciudades europeas, Estrasburgo (Francia) y Basilea (Suiza), poniendo fin a la primera y más importante etapa de la Revolución Industrial (Fig.5) . Con este último dato, Albert Carreras ha escrito que «de 1830 a 1900 no hay duda de que el motor de la economía europea fue el ferrocarril. Su construcción movilizaba recursos financieros y humanos, los desplazaba sobre el territorio y creaba nuevas pautas de localización y competitividad»². El otro es que en 1840 tiene lugar la primera Exposición Universal de París, con la divulgación internacional específica para arquitectos que la revista antes mencionada cubre en toda su extensión, creando debates, cartas al director, opiniones, etc., que serán la base de discusiones que durarán junto con la revista hasta el final del período estudiado, que son muy significativos de la época y que han sido muy poco estudiados y analizados por no ser tan visibles. (Fig.6)

El período de estudio acaba en el año 1899. Es cuando de nuevo suceden tres acontecimientos que suponen un punto de inflexión tan grande que se ha considerado el final de la época a investigar. Los tres acontecimientos tienen conexión directa con los tres hechos que son a su vez punto de origen de la investigación.

1 G. B. Smith, 'Godwin, George (1813-1888)', rev. Ruth Richardson and Robert Thorne, Oxford Dictionary of National Biography, Oxford University Press, 2004, accessed 5 Jan 2008.

2 Carreras 1999, p. 41; en el mismo sentido se manifiesta Sudriá 1999.

En primer lugar, este año, Julien Guadet publica el último gran tratado teórico de arquitectura, *Éléments et théorie de l'architecture*, donde entre otras cosas precisa el significado de conceptos que se estarán utilizando a lo largo del siguiente siglo y que serán la base de la arquitectura moderna. Entre estos hechos se debe mencionar el concepto de «composición» como una concepción del edificio como un todo aplicable solo a arquitectura y a música. También el concepto de «estudio», donde la palabra coge un significado de acabado y refinamiento de las partes del todo anterior, más útil para la pintura y la escultura, ya que no existen los elementos estandarizados para estas dos artes. (Fig.7)

Por otro lado, él mismo acaba en su tratado teórico con el debate sobre los racionalismos. A mediados del s. XVIII, el racionalismo clásico y el racionalismo gótico nacen como materialización de la idea de que la geometría perfecta es la que se consigue con el uso óptimo de las formas estructurales. A raíz de esta idea, surgen desacuerdos en el s. XIX, cuando los goticistas objetaban que el uso del arco de punto redondo como parte de la expresión clásica era una forma preconcebida, ya que el arco apuntado es, ciertamente, la forma más precisa que tomaría la estructura en su línea de cargas (objeción derivada también del

Fig.6. Imagen del primer tren europeo cruzando la ribera del Rhin en 1840.

Fig.7. Plano del recorrido de la primera línea ferroviaria europea inaugurada en 1840 entre Esstrasburgo y Basilea.

Fig. 8. Grabado de la primera Exposición Universal de París en 1798.

progreso de la estática gráfica como método científico de justificación de la forma estructural apuntada como más «perfecta» que la clásica del arco redondo). Como hemos dichos antes, el consenso entre ambos razonamientos no llegó hasta la obra de Auguste Choisy y el tratado teórico de Julien Guadet, por ser ambas obras las últimas especulaciones sobre construcción en piedra debido al avance de los sistemas estructurales y a los nuevos modelos que se fueron desarrollando mientras el debate teórico tiene lugar.

En segundo lugar y en paralelo a los hechos que originan el período de estudio, en 1899 se celebra la última Exposición Universal en París; a partir de ahí, las siguientes serán en Lieja (Bélgica) en 1905 y en Milán en 1906. Así que se acaba un ciclo donde todos los avances y progresos se presentaban en París. Francia e Inglaterra formaban el eje principal de la arquitectura. A partir del 1899, el panorama internacional varía y es ahí donde se produce el punto de inflexión para terminar con el período de estudio. (Fig. 8)

En tercer y último lugar, en 1894, muere César Daly, que fue uno de los arquitectos que formó parte de todos los cambios profundos de la época, como precursor de Viollet Le Duc, como propietario, fundador, editor y redactor de la *Revue générale de l'architecture*, siendo su director desde 1840 hasta 1888. Fue él el encargado de escribir la línea editorial de la revista y no solo como arquitecto teórico, sino que fue el encargado de la restauración de la catedral de Sainte-Cécile Albi y miembro de la Comisión de las Artes y edificios religiosos.

Estos seis hechos son los que marcan una época muy determinada entre 1840 y 1899. Estos dos años son puntos de inflexión para la hipótesis de partida, que abren y cierran respectivamente un período claro y definen una situación específica dentro de la teoría y la técnica arquitectónicas.

Con *El tratado de arquitectura* de Reynaud, publicado en 1850, apareció el primer libro de texto en el que los tipos de edificios aplicables a la nueva época aparecían representados y se estudiaban. El primer libro completo sobre el tema fue *Elementos y teorías de la arquitectura*, de Julien Guadet.

1.4. PUNTOS DE INFLEXIÓN ENTRE LOS AÑOS 1840 Y 1899

Entre los años de comienzo y fin del período de investigación, existen hitos que determinan puntos de inflexión. Es interesante conocer cuál es la tipología previa que se ha desarrollado en textos muy relevantes como son el Tratado de Rondelet³ o el Tratado de Durand⁴. Ambos hablan de las estructuras de planta central, de cómo dichas estructuras dictan los principios que serán la justificación de los sistemas académicos como son la planta central, la simetría central, los ejes cruzados, el plinton como condición, los elementos de escalera, la cúpula central, la división de la estructura⁵, etc...

Tras este academicismo inicial comienza una época con una serie de exigencias técnicas dónde el modelo constructivo recupera un valor distinto, diferente en el sentido de una nueva concepción de proporciones.

En 1851 hay un gran salto con Joseph Paxton, que con el Crystal Palace diseña un edificio dónde no hay ningún elemento de confrontación, sino que son las propias piezas las únicas a las que les queda el resto de un recuerdo de la estructura academicista clásica, la columna, el capitel de fundición...estos elementos no se esconden detrás de otra estructura de cierta relevancia como puede ocurrir en otros casos equivalentes dónde la estructura principal queda disimulada por una estructura de mayor presencia.

El hito principal que representa el cambio dónde se ve el modelo constructivo con un nuevo valor y con una nueva concepción de las proporciones clásicas es

3 Se refiere al “Traité theorique et pratique de l’Art de Bâtir” (Tratado teórico y práctico del arte de construir) escrito por el arquitecto francés Jean- Baptiste Rondelet. Comenzó el texto en el año 1797, publicándose los diez libros divididos en cinco tomos entre los años 1802 y 1817.

4 Se refiere a “Précis des leçons d’architecture données à l’École Polytechnique”publicado entre los años 1802 y 1805.

5 Hablando de la fragmentación de la estructura clásica, de la división del orden en basa, fuste y capitel.

la estación de St. Pancras⁶ donde William Henry Barlow en 1868 se enfrenta a la condición de la medida que venía previamente dada por tres decisiones de diseño, el orden del estilo, la forma arquitectónica y el orden utilizado como lenguaje constructivo de los nuevos materiales y de las nuevas estructuras.

Este gran cambio trae consigo una confrontación. Esto se puede ver en la contraposición de la interpretación del arco semicircular biarticulado⁷ que tiene que establecer la junta de dilatación con la fábrica de ladrillo y piedra de los muros. Al mismo tiempo va a utilizar estos mismos arcos como arriostramiento contra viento, pero al final cada una de las materializaciones sigue su propio recurso, en la fábrica de ladrillo con sus órdenes, en la estructura metálica los dibujos de círculos que cierran las vigas para crear una estructura densa.

Por el contrario el Crystal Palace asumió los nuevos objetos industriales, ha adaptado las referencias más significativas de la tradición, los capiteles fundidos, las vigas postensadas como si fuesen estructuras de arco o la bóveda del espacio central.

Es, por lo tanto, en este momento en el que Viollet Le Duc se debate sobre la concepción de la forma en función de los procesos constructivos que lleva a cabo en sus obras, de las soluciones constructivas o sobre cuál es la definición de esa forma en función de los principios clasicistas de la arquitectura. Este divorcio entre forma y proceso constructivo se va a mostrar en los edificios.

Tras estos cambios se instaura una inversión de procedimiento en la que se ve la evolución del modelo constructivo. A medida que el modelo constructivo va evolucionando asume como imagen el lenguaje de épocas pasadas, ya que era un lenguaje paradigmático, significativo. Esto lo vemos claramente en el uso del sobrelenguaje estructural, como puede ser el diseño de una pilastra sobre un muro que se traduce en esta época en el paso directo de este lenguaje a la fundición, por ejemplo, capiteles de fundición, balaustres...

6 St. Pancras, la estación de trenes de Londres, fue diseñada por el arquitecto inglés Sir George Gilbert Scott como junto con el ingeniero William Henry Barlow entre los años 1868 y 1877.

7 Este arco de la estructura principal puede entenderse y también como un arco triarticulado.

1.5. ESTADO DEL ARTE Y CONTEXTUALIZACIÓN HISTÓRICA DEL PERÍODO DE INVESTIGACIÓN.

1.5.1. Estado del arte

Como parte del estado del arte general del trabajo es importante definir el modelo constructivo de origen para comprobar si ha habido un cambio de modelo constructivo derivado de la influencia de la técnica en la teoría de la arquitectura.

En primer lugar aclarar que cuando se habla en este trabajo de modelo constructivo, no se está hablando de tipologías constructivas o detalles constructivos concretos, sino del modelo constructivo definitorio de una época, de un concepto de modelo que se traduce en un modo concreto de construir que acabará creando un modelo constructivo específico.

En el origen del período de investigación, el modelo constructivo estaba al servicio de la teoría de la arquitectura, es decir, la relación entre técnica y forma no era una relación igualitaria, sino que la forma teórica se imponía, siendo la técnica la herramienta utilizada para llegar a ella. Los órdenes de arquitecturas antiguas se seguían utilizando como modelos constructivos completos y la técnica como tal seguía siendo un modo de llegar con mayor o menor perfección al modelo predeterminado. A partir de que la técnica avanzase hasta tal punto que podía constituir un modelo constructivo completo de modo independiente a la teoría, comienza a crearse un debate en torno a los procesos de relación entre técnica y forma; en cómo la técnica y su proceso no sólo establecen y componen un mecanismo para llegar a un modelo sino que puede llegar a formar un modelo constructivo en sí mismo.

En este punto de inflexión clave es dónde entra la creación de nuevos modelos constructivos que se consiguen desarrollar a raíz de un debate profundo. Es en este momento del debate dónde se sitúa la investigación.

Fig. 9. Análisis del equilibrio global de un cuarto de bóveda de arista calculado con la "teoría del análisis límite".

Gracias al carácter de la investigación, la tesis afronta varios temas distintos y cada uno de ellos tiene un estado del arte propio. Para poder ser preciso en este punto y centrar la cuestión trataré los temas por separado.

En la primera parte de la tesis, se afronta, junto a un trabajo teórico, un estudio basado en la estática gráfica como metodología principal. La base fundamental del análisis teórico de estructuras históricas de fábrica es la «teoría del análisis límite» (Fig.9) . Esta fue aplicada por primera vez a estructuras de fábrica por el profesor Jacques Heyman en 1966, mediante la publicación de su artículo «The Stone Skeleton»⁸. Esta teoría está basada en tres teoremas fundamentales.-Teorema de la unicidad: que establece que la carga de colapso es única.

El primero de ellos es el de la Unicidad, que establece que la carga de colapso es única. En segundo teorema fundamental de este análisis teórico es el Teorema del límite superior, que para un mecanismo de colapso escogido al azar, la carga calculada que produce dicho colapso es igual o mayor a la carga de colapso real. Esto quiere decir que si la línea de empujes crea los agrietamientos suficientes con una situación de cargas específica, la estructura comienza a comportarse como un mecanismo y por eso estas cargas en concreto serán las que creen la situación de colapso.

El último Teorema fundamental que he tenido presente para el cálculo de estática gráfica es el Teorema del Límite Inferior o de la seguridad que dicta que la carga inferior a la de colapso será aquella que no quebrante la condición de cedencia del material pudiéndose encontrar un estado de cargas en equilibrio. Esto significa que el elemento estructural de fábrica está equilibrio siempre y cuando la línea de empujes creada por una situación de cargas concreta quede dentro de la sección que compone dicho elemento estructural.

Concluyendo, la carga de colapso efectiva de la estructura es aquella situación de cargas que, considerando el teorema de la unicidad, cumpla los teoremas del

⁸ International Journal of Solids and Structures. Volume 2, Issue 2, April 1966, Original Research Article Pages 249-256, IN1-IN4, 257-264, IN5-IN12, 265-279.

Fig. 10. Detalle constructivo de un elemento estructural. Todas las piezas son pétreas, por eso se deduce para el cálculo la incompresibilidad de los materiales. Viollet Le Duc 1854.

límite superior e inferior a la vez sobre el elemento de fábrica.

En el cálculo analítico para estructuras de fábrica se aplicará, en primera instancia, la estática gráfica como método gráfico. Lo que obliga a considerar tres hipótesis como punto de partida de cálculo.

La primera es considerar el deslizamiento entre piezas como cero, se estima que el rozamiento será suficiente para resistir el esfuerzo rasante que está actuando entre ellas.

También se entiende que las piezas de fábrica son incompresibles y se cuenta con que se comportarán como sólidos rígidos indeformables. (Fig. 10)

Por último se plantea la hipótesis de que la resistencia a tracción de la fábrica es cero. También se desprecia la tracción del mortero ya que éste no garantiza la cohesión entre cualquier elemento de la fábrica.

Antes de poder aplicar la estática gráfica para el cálculo gráfico de estructuras de fábrica, se necesita emplear primero el «método de los cortes»⁹. Este método se basa en dividir la estructura principal en secciones transversales paralelas entre ellas para conseguir dividir la geometría total de la estructura en elementos más sencillos. Esto se debe a que a que las reglas de resolución del método gráfico tan solo son aplicables a estructuras cuyos esquemas polares, que contienen los polígonos de equilibrio de los vectores de fuerza resultantes del análisis de acciones y reacciones, son planos.

Como se ha dicho anteriormente, cada parte específica de la tesis plantea un reto distinto y por tanto un estado del arte diferenciado. Este documento incluye un trabajo desarrollado basado en el cálculo de elementos finitos.

Este método de cálculo forma parte del cálculo estructural como tal desde los años 40, cuando Courant plantea la posibilidad de utilizar funciones polinómicas

⁹ El «método de los cortes» fue utilizado habitualmente en todo el s. XIX y validado por Jacques Heyman dentro del marco del análisis límite (Heyman 1988)

como posible solución a problemas elásticos dentro de un mallado triangular. Aunque ni fue hasta que Turner, Clough, Martin y Topp refinan el proceso de cálculo que no se acepta el método tal y como lo conocemos ahora¹⁰.

El proceso propiamente dicho consiste en fraccionar una geometría continua en un conjunto de nodos que se consideran elementos individuales interconectados. De este modo la pauta que sigue el conjunto continuo se rige por ecuaciones que serán iguales a las que dictaminan el comportamiento por separado de cada nodo; así, se puede limitar el número de grados de libertad, pasando de un sistema continuo con infinitos grados de libertad a uno cuyo comportamiento puede modelarse mediante un sistema de ecuaciones lineales o no lineales. (Fig.11)

1.5.2. Contextualización histórica del período de investigación

La contextualización del período se ha realizado en base a tres medidas que se han entendido como imprescindibles para comprender el momento y la época de estudio dentro del panorama global internacional. La primera es una línea de tiempo dedicada a los avances y proyectos más destacados de la época que se van a tener en cuenta durante este trabajo. A continuación se plantea la contextualización teórica del período, dónde se sitúan por orden cronológico los tratados, diccionarios y publicaciones que enmarcan la base teórica de la tesis. Por último se recoge el marco normativo en el que se emplaza el período seleccionado. Con estas tres premisas se define y contextualiza la época seleccionada dentro de un rango de tiempo superior para fijar los parámetros de interés de este estudio.

Fig. 11. Ejemplo de un sistema estructural calculado con el sistema de elementos finitos. Imágen del autor. 2015.

¹⁰ El artículo: Turner, M., R.W. Clough, H.C. Martin and L.J. Topp, “Stiffness and deflection analysis of complex structures”, Journal of the Aeronautical Science, pp. 805-823, Sept. 1956.

1

2

3

4

5

6

1

2

4

5

3

6

Fig. 12. Línea de empujes correspondiente a una sección gótica modelo de cúpula sobre columnas calculas por E.E. Viollet Le Duc en 1854.

Fig. 13. Imágen de la línea de empujes calculada por E.E. Viollet Le Duc para una bóveda de cañón de medio punto con proporciones romanas.

1.6. PROPUESTA METODOLÓGICA

1.6.1. Metodología aplicada para el cálculo gráfico de estructuras de fábrica

La estática gráfica es la herramienta que con más frecuencia se emplea en el análisis de estructuras de fábrica para la resolución del equilibrio. Se caracteriza por emplear reglas gráficas en vez de los métodos numéricos necesarios para obtener una solución analítica. Se emplean vectores como representación gráfica de las fuerzas resultantes del análisis de las acciones que actúan sobre la estructura.

Estas son empleadas para construir el esquema polar del que se obtienen los radios polares, que son los vectores que representan gráficamente las fuerzas debidas al contacto entre piezas, para posteriormente usarlos para elaborar el polígono antifunicular de fuerzas. Este proceso consta de las siguientes fases:

Realización del esquema polar: se sitúan los vectores de fuerza, debidos a la acción del peso propio de cada pieza del arco, uno a continuación del otro y dos polos simétricos en la posición adecuada y se trazan los rayos polares.

Para la construcción del polígono antifunicular, se trazan las paralelas a los rayos polares y cortándolas en la proyección de los vectores de fuerza. Estando estos situados en el centro de gravedad de cada pieza, se obtiene este polígono.

Se superpone el polígono antifunicular sobre la representación gráfica de la estructura de fábrica; se deduce la línea de empujes, pues esta es la línea que une los puntos de corte de las juntas entre piezas con el polígono antifunicular.

La línea de empujes obtenida representa el lugar geométrico donde se transmiten los esfuerzos de contacto entre las piezas de una estructura de fábrica sometida a una serie de acciones para conservar su estabilidad. (Fig. 12) y (Fig. 13) La geometría de esta curva catenaria depende de las acciones que actúan sobre

la estructura, de la geometría de esta y de las restricciones consideradas en los apoyos. De hecho, la elección de los polos para realizar el esquema polar se ajusta a una restricción concreta en los apoyos. De haber elegido otros polos diferentes, la línea de empujes pasaría por otro punto de la base del arco. En el ejercicio realizado como parte de la tesis, se han elegido dos polos, de tal modo que la línea de empujes obtenida sea la que menos empuje horizontal provoca en sus apoyos, manteniendo el arco estable.

Siguiendo con lo anterior, sabemos que la estática gráfica es directamente aplicable a estructuras formadas por arcos, arbotantes o pilastras. En estructuras como bóvedas de cañón o crucería, cúpulas, semicúpulas o estribos, se hace necesario simplificarlas para analizarlas por partes, como si de una estructura plana se tratase, para posteriormente extrapolar el resultado a la globalidad de la estructura. Estos cortes se realizan siguiendo un criterio determinado:

- En el caso de bóvedas de cañón, cuyo comportamiento según la teoría elástica se definiría como un caso de deformación plana, basta con dividirla empleando planos de corte perpendiculares al eje de la bóveda para analizar un tramo como si se tratase de un arco. Posteriormente, se puede deducir que la seguridad de la bóveda será similar a la del tramo analizado como un arco.

- Las cúpulas se dividen mediante planos de corte, cuya distribución en planta es radial y se analizan dos gajos enfrentados como si se tratase de un arco de anchura y, por tanto, peso decreciente de los arranques a la clave. La seguridad de la cúpula será la misma que la deducida del análisis de los gajos enfrentados formando un arco.

- Las cúpulas semicirculares o semicúpulas se dividen mediante planos de corte paralelos, obteniendo arcos para analizarlos individualmente.

- Los estribos basta con dividirlos empleando planos de corte perpendiculares al plano que contiene el estribo para analizar un tramo como si se tratase de un sólido rígido. Posteriormente, se puede deducir que la seguridad del estribo es toda su longitud; será similar a la del tramo analizado.

1.6.2. Metodología aplicada para el cálculo por elementos finitos de estructuras de fábrica.

Por otro lado, en una segunda fase de la tesis, se ha planteado un cálculo con el método de elementos finitos. La metodología propuesta para esta fase se basa en analizar la estructura de fábrica mediante elementos finitos, cumpliendo con una serie de consideraciones previas. No se trata de resolver o tomar el modelo como un continuo, sino un modelo compuesto por una serie de bloques en contacto. La geometría de estos bloques se debe corresponder con la de las piezas que componen la estructura de fábrica o, de forma simplificada, con la geometría de un grupo determinado de estas piezas. Esto facilita el proceso de modelado de la estructura sin variar con ello los resultados obtenidos. La agrupación de piezas que componen el modelo debe realizarse siguiendo un criterio determinado, parecido al que se emplea al aplicar el método de cortes en la estática gráfica. (Fig.14)

Una vez definido el modelo, es necesario especificar las condiciones de contorno del modelo, es decir, las acciones que actúan sobre él. Ya tomadas estas consideraciones, se realiza el mallado de los elementos estructurales y el cálculo posterior mediante elementos finitos del modelo completo.

Fig. 14. Ejemplo de los resultados obtenidos con el cálculo de elementos finitos para un sistema estructural específico realizado más adelante. Imágen del autor. 2015.

1.6.3. Metodología aplicada para el análisis de las fuentes teóricas

Las fuentes teóricas se han tratado con un profundo trabajo de gabinete. La revista *Revue Générale de l'Architecture et des Travaux Publics* es la que se ha seleccionado como referente de la praxis y de la teoría de la época. Esta revista comenzó el mismo año del período de inicio de la tesis, además se postuló como una revista moderna, incluyendo todo tipo de artículos, con un concepto multidisciplinar de la arquitectura. Todo esto hizo de la revista en su época ser referente para otras publicaciones periódicas. Por todo esto se ha seleccionado esta revista como principal fuente para la comparación entre teoría, práctica e historia que son reflejo directo de lo que sucede paso a paso.

Para llevar a cabo el análisis objetivo de la revista se han realizado unas fichas de los volúmenes cada 5 años que reflejan la importancia que se le da a la divulgación de unas secciones u otras en función del número de páginas dedicadas a las mismas. De este modo podemos con exactitud cómo va modificando su tendencia la revista de cara a la divulgación de resultados de un área o de otra.

También se han tenido muy en cuenta los libros publicados durante el período seleccionado, no sólo los editados entonces, sino los que contaron con una gran acogida y por extensión con una enorme divulgación que implica el gran impacto del texto durante el período escogido.

2 LA CORRECCIÓN GEOMÉTRICA APLICADA A LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL EN LOS MÉTODOS DE RECONSTRUCCIÓN

El modelo es el resultado de un proceso y, como tal, debe ser analizado desde muchos aspectos. No se trata únicamente de ver el modelo como alguna de las soluciones de patentes más conocidas de la época, aunque dichas patentes hayan podido crear un determinado tipo de construcción específica derivada de los avances tecnológicos. Se trata de establecer una concepción distinta de una geometría que posibilite un campo de tipologías o desarrollos nuevos arquitectónicos en el que con una tecnología específica, en este caso los avances realizados en la arquitectura del hierro y del metal, se va a poder definir una base de desarrollo de una nueva arquitectura.

Comienza a plantearse la forma como parte de la estructura. El primero en tratar la relación entre estructura y forma y hablar de tipología arquitectónica fue, cincuenta y dos años antes de que comience el año de estudio, el arqueólogo

francés Antoine Chrysostome Quatremère de Quincy (1755-1849)¹, que, a pesar de no ser arquitecto, fue pionero en la concepción del arte clásico, en replantearse la arquitectura tal y como se había encontrado y sobre todo en comprender el monumento arquitectónico como un documento de la historia capaz de transmitir sistemas constructivos y tecnologías «nuevas». Su primera obra escrita fue, entre 1788-1825, el *Dictionnaire d'architecture de la encyclopédie méthodique* y allí escribe:

«Tal redescubrimiento (el del pasado), lejos del tratamiento de la belleza intrínseca del edificio, no tiene otro propósito que el de permitir al lector entender cómo fue construido el edificio, y el efecto que tiene en los sentidos, y para eliminar los prejuicios de gusto moderno hacia este tipo de edificio».

«En otro lugar, examinaré —después de examinar todas las pruebas relativas— cuán extendido estaba el uso de pinturas y colores en la arquitectura clásica. Por este medio, con una forma de arte tan estrechamente vinculada a la escultura, espero poder demostrar lo equivocados que hemos estado respecto al arte clásico».

Esta primera obra fue reescrita y ampliada en 1832 por el *Dictionnaire historique d'architecture, contenant dans son plan les notions historiques, descriptives, archéologiques, biographiques, théoriques, didactiques et pratiques*, donde se centraba sobre todo en los dos primeros capítulos de su obra anterior.

En realidad, no busca una transformación, sino una trasposición del concepto de modelo con su caracterización, muy concreta en este caso, que va a ser definida por los materiales, que es el lenguaje constructivo de la arquitectura específica, tanto en la arquitectura clásica, que es por donde empieza esta trasposición, como la nueva arquitectura del hierro, que llegará cerca de cuarenta años más tarde.

¹ En el texto «Dictionnaire d'architecture» de la *Encyclopédie méthodique*, (ed. Panckoucke, 3 vols., París,) escrito y publicado entre los años 1788 y 1825 y en el posterior «Dictionnaire historique d'architecture, contenant dans son plan les notions historiques, descriptives, archéologiques, biographiques, théoriques, didactiques et pratiques de cet art», publicado como una ampliación de la anterior en el año 1832 (2 vols., París).

Esta teoría de trasposición de los modelos va a variar con la introducción de los modelos constructivos en un aspecto muy concreto, cuando se piensa en un orden arquitectónico el arquitecto tiene unos modelos preconcebidos que vienen de los tratados arquitectónicos² y unas reglas asociadas a ese uso, reglas conocidas que hablan de ritmo, de composición, de proporciones... que le ayudan a resolver el problema de diseño al que se está enfrentando y que le aportan escala y tamaño, pero cuando el arquitecto se encuentra con una estructura reticular derivada de una tecnología específica, como puede ser la estandarización en mayor o menor medida de las estructuras metálicas, el concepto de orden o de proporción clásica pierde todo su sentido, y ahí es cuando entra el concepto de modelo constructivo que se está buscando. El lenguaje constructivo cobra sentido porque se deben reinventar las normas o al menos los criterios como base del modelo.

Al principio de la aparición de las nuevas técnicas, teniendo en cuenta que los avances iban mucho más rápido que los debates teóricos y filosóficos, el arquitecto aplicaba las normas y los órdenes conocidos de la arquitectura clásica a los nuevos sistemas constructivos, buscando un criterio fijo que pudiera utilizar con los nuevos elementos; ahí es donde comienza el debate arquitectónico sobre el uso de los órdenes antiguos frente a los modelos nuevos.

2 Durante los s.XVII y principios del s.XVIII hubo un gran auge de publicación de tratados, sobre todo en Francia e Italia (o al menos sobre Italia y la antigüedad clásica). Un ejemplo de los primeros tratados sobre órdenes clásicos que supusieron una gran influencia por su gran divulgación y su extenso número de publicaciones a lo largo de los años son:

- *Cours d'architecture, qui comprend les ordres de Vignole* del arquitecto francés Augustin-Charles D'Aviler cuya primera edición fue en 1691, pero que se llegó a publicar hasta 15 veces antes de 1800 y que después tuvo una grandísima divulgación durante el siguiente siglo.
- *Traité d'architecture avec des remarques et des observations très utiles pour les jeunes gens, qui veulent s'appliquer à ce bel art*, del arquitecto y grabador de cámara francés Sebastien Leclerc, que se publicó en París en 1714. Incluye una colección de dibujos y descripciones precisas de cada orden.
- *Cours d'architecture enseigné dans l'Academie royale d'architecture* escrito y publicado por François Blondel en el año 1675, fue una de las primeras visiones Générales "modernas" de los órdenes clásicos de la arquitectura con un fin divulgativo expreso.

Fig. 1. Tempio antiguo llamado de la Salud. De la serie “Vistas de Roma”. Grabado de Giovanni Battista Piranesi. 1763

Fig. 2. Abadía Sweetheart, Escocia. Fotografía general. Escuela Ruskiniana de consolidación de la ruina.

Fig. 3. Abadía de Rievaulx. Inglaterra. Fotografía general. Escuela ruskiniana de consolidación de la ruina.

2.1. LA CORRECCIÓN GEOMÉTRICA APLICADA A LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL EN LOS MÉTODOS DE RECONSTRUCCIÓN.

En torno a 1800, con el fin de la Revolución, se despertará en Francia un interés creciente por los monumentos históricos³, que pronto estará prácticamente generalizado en toda Europa (Fig. 1). Al principio, este interés podía identificarse, en sus cualidades, con una extensión culta de la fascinación que las ruinas antiguas habían ejercido siempre sobre el inconsciente colectivo y sus posibilidades, pero poco a poco, con la modernidad, la calidad de este interés fue creciendo, pasándose de la contemplación a la intervención; la relación del artista y, por tanto, del arquitecto con ellas pasó muy pronto de ser puramente visual a hacer de ellas objeto de reconstrucciones, ripristino y restauraciones de toda índole, lo que abriría un debate internacional que tuvo su cénit a mediados del s. XIX, cuando se plantea, en todos los niveles, la reconstrucción como forma de proyecto. (Fig.2)y (Fig.3).

Comienza un periodo donde se define por primera vez la restauración moderna,

3 En torno a principio del s.XIX la divulgación de la arquitectura clásica fue la base de la enseñanza en escuelas de arquitectura y bellas artes. Algunos de estas publicaciones fueron:

- *Les edífices antiques de Rome dessinés et mesurés très exactement* del arquitecto francés Antoine Desgodetz, que aunque se publicó por primera vez mucho antes de 1800, en 1682, es cierto que su edición de mayor divulgación fue en el año 1771.
- *Parallele de l'architecture antique avec la moderne : suivant les dix principaux auteurs qui ont écrit sur les cinq ordres* escrito por el teórico de la arquitectura Roland Freart de Chambray en el año 1766 y dónde por primera vez se ponen en paralelo los órdenes de la arquitectura clásica con los órdenes “modernos” que cada autor defendía. Fue el principio de varios “paralelismos” de este tipo en todas sus vertientes.
- *Vistas de Roma* de Giuseppe Vasi. Este grabador italiano contribuyó muchísimo a la divulgación y propagación de la antigua Roma, ya que publicó entre los años 1746 y 1761 una serie de diez volúmenes con has 240 vistas de la arquitectura clásica de Roma.
- *Le Antichità Romane* de Piranesi. Discípulo del anterior publicó en 1756 una serie de cuatro tomos con más de 200 grabados exclusivamente de la arquitectura de la ciudad Roma. Influenció mucho en la época ya que sus grabados se exportaron casi de inmediato a Inglaterra. De hecho las planchas originales se siguieron imprimiendo por su hijo hasta principios del s. XIX

Fig. 4. Santa Magdalena de Vézelay. Croquis del colapso estructural de la nave central antes de la reconstrucción. 1840, realizado por Viollet Le Duc.

entendiendo, durante esta época, la restauración como una reconstrucción total o parcial y justificada del monumento histórico.

Arquitectos como Viollet Le Duc⁴ o Vitet⁵ habían encontrado una aplicación práctica de los estudios científicos que se están desarrollando contemporáneamente y abogaron tanto desde sus proyectos como desde su teoría por una unión de ambas ciencias. De hecho, Le Duc publica en 1873 el libro *Historie d'une maison*, donde sostiene que uno de los grandes males que se han introducido en la práctica de la arquitectura es, precisamente, la ruptura entre la ingeniería y la creatividad artística. El resultado, defiende Le Duc, ha sido una reducción en la calidad de los trabajos desarrollados desde ambos bandos, siendo este empobrecimiento mucho más acusado en la rama artística (o arquitectónica) del edificio (Viollet Le Duc. 1873).

Estas aseveraciones ayudan a entender cómo se enfrenta Viollet Le Duc ante el proyecto de la abadía de Vézelay (Fig.4). Es cierto que tanto el encargo como la ejecución son anteriores a la publicación de sus textos⁶ y, probablemente, anteriores a la maduración de las ideas que más tarde defenderá sistemáticamente, pero ya se intuye un manera de entender el proyecto de un modo muy distinto al que tienen arquitectos e ingenieros de su época.

4 Se refiere a la teoría de la restauración de que Viollet Le Duc definió en su *Dictionnaire raisonné de l'architecture française* en el año 1854 dónde precisa el término restauración del siguiente modo "Restaurar un edificio no es mantenerlo, repararlo o rehacerlo, es restituirlo a un estado completo que quizás no haya existido nunca". Con esta afirmación traslada la restauración a la modernidad, dónde cabe que para la restitución completa del monumento se necesiten las nuevas técnicas de las que disponen en el s.XIX.

5 Se refiere a la teoría dirimida por Ludovic Vitet en 1837 dónde define los trabajos de restauración del siguiente modo "En restauración, el primer e inquebrantable principio es no innovar. [...] No hay que corregir la irregularidad, ni alinear las desviaciones, porque la irregularidad, la desviación y los defectos de simetría son hechos históricos llenos de interés". Este concepto de conservación obliga al uso de nuevas técnicas para evitar las "correcciones" y "desviaciones" de monumentos que están en muy mal estado de conservación o con grandes problemas estructurales.

6 Aunque la mayoría de sus textos publicados Viollet Le Duc los saca entre los años 1854 y 1879, es decir, posteriores al año 1840 (que fue el año en el que comenzó la restauración de la Abadía de Vézelay); bien es cierto que Le Duc tiene artículos publicados desde el año 1840 entre otros sitios en la revista *Revue Générale de l'architecture et des travaux publics* dónde ya posiciona sus ideas y empieza a madurar sus opiniones.

A nivel de educación, en las escuelas de arquitectura de París, tanto Viollet Le Duc como Prospero Merimeé⁷ comparten una gran desesperanza en la formación general que los arquitectos convencionales tenían sobre la restauración arquitectónica; además, ambos lamentaban la falta de comprensión de estos mismos arquitectos, responsables en la mayoría de casos de restauraciones importantes en provincias francesas, frente a la arquitectura medieval.

Es evidente la pasión que sienten ambos por la arquitectura medieval y el gótico, pero respecto a la polémica suscitada por el uso de los nuevos métodos científicos en las obras de restauración, no es tan igualada la respuesta de ambos personajes. Mientras Viollet aboga claramente por utilizar todos los nuevos métodos y materiales de los que se dispone, Merimeé no parece tener clara una aplicación práctica de dichos métodos, que se contraponen con una idea mucho menos tecnificada de la restauración, donde considera que cuanto más parecidos sean los métodos utilizados a los métodos medievales, tanto más lo serán los edificios restaurados a los originales o al menos a los que los maestros de la época quisieron levantar.

⁷ Próspero Merimée (1803-1870) estuvo asociado con la enseñanza y la administración en lo que a Restauración y Monumentos históricos durante toda su vida. Entre otras cosas y como ejemplo de ello, siguió a Ludovic Vitet como Inspector de monumentos históricos entre los años 1834 y 1860 y también forma parte del Comité de artes y monumentos desde 1835.

2.2. EL PROYECTO DE LA ABADÍA DE VÉZELAY

En 1839, el presidente de la Comisión de Monumentos Históricos, Jean Vatout⁸, propuso enviar a arquitectos parisinos a cada provincia donde se estuviesen realizando trabajos de restauración de monumentos, entre ellas la provincia de Yonne, en el lugar en que se encuentra la abadía de Vézelay, donde se había invertido ya gran cantidad de dinero, para comprobar cómo iban dichos trabajos, dado que los resultados eran muy deficientes o inexistentes

Un año después de esta decisión, Vézelay no tenía todavía asignado ningún arquitecto de la capital, la primera opción para la restauración de Vézelay desde París fue Duban⁹, opción lógica por su experiencia previa con la Sainte-Chapelle, pero el arquitecto negó el encargo por la controversia surgida con el trabajo de restauración ejecutado por su cuñado, Francois Debret. Tras la negativa de Duban, se propuso a Caristie, pero se consideró que era contrario a las nuevas enseñanzas que desde la comisión se estaban haciendo para la restauración de monumentos históricos, enfrentándose incluso a la misma en su defensa de las antiguas enseñanzas. De este modo, Viollet Le Duc, como tercera opción, fue elegido para el puesto. Las condiciones de dicho puesto eran muy estrictas; es importante entender cómo se veía a Le Duc desde la política, porque se exigía un conocimiento muy especializado de los sistemas constructivos y formas de la arquitectura medieval y con experiencia previa en trabajos de esta índole. Fue su trabajo de restauración y reconstrucción en la iglesia de Saint-Just, en Narbonna,

8 El 29 de septiembre de 1837 se instituyó la Comisión de los Monumentos Históricos en Francia, sucediendo a lo que hasta ahora había sido el Comité de las Artes. El primer presidente de dicha Comisión fue Jean Vatout, director de los Monumentos públicos. También Vatout fue responsable de la formación de los arquitectos que intervendrían en muchos de los monumentos que estarían al amparo de dicha Comisión, como el propio Eugène Viollet-le-Duc. Jean Vatout (1791-1848)

9 Es lógica la primera elección del arquitecto francés Jacques Félix Duban (1798-1870) ya que había ganado en 1823 el prestigioso Premio de Roma de la École des Beaux-Arts. Su negativa en este trabajo y la controversia mencionada en el texto no le impidieron ser elegido como miembro de la Academia de Bellas Artes en 1854.

el que sirvió de carta de presentación para conseguir el proyecto de Vézelay.

Además de su experiencia, fue decisivo en la decisión del arquitecto el voto a favor de Prospero Merimeé, que desde 1834, año en el que fue nombrado inspector general de Monumentos Históricos, ejercía gran poder en el gobierno francés y sobre todo en la Comisión de Monumentos Históricos. Merimeé conoció a Le Duc en 1835, recomendado por Delécluze (1781-1863)¹⁰, que conociendo la pasión de Merimeé por los monumentos históricos supo que se interesaría por un joven arquitecto que volvía de una temporada en Italia como ganador de la beca de Roma y de un análisis geométrico a través del dibujo de edificios medievales encargado por el barón Taylor.

2.2.1. Las nuevas tecnologías al servicio del sentido histórico

El debate sobre el uso de los nuevos métodos de cálculo científico en los proyectos de restauración empezó, probablemente, entre Le Duc y Merimeé en este proyecto de la abadía de Vézelay.

Tras el informe preliminar que en 1840 Viollet realiza sobre la abadía, se decide actuar en dos fases, una primera fase de reparación e intervenciones urgentes y una segunda de restauración. En el primer grupo se encuentran la reparación de los contrafuertes, la consolidación estructural del nártex y, en definitiva, la reparación del sistema estructural de la nave; en el segundo grupo, entran ya los trabajos de restauración de esculturas, capillas...

La propuesta de reconstrucción de elementos fundamentales que Viollet hizo sobre el proyecto demuestra un concepto de estructura en esqueleto acorde por completo con el debate que se está planteando para estructura nueva y que, en varias ocasiones, implicó una serie de decisiones no siempre compartidas por

¹⁰ Étienne-Jean Delécluze fue miembro del Comité de las artes y Monumentos Históricos en el momento de su creación en 1840 (el mismo año del encargo de Vézelay a Le Duc) bajo el ministerio de Guizot. Además era el tío del arquitecto Eugène Viollet-le-Duc (1814-79) del que se dijo que fue uno de sus alumnos de arte.

Fig. 5. Santa Magdalena de Vézelay. Dibujo del estado anterior a la reconstrucción de la fachada norte, 1840 realizado por Viollet Le Duc.

Merimeé, que anteponía las decisiones más «arquitectónicas» e históricas del monumento. Por ejemplo, se encontró en la fachada norte (Fig.5) y (Fig.6) una porción original de friso continuo de la que no había constancia (ni afirmativa ni negativamente) en ninguna otra fachada del monumento ni mucho menos en los muros exteriores de las naves que necesitaban de una reconstrucción urgente. Le Duc decidió reconstruir el friso a lo largo de todo el perímetro de la iglesia y Merimeé le reprochó la decisión, ya que, al no haber seguridad de que dicho friso existiese, no compartía la frívola decisión de completar algo de lo que no había garantía. No comprendió la idea que Le Duc estaba desarrollando. El arquitecto utilizó el friso ornamental como viga riostra de los muros exteriores del monumento. El abandono que había sufrido la abadía durante años había arruinado varios arcos de la nave principal que habían sido reconstruidos; además, varios arcos torales presentaban grietas y era evidente que estaban transmitiendo empujes horizontales no resueltos a la estructura de arbotantes y contrafuertes exteriores. Le Duc entendió que un zuncho perimetral tenía varias ventajas: la primera, arriostraba el edificio, su peso continuo a lo largo de la cabeza del muro exterior actuaba como centralizador de empujes horizontales, a la vez que precomprimía la estructura para las cargas verticales de las bóvedas. Merimeé escribe su opinión a Vitet sobre esta decisión en 1842 diciendo:

«A more serious reproach I have to M. Leduc is this. He had added around the outside of the church a sort of very complicated frieze of a singular character: It is certain that he found models for this treatment that are still very recognizable, but only on one section of the exterior. It seems to me that on many other parts,

Fig. 6. Santa Magdalena de Vézelay. Dibujo del proyecto de reconstrucción de la fachada norte, 1840 realizado por Viollet Le Duc.

Fig. 7. Santa Magdalena de Vézelay. Fotografía general de los arbotantes de la fachada sur después de la reconstrucción de 1840 de Viollet Le Duc.

there was nothing, or there was something else. Moreover, that kind of uniformity is scarcely a Byzantine practice. I suspect that even the fragment on which this ornamentation was based, was not part of the original construction. Finally, that frieze must have cost a lot and adds nothing to the worth of the restoration». (Merimeé, 1842). (Fig.7) y (Fig.8)

Con este ejemplo se entiende cómo la relación existente entre Le Duc y Merimeé, a pesar de su cercanía en la teoría, es muy cercana al debate que en su época podrían tener un ingeniero y un arquitecto. Merimeé considera el problema desde el punto de vista histórico, negando una uniformidad estética «original» sin estar de acuerdo en la reproducción de elementos que no estén documentados arqueológicamente. Sin embargo, Le Duc va más allá, basándose en la posible existencia del friso (es cierto que no está documentada, pero también lo es que tampoco lo está su ausencia).

En 1842, debido a las críticas de Merimeé, Viollet Le Duc recibe una sanción desde la Comisión de Monumentos Históricos; es cierto que las quejas de Merimeé

Fig. 8. Santa Magdalena de Vézelay. Fotografía de detalle de la fachada sur dónde se ve el contraste en la fábrica del proyecto de reconstrucción de 1840 de Viollet Le Duc.

fueron menores y coincidieron en tiempo con la gran polémica que se generó a raíz de la restauración de Debret en la iglesia de Saint- Dennis en las afueras de París, que dejó de lado la confrontación de la Comisión con Viollet.

Esta disparidad en la filosofía de ambos hombres no llegó a explicitarse y la reconstrucción de la abadía de Vézelay se convirtió con el tiempo en un modelo de cómo la Comisión de Monumentos Históricos y otros organismos gubernamentales emprenderían proyectos futuros de reconstrucción¹¹.

11 De hecho es una época dónde de 934 monumentos registrados en 1.840 se pasa a 3.000 en 1.849. Ver Salvatore Italia: *Le politiche degli altri. La tutela in Francia, Grecia, Repubblica Federale Tedesca, Regno Unido, Spagna* en “Memorabilia” ed. Laterza. Roma Bari 1.987: 255

Fig. 9. Catedral de Mallorca. Aplicación de la estática gráfica a la catedral de Mallorca por Rubió y Bellver. 1912

2.2.2. Antecedentes de la reconstrucción

Cuando se le encarga a Viollet el proyecto de restauración de Santa Magdalena de Vézelay en 1838, este proyecto forma parte del Plan Nacional Francés de Restauración Arquitectónica, gestionado por el propio Le Duc, Guizot y Merimeé. La abadía estaba abandonada desde hacía dos siglos. Su historia se remonta al siglo I (868) con un convento de monjas de la orden de San Benito, sustituidas diez años después por monjes de la misma orden. Las construcciones asociadas con este periodo se incendiaron a mediados del siglo X. Las construcciones más antiguas de este complejo monástico, que se encontraron en 1840, fueron la nave y la cripta, que se construyeron entre los años 1008 y 1011. También se cree que el nártex de la fachada oeste era de esa misma época. Ahora sabemos que la cripta fue reconstruida después de ser completada la nave y antes de terminar el nártex. En el siglo XIII, se termina la planta con el transepto y el coro; además, se incluye la parte superior del nártex y se interviene en la nave románica, reforzando la estructura exterior con arbotantes; está documentada la inestabilidad de esta estructura todavía en el año 1668, siendo en el 1758 cuando las bóvedas se consideraron en peligro estructural; después de la Revolución francesa y de la represión eclesial en 1790 y sin una institución religiosa que se hiciese cargo de la abadía, el abandono fue inevitable.

El método para el estudio y análisis de la intervención de Viollet sobre la abadía ha sido la comparación estructural entre el antes y el después de dicha intervención¹². (Fig.9)

El estudio se ha centrado sobre todo en la comparación de la sección de la nave. Dos cuestiones han desencadenado esta decisión: la primera, por ser donde Le Duc intervino más directamente y lo hizo, con toda probabilidad, sobre una base monumental histórica con gran parte en buen estado —lo que le permite respetar las naves laterales y el primer nivel y muros del segundo de la nave central—,

¹² La propuesta metodológica llevada a cabo en la tesis es paralela a la metodología planteada por el propio Viollet Le Duc en su proyecto de restauración, que coincide con la propuesta utilizada en muchos tratados de la época llamada "Paralelo" que consiste en establecer un paralelismo entre la actuación y el estado actual del monumento o de la obra o del texto.

Fig. 10. Santa Magdalena de Vézelay. Estudio de deformación de un arco de medio punto. Análisis constructivo de los arcos perpiaños de la nave central, 1250. Realizado por Viollet Le Duc

obligándole a una intervención respetuosa con la estructura en planta y el estilo preexistente, y la segunda, por ser también el lugar en que la estructura original —el nivel alto de la nave central y sus bóvedas— estaba más afectada, y por ello donde se debió trabajar más este aspecto crucial en la investigación¹³.

La nave central tenía grandes problemas estructurales: tres de los arcos perpiaños estaban derrumbados y casi todas sus bóvedas presentaban inestabilidad estructural y peligro de derrumbe; sin embargo, las naves laterales, tanto bóvedas como muros, estaban en buen estado y servían de apoyo documental a la reconstrucción. (Fig. 10)

- 13 En ese sentido es más interesante la zona “más afectada” estructuralmente de cara a la investigación ya que es dónde el arquitecto pudo aplicar más radicalmente sus revolucionarias ideas sobre restauración.

Fig. 11. Santa Magdalena de Vézelay. Sección transversal. Comparativa estructural entre la abadía antes a finales del s.XI y en 1250. A un lado como se había concebido en origen a finales del s.XI incluyendo un tirante que no fue suficiente, al otro lado como la deformación de la bóveda principal ha provocado la caída de varias de las bóvedas laterales obligando a la construcción de contrafuertes exteriores y a la reconstrucción del tirante dañado. Realizado por Viollet Le Duc

En la sección de 1250, se ve claramente cómo los empujes horizontales del arco perpiaño principal están sin resolver por falta de contrarresto, los machones se separan y los pilares y muros se inclinan desde la cota de coronación de la nave lateral; en consecuencia, se ha producido el hundimiento de los arcos perpiaños en la clave y el aplastamiento de los lechos de las dovelas de los riñones por el intradós; a continuación, en efecto dominó, vendría la dislocación por la clave de los perpiaños de la nave lateral y la inclinación de los muros exteriores¹⁴. (*Fig. 11*)

14 La inclinación de los muros exteriores es un desplome de los mismos hacia el exterior. Quebrándose la cáscara estructural.

Fig. 12. Santa Magdalena de Vézelay, Estado previo a la reconstrucción de 1840. Sección transversal de la nave, Realizado por Viollet Le Duc en 1840.

2.3. LA CORRECCIÓN GEOMÉTRICA APLICADA POR VIOLETT LE DUC EN LA ESTRUCTURA DE VÉZELAY

Le Duc propone como primera medida un cambio en la geometría del arco peripiaño principal, pasando de un arco rebajado a una forma semicircular¹⁵; esta forma, además de ser la forma románica por excelencia, aplicada al trazado del arco, por tener la tangente superior horizontal, está en condiciones de alcanzar más ancho. A continuación, aligera enormemente la estructura existente, las bóvedas de arista se reconstruyen con una única rosca de piedra con los hombros macizados con un relleno ligero y los masivos arbotantes, inicialmente grandes volúmenes de mampostería con pequeñas dovelas de sillarejo, pasan a ser esbeltos arcos de sillar apoyados sobre contrafuertes exteriores que recogen y absorben los empujes horizontales. Interviene también en la cubierta de las naves laterales, que, a lo largo de los años, habían llegado a convertirse en puntales de la nave principal (Fig. 12), necesitando para esa función quitar el alabastro que presumiblemente

15 En esta actuación se comienza a intuir cómo a pesar de no haber madurado sus ideas sobre la restauración, que no las publicaría hasta el año 1854, se atisba una vuelta al estilo primero de la Abadía que era principalmente románica. Siendo un germen de lo que será más adelante la “restauración en estilo”.

Fig. 13. Santa Magdalena de Vézelay, Propuesta de reconstrucción. Sección transversal de la nave, Realizado por Viollet Le Duc en 1840.

había en las ventanas, ocluyéndolas en gran parte y rebajar la inclinación de los pares; el hecho de haber solucionado los problemas estructurales permite a Le Duc liberar de nuevo las ventanas, sustituir el alabastro por vidrio y rehacer la cubierta, modificando la inclinación de la misma y el sistema de evacuación de aguas que tanto daño había causado a la madera de la cubierta anterior. (Fig.13)

Las curvas de presiones comparadas de ambas estructuras explican muy bien el funcionamiento de una y de otra; la de 1250 funciona sobre todo por masa, es decir, la curva de presiones llega a los muros y pilares, muy horizontal, empieza a coger la vertical gracias al contrarresto que el peso que tiene encima ejerce sobre la curva. El arbotante de Le Duc, a pesar de arrancar más bajo que el de la solución anterior, recoge las cargas más altas, aprovechando todo su ancho; la curva de presiones recorre todo el arbotante y llega al contrafuerte más vertical, volviéndose más vertical a medida que el peso del contrarresto hace efecto; esto mejora considerablemente la solución anterior, que trabajaba más con el contrarresto y menos con la geometría del arbotante, siendo insuficiente para el empuje horizontal el ancho del contrafuerte. (Fig.14) (Fig.15)

Fig. 14. Santa Magdalena de Vézelay. Sección Transversal equivalente a la Abadía en el año 1250. Análisis estructural por el método de estática gráfica para el cálculo de las líneas de carga y con el método de Gil de Hontañón para el espesor de los muros. Obra del Autor 2015.

Fig. 15. Santa Magdalena de Vézelay. Sección Transversal equivalente a la Abadía en el año 1840, tras la reconstrucción de Violle Le Duc. Análisis estructural por el método de estática gráfica para el cálculo de las líneas de carga y con el método de Gil de Hontañón para el espesor de los muros. Obra del Autor 2015.

El método seguido para el cálculo de las curvas de presiones de ambas secciones ha sido el de polígonos funiculares. Se ha entendido un peso por dovela aprovechando que tenía con cierta precisión la estereotomía de la piedra y calculándose la resultante de dicho peso, sacando con estos datos el antifuncular que servirá para hallar la curva definitiva. El cálculo de los estribos de los arcos, sin embargo, se ha hecho con dos métodos distintos, en función de los datos que tenían los constructores de la época. En la sección primera de 1250, se ha hecho el cálculo según Gil de Hontañón¹⁶; si bien es cierto que el escrito de este arquitecto es del s. XVI, no hizo más que poner por escrito el buen hacer y la intuición que, hasta ese momento y desde tiempo inmemorial, se había seguido; para la sección de 1840, aplico la regla de Blondel¹⁷ (*Fig. 16*), que es más precisa que la anterior y que, a pesar de ser del s. XVII, sigue vigente hasta el XIX¹⁸, teniendo a lo largo de este período variaciones más complejas con similar resultado.

Es sorprendente comprobar como el cálculo de las curvas de presiones que Viollet Le Duc propone para una teórica iglesia gótica en 1863 es enormemente preciso si lo comparamos con la curva de presiones calculada para la Iglesia de

16 Rodrigo Gil de Hontañón (1500-1577). La teoría escrita de este arquitecto la recogió Simón García en el texto *Compendio de arquitectura y Simetría de los templos* entre los años 1667 y 1703. Sólo los seis primeros capítulos de esta obra se atribuyen a Gil de Hontañón, aunque la teoría se basa casi íntegramente en su conocimiento.

17 Nicolas-François Blondel (1618-1686). Arquitecto teórico francés que en 1675 publica *Cours d’architecture enseigné à l’Académie royale d’architecture* (reeditado en su versión más conocida y divulgada en 1698) donde recoge la “regla de Blondel” a la que hace referencia el texto, dicha regla proporciona las dimensiones de los estribos en función del arco. A pesar de estar recogida aquí como “regla” por primera vez, se sabe que dicho cálculo es mucho más antiguo. ver el artículo de Santiago Huerta Fernández llamado *Mecánica de las bóvedas de la Catedral de Gerona* donde la pone en práctica y es referencia directa de la aplicación de esta regla en la tesis.

18 El arquitecto francés Jacques François Blondel (1705-1774), nieto del arquitecto Nicolas-François Blondel (responsable de la “regla de Blondel” y citado anteriormente), abrió en 1743, en París, una escuela privada de arquitectura, la «École des Arts», que se mantuvo en activo hasta el año 1754 donde se dedicó a transmitir además de sus teorías, los tratados y textos de su abuelo. En dicha escuela estudiaron grandes arquitectos franceses de los próximos años como pueden ser: Étienne-Louis Boullée, Claude Nicolas Ledoux, Jean-Baptiste Rondelet...y grandes arquitectos internacionales como Sir William Chambers o el danés Caspar Frederik Harsdorff que aseguraron el mantenimiento y la vigencia, entre otras cosas, de la “regla de Blondel” hasta el s.XIX.

Fig. 16. Santa Magdalena de Vézelay. Sección Transversal. Comparativa de resultados en las líneas de empuje entre el comportamiento según Viollet Le Duc y el comportamiento real de la sección calculado con estática gráfica. Obra del Autor 2015.

Vézelay. Esto explica la larga vida del método, pues este tipo de cálculos gráficos fueron el método usual de trabajo para conocer los empujes en arcos y bóvedas durante una gran parte del siglo XX¹⁹.(Fig.17)

19 Ver el artículo de Santiago Huerta Fernández llamado *Mecánica de las bóvedas de la Catedral de Gerona* dónde se hace preguntas del tipo: “¿Cómo es posible que tuvieran esa seguridad a falta de un ejemplo de dimensiones similares? ¿Qué sustrato común de conocimiento les permitía emitir un juicio tan categórico? En definitiva, ¿cómo calculaban los arquitectos góticos sus estructuras?” y aplica los métodos gráficos para el cálculo estructural.

Fig. 17. Santa Magdalena de Vézelay. Sección Transversal. Comparación geométrica del estado previo y del estado resultante tras la reconstrucción de Viollet Le Duc. Obra del Autor 2015.

Fig. 18. Iglesia de Ste Marguerite du Vésinet. Perspectiva de la “columna vertebral” metálica. Sistema estructural de nervios suspendidos, L. A. Boileau. 1886

2.4. RESULTADOS

De este modo se puede afirmar que, en la iglesia de Vézelay, Le Duc se enfrenta al proyecto con dos modelos claros de intervención: un primer modelo que responde al incipiente valor que se le da a lo histórico y que trata de conservar todo lo que queda de otra época, y un segundo modelo que consiste en poner en práctica la técnica de la que disponía y que cualquier arquitecto aventajado como era Le Duc estaba deseando experimentar. No le hubiera sido difícil a Le Duc utilizar para la ejecución de esta reconstrucción materiales completamente nuevos como estaba haciendo, entre otros muchos, Boileau, cambiando, entre otras cosas, en iglesias góticas la piedra por hierro y hormigón, arguyendo la economía de medios y la nueva era, pero esta actuación le parecía a Le Duc fruto de «una concepción demasiado ingenua», ya que obviar el pasado elude el verdadero problema de enfrentarse a él. (Fig. 18), (Fig. 19) y (Fig. 20).

Fig. 19. Iglesia de Saint-Eugène-Sainte-Cécile. Imagen del interior. Proyecto y Obra de L. A. Boileau en París en 1854

Fig. 20. Iglesia de Saint-Eugène-Sainte-Cécile. Sección transversal del proyecto original. Realizado por L. A. Boileau en París en 1854

Tampoco le hubiese costado mantener la ruina según las enseñanzas de Ruskin, o simplemente utilizar los métodos de trabajo y la técnica de los antiguos para su reconstrucción, creando de este modo lo que más adelante se llamaría un «falso histórico», pero la primera opción hacía de la abadía un objeto, algo muerto incapaz de dar servicio a la comunidad, decadente e intocable, y la segunda opción era negar las posibilidades que tenía de mejorar el proyecto, no digo de variar la esencia del mismo, sino de aplicar el conocimiento y la técnica que poseía. Esta conjunción de modelos adelantada a su época hizo de esta basílica y de su intervención a la vez un hito en la época vinculada a la historia y al pasado, lo que hace de ella un ejemplo perfecto de memoria y modernidad.

La importancia del nuevo modelo no es la caracterización por utilizar una técnica, sino el valor propio de la forma construida. Los historicismos, racionalismos... son ismos añadidos. En la estructura gótica de su tiempo, no se planteaba la importancia de si esa forma se encuadraba dentro del estilo o no; lo que realmente se buscaba era la esbeltez de la pieza y sobre todo la ligereza de la estructura que permitiese un espacio completamente nuevo en su concepción. Viollet, en su comprensión de la arquitectura histórica y de los avances conceptuales que esta supuso, no desarrolla, como se entendió durante el siglo XX, una recuperación de la forma gótica como arquitectura de su época, sino que gracias a una profunda reflexión de las exigencias y con conciencia de las necesidades técnicas para proyectar y ejecutar, en definitiva construir la forma, llega a un nuevo modelo de arquitectura.

La arquitectura de Viollet Le Duc no es una figuración tecnológica, sino una aplicación de nuevas técnicas y materiales, cuyo correcto uso es lo realmente importante. Probablemente, el problema sobre la aceptación de la forma gótica como forma óptima pierda interés si analizamos profundamente la obra de Le Duc, tanto dentro de su contexto como con criterios actuales. Lo que ejecuta es la aplicación de una técnica nueva sobre una geometría conocida, la gótica, escondiendo su nueva concepción arquitectónica y los cambios constructivos derivados de la variación.

Viollet, partiendo de que no es posible explicar el espacio con un único plano de sección ni tampoco por medio de un sumatorio de planos simples, concibe el espacio como una estructura tridimensional de esqueleto que necesita explicarse como un todo; para ello, elige una estructura conocida a través de análisis, estudios y dibujos, como es la estructura gótica y aplica este conocimiento para resolver nuevos espacios. Evidentemente, no «todo» su conocimiento de aquellas estructuras, sino solo una parte que permita, con un concepto realmente moderno de minimalismo constructivo, la construcción del mismo a través del manejo exacto del conocimiento.

La comprensión de la escala es relevante; la especialización a que derivan la arquitectura y la ingeniería al comprender que necesitan aplicar de manera distinta técnicas y conocimientos provoca entre ellos una separación brusca que empobreció a ambas disciplinas. Con esta escisión, se asumió que los problemas de gran escala estaban reservados para la rama de la ingeniería y fue Viollet Le Duc quien entendió que a través de la aplicación de los conocimientos utilizados para grandes escalas se podían crear nuevos espacios que resolvieran necesidades que el uso de la técnica en otras áreas había ya generado en la sociedad, como son la necesidad de grandes edificios diáfanos como mercados, bancos, bibliotecas...

Como parte de su aportación en esta nueva concepción de la estructura esqueleto, Le Duc dibuja y define las líneas de fuerzas de la estructura buscando la ligereza y economía de medios, creando así una sobreposición de técnicas distintas para responder a una especialización tecnológica y poder huir del exhibicionismo tecnológico que podría derivarse de ese trabajo.

2.5. DOCUMENTACIÓN GRÁFICA RELATIVA AL CÁLCULO MEDIANTE ESTÁTICA GRÁFICA DEL PROYECTO ORIGINAL Y DEL PROYECTO DE RECONSTRUCCIÓN DE VIOLLET LE DUC DE SANTA MAGDALENA DE VÉZELAY.

El estudio que se ha realizado sobre la Abadía de Santa Magdalena de Vézelay sirve para interpretar si las líneas de fuerza en su momento se identificaban materialmente con soluciones tipológicas específicas. Queda demostrado con este análisis estratigráfico que, efectivamente, existían tipologías constructivas transformadas por los nuevos modelos constructivos.

En los planos se entiende de manera gráfica cómo las tipologías constructivas anteriores a los avances técnicos, en ocasiones podían tener graves problemas que, en la reconstrucción de Viollet Le Duc, se solucionan gracias al uso de estas mejoras que derivarán en nuevos modelos constructivos que constituirán una nueva manera de entender la arquitectura también a modo teórico cómo el propio Viollet enunció.

Esquemas de los polígonos funiculares correspondientes a la sección principal estudiada de la abadía de Santa Magdalena de Vézelay en 1250. Estos polígonos funiculares son el procedimiento gráfico para el cálculo de reacciones y fuerza resultante. En este caso estos polígonos son polígonos funiculares cerrados que se han calculado para garantizar que todos los tramos en los que se ha dividido el arco trabajan a compresión.

01 SECCIÓN TRANSVERSAL y CÁLCULO GEOMÉTRICO de Santa Magdalena de Vézelay en 1250, antes de la reconstrucción.

Esquemas de los polígonos funiculares correspondientes a la sección principal estudiada de la abadía de Santa Magdalena de Vézelay en 1840. Estos polígonos funiculares son el procedimiento gráfico para el cálculo de reacciones y fuerza resultante. En este caso estos polígonos son polígonos funiculares cerrados que se han calculado para garantizar que todos los tramos en los que se ha dividido el arco trabajan a compresión.

02 SECCIÓN TRANSVERSAL y CÁLCULO GEOMÉTRICO de Santa Magdalena de Vézelay tras la reconstrucción de Viollet Le Duc en 1840.

Sección de la Abadía de Vézelay en un croquis de su comportamiento estructural antes de la intervención de Viollet Le Duc.

Análisis del comportamiento estructural de una sección plana de un arco de medio punto en estado límite de rotura.

Detalle de la ejecución de un muro de mampuesto con armado longitudinal de madera.

03 SECCIÓN TRANSVERSAL y DETALLES de Santa Magdalena de Vézelay en 1250, antes de la reconstrucción.

Detalle de las dovelas y el arranque masivo casi vertical de uno de los arcos de la nave principal.

Los detalles de canalones y cornisas los introdujo Le Duc, con el objetivo de alejar el agua de los encuentros difíciles que tanto habían dañado la anterior estructura.

Detalle de la planta del pilar con las direcciones de tensión estructural. Detalle del aligeramiento de la bóveda en los plementos.
Detalle de Planta y Sección transversal de la Abadía de Vézelay según la construcción ejecutada en el año 1.840.

04 SECCIÓN TRANSVERSAL y DETALLES de Santa Magdalena de Vézelay tras la reconstrucción de Viollet Le Duc en 1840.

Curva de presiones del Organixmo Transverso de la Catedral de Mallorca según el Método Cullman. Rubió Bellver. 1911

Diagramas de cálculo de Viollet Le Duc en 1.854 sobre distintos tipos de arcos. Basados en la regla de Blondel.

Diagrama funcionamiento estructural por polígonos funiculares. Vézelay

Diagrama funcionamiento estructural de una sección gótica convencional. Viollet Le Duc

05 Comparativa de la líneas de empujes de Santa Magdalena de Vézelay tras la reconstrucción de Viollet Le Duc en 1840 y una sección teórica publicada en el Diccionario Razonado en 1854.

2.6. ANÁLISIS GEOMÉTRICO Y CONSTRUCTIVO DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA ABADÍA DE SANTA MAGDALENA DE VÉZELAY. 1250, 1840 Y 1868.

Para realizar el reconocimiento del estado de comportamiento de los elementos estructurales dentro del proyecto es importante conocer la geometría intrínseca de cada componente de la estructura. Para eso se ha analizado cada arco, la estereotomía de su fábrica según los planos y documentación existente, así sabremos exactamente si los cambios en los modelos constructivos, y por tanto la aplicación de las nuevas técnicas, han tenido algo que ver con el óptimo funcionamiento del proyecto de reconstrucción de Viollet Le Duc de 1840.

El único modo de realizar este análisis es estudiando cada elemento en los tres estados de tiempo dónde se han producido cambios en su geometría para comprobar si el modelo constructivo le afecta. Los tres estados son en primer lugar el del proyecto original de 1250, en segundo lugar el del proyecto reconstruido por Viollet Le Duc de 1840 y por último y a modo de avance teórico el de la hipótesis ideal planteada por el mismo arquitecto en 1868 y publicada en el “Diccionario razonado de la arquitectura” dónde aplica los avances técnicos surgidos entre 1840 y 1868 en un esquema de reconstrucción posible de un proyecto ya ejecutado. Es muy interesante comprobar cómo la teoría y la práctica se dan de nuevo la mano en un ejemplo concreto.

En este punto se emplea un método de fichas utilizado como herramienta de estudio sistemático para analizar las particularidades de cada unidad estructural por separado. Se han realizado unas tablas de estudio geométrico gracias a las que se han podido analizar y clasificar cada elemento parte de la estructura explicando pormenorizadamente su geometría.

Los puntos geométricos que se han tenido en cuenta dentro de cada tabla son los siguientes: Denominación del elemento a analizar, año de construcción, localización, masa, volumen, cuadro geométrico delimitador de la forma, centro

de gravedad, momentos de inercia, productos de inercia, radios de giro del arco, momentos principales y direcciones X,Y y Z alrededor del centro de gravedad.

Además de estos datos se adjuntan para cada elemento tres imágenes explicativas. Una primera imagen con la planta, la sección y el alzado cada arco en su contexto más inmediato, dónde se reflejan las cotas, distancias y geometría básicas de su forma final. Una segunda imagen tridimensional dónde se contextualiza el elemento dentro de la estructura global del proyecto con los ejes X, Y y Z bien marcados (serán la referencia de los datos de la tabla adjunta) y una última imagen de la individualización de la pieza estructural para visualizar exclusivamente cada componente con sus dimensiones principales.

FICHA: 1	
ARCO 1: Nave principal	AÑO: 1250
LOCALIZACIÓN: Arco de la nave central de Santa Magdalena de Vézelay en 1250

MASA (kg)	6.9201·p
VOLUMEN (m³)	6.9201
COORDENADAS DEL CUADRO DELIMITADOR (m)	
X: -4.8889 -- 4.8904	
Y: 13.0024 -- 18.1788	
Z: -0.5000 -- 0.5000	
COORDENADAS DEL CENTRO DE GRAVEDAD (m)	
X: -0.0000	
Y: 16.2308	
Z: 0.0000	
MOMENTOS DE INERCIA (kg·m²)	
X: 1839.9871·p	
Y: 84.6984·p	
Z: 1923.5321·p	
PRODUCTOS DE INERCIA (kg·m²)	
XY: 0.3126·p	
YZ: 0.0000·p	
ZX: 0.0000·p	
COORDENADAS DEL RADIO DE GIRO (m)	
X: 16.3061	
Y: 3.4985	
Z: 16.6722	
MOMENTOS PRINCIPALES (kg·m²) Y DIRECCIONES X-Y-Z ALREDEDOR DEL CENTRO DE GRAVEDAD (m)	
I: 16.9599·p a lo largo de [1.0000, 0.0004, 0.0000]	
J: 84.6984·p a lo largo de [-0.0004, 1.0000, 0.0000]	
K: 100.5049·p a lo largo de [0.0000, 0.0000, 1.0000]	

* Al ser un estudio geométrico, los datos tienen una dimensión dependiente de la variable p, que corresponde con la densidad del material en kg/m³.

FICHA: 2	
ARCO 2: Nave Lateral	AÑO: 1250
LOCALIZACIÓN: Arco de la nave lateral de Santa Magdalena de Vézelay en 1250

MASA (kg)	2.7635·ρ
VOLUMEN (m³)	2.7635
COORDENADAS DEL CUADRO DELIMITADOR (m)	
X: 6.2489 -- 11.5525	
Y: 5.1950 -- 8.0896	
Z: -0.5000 -- 0.5000	
COORDENADAS DEL CENTRO DE GRAVEDAD (m)	
X: 8.9007	
Y: 6.9105	
Z: 0.0000	
MOMENTOS DE INERCIA (kg·m²)	
X: 134.1687·ρ	
Y: 228.1227·ρ	
Z: 361.8309·ρ	
PRODUCTOS DE INERCIA (kg·m²)	
XY: -169.9798·ρ	
YZ: 0.0000·ρ	
ZX: 0.0000·ρ	
COORDENADAS DEL RADIO DE GIRO (m)	
X: 6.9678	
Y: 9.0856	
Z: 11.4426	
MOMENTOS PRINCIPALES (kg·m²) Y DIRECCIONES X-Y-Z ALREDEDOR DEL CENTRO DE GRAVEDAD (m)	
I: 2.1960·ρ a lo largo de [1.0000, 0.0000, 0.0000]	
J: 9.1902·ρ a lo largo de [0.0000, 1.0000, 0.0000]	
K: 10.9256·ρ a lo largo de [0.0000, 0.0000, 1.0000]	

* Al ser un estudio geométrico, los datos tienen una dimensión dependiente de la variable ρ, que corresponde con la densidad del material en kg/m³.

FICHA: 3	
ARCO 3: Arbotante	AÑO: 1250
LOCALIZACIÓN: Arco arbotante de Santa Magdalena de Vézelay en 1250

MASA (kg)	3.0084·ρ
VOLUMEN (m³)	3.0084
COORDENADAS DEL CUADRO DELIMITADOR (m)	
X: 6.7422 -- 11.4891	
Y: 9.8552 -- 14.9785	
Z: -0.5000 -- 0.5000	
COORDENADAS DEL CENTRO DE GRAVEDAD (m)	
X: 9.6576	
Y: 12.9585	
Z: 0.000	
MOMENTOS DE INERCIA (kg·m²)	
X: 512.1923·ρ	
Y: 286.7789·ρ	
Z: 798.4698·ρ	
PRODUCTOS DE INERCIA (kg·m²)	
XY: -370.7065·ρ	
YZ: 0.0000·ρ	
ZX: 0.0000·ρ	
COORDENADAS DEL RADIO DE GIRO (m)	
X: 13.0481	
Y: 9.7634	
Z: 16.2914	
MOMENTOS PRINCIPALES (kg·m²) Y DIRECCIONES X-Y-Z ALREDEDOR DEL CENTRO DE GRAVEDAD (m)	
I: 12.4047·ρ a lo largo de [0.7319, 0.6815, 0.0000]	
J: 0.7864·ρ a lo largo de [-0.6815, 0.7319, 0.0000]	
K: 12.6897·ρ a lo largo de [0.0000, 0.0000, 1.0000]	

* Al ser un estudio geométrico, los datos tienen una dimensión dependiente de la variable ρ, que corresponde con la densidad del material en kg/m³.

FICHA: 4	
ARCO 1: Nave principal	AÑO: 1840
LOCALIZACIÓN: Arco de la nave central de Santa Magdalena de Vézelay en 1840

MASA (kg)	11.3682·ρ
VOLUMEN (m³)	11.3682
COORDENADAS DEL CUADRO DELIMITADOR (m)	
	X: -5.2366 -- 5.2378
	Y:13.0026 -- 18.6825
	Z: -0.5000 -- 0.5000
COORDENADAS DEL CENTRO DE GRAVEDAD (m)	
	X: 0.0000
	Y:16.3797
	Z: 0.0000
MOMENTOS DE INERCIA (kg·m²)	
	X: 3082.1276·ρ
	Y: 144.7655·ρ
	Z: 3224.9984·ρ
PRODUCTOS DE INERCIA (kg·m²)	
	XY: -0.1164·ρ
	YZ: 0.0000·ρ
	ZX: 0.0000·ρ
COORDENADAS DEL RADIO DE GIRO (m)	
	X: 16.4657
	Y: 3.5685
	Z: 16.8430
MOMENTOS PRINCIPALES (kg·m²) Y DIRECCIONES X-Y-Z ALREDEDOR DEL CENTRO DE GRAVEDAD (m)	
	I: 32.1117·ρ a lo largo de [1.0000, 0.0000, 0.0000]
	J:144.7655·ρ a lo largo de [0.0000, 1.0000, 0.0000]
	K:174.9825·ρ a lo largo de [0.0000, 0.0000, 1.0000]

* Al ser un estudio geométrico, los datos tienen una dimensión dependiente de la variable ρ, que corresponde con la densidad del material en kg/m³.

FICHA: 5	
ARCO 2: Nave Lateral	AÑO: 1840
LOCALIZACIÓN: Arco de la nave lateral de Santa Magdalena de Vézelay en 1840

MASA (kg)	2.7476·ρ
VOLUMEN (m³)	2.7476
COORDENADAS DEL CUADRO DELIMITADOR (m)	
X: 6.2496 -- 11.5531	
Y: 5.1950 -- 8.0896	
Z: -0.5000 -- 0.5000	
COORDENADAS DEL CENTRO DE GRAVEDAD (m)	
X: 8.8877	
Y: 6.9160	
Z: 0.0000	
MOMENTOS DE INERCIA (kg·m²)	
X: 133.5961·ρ	
Y: 226.1476·ρ	
Z: 359.2858·ρ	
PRODUCTOS DE INERCIA (kg·m²)	
XY: -168.9178·ρ	
YZ: 0.0000·ρ	
ZX: 0.0000·ρ	
COORDENADAS DEL RADIO DE GIRO (m)	
X: 6.9730	
Y: 9.0724	
Z: 11.4352	
MOMENTOS PRINCIPALES (kg·m²) Y DIRECCIONES X-Y-Z ALREDEDOR DEL CENTRO DE GRAVEDAD (m)	
I: 2.1755·ρ a lo largo de [1.0000, 0.0043, 0.0000]	
J: 9.1112·ρ a lo largo de [-0.0043, 1.0000, 0.0000]	
K: 10.8287·ρ a lo largo de [0.0000, 0.0000, 1.0000]	

* Al ser un estudio geométrico, los datos tienen una dimensión dependiente de la variable ρ, que corresponde con la densidad del material en kg/m³.

FICHA: 6	
ARCO 3: Arbotante	AÑO: 1840
LOCALIZACIÓN: Arco arbotante de Santa Magdalena de Vézelay en 1840

MASA (kg)	5.6589·ρ
VOLUMEN (m³)	5.6589
COORDENADAS DEL CUADRO DELIMITADOR (m)	
X: 6.7582 -- 12.0234	
Y: 10.9746 -- 15.5472	
Z: -0.5000 -- 0.5000	
COORDENADAS DEL CENTRO DE GRAVEDAD (m)	
X: 9.6846	
Y: 13.6274	
Z: 0.0000	
MOMENTOS DE INERCIA (kg·m²)	
X: 1060.6465·ρ	
Y: 543.4284·ρ	
Z: 1603.1317·ρ	
PRODUCTOS DE INERCIA (kg·m²)	
XY: -737.1070·ρ	
YZ: 0.0000·ρ	
ZX: 0.0000·ρ	
COORDENADAS DEL RADIO DE GIRO (m)	
X: 13.6905	
Y: 9.7996	
Z: 16.8314	
MOMENTOS PRINCIPALES (kg·m²) Y DIRECCIONES X-Y-Z ALREDEDOR DEL CENTRO DE GRAVEDAD (m)	
I: 1.3842·ρ a lo largo de [0.7577, -0.6526, 0.0000]	
J: 21.0531·ρ a lo largo de [0.6526, 0.7577, 0.0000]	
K: 21.4941·ρ a lo largo de [0.0000, 0.0000, 1.0000]	

* Al ser un estudio geométrico, los datos tienen una dimensión dependiente de la variable ρ, que corresponde con la densidad del material en kg/m³.

FICHA: 7	
ARCO 1: Nave principal	AÑO: 1868
LOCALIZACIÓN: Arco de la nave central de Santa Magdalena de Vézelay en 1868. Hipótesis de Viollet le Duc.

MASA (kg)	9.5562·p
VOLUMEN (m³)	9.5562
COORDENADAS DEL CUADRO DELIMITADOR (m)	
X: -5.0732 -- 5.0732	
Y: 13.5078 -- 20.2726	
Z: 0.5000 -- 0.5000	
COORDENADAS DEL CENTRO DE GRAVEDAD (m)	
X: 0.0000	
Y: 17.3063	
Z: 0.0000	
MOMENTOS DE INERCIA (kg·m²)	
X: 2899.3572·p	
Y: 117.3808·p	
Z: 3015.1453·p	
PRODUCTOS DE INERCIA (kg·m²)	
XY: -0.4049·p	
YZ: 0.0000·p	
ZX: 0.0000·p	
COORDENADAS DEL RADIO DE GIRO (m)	
X: 17.4184	
Y: 3.5047	
Z: 17.7628	
MOMENTOS PRINCIPALES (kg·m²) Y DIRECCIONES X-Y-Z ALREDEDOR DEL CENTRO DE GRAVEDAD (m)	
I: 37.2019·p a lo largo de [1.0000 0.0014 0.0000]	
J: 117.3809·p a lo largo de [-0.0014 1.0000 0.0000]	
K: 152.9901·p a lo largo de [0.0000 0.0000 1.0000]	

* Al ser un estudio geométrico, los datos tienen una dimensión dependiente de la variable p, que corresponde con la densidad del material en kg/m³.

FICHA: 8	
ARCO 2: Nave Lateral	AÑO: 1868
LOCALIZACIÓN: Arco de la nave lateral de Santa Magdalena de Vézelay en 1868. Hipótesis de Viollet le Duc.

MASA (kg)	5.4437·p
VOLUMEN (m³)	5.4437
COORDENADAS DEL CUADRO DELIMITADOR (m)	
	X:6.0408 -- 11.7682
	Y: 5.6950 -- 9.8036
	Z:-0.5000 -- 0.5000
COORDENADAS DEL CENTRO DE GRAVEDAD (m)	
	X: 8.9038
	Y: 7.8857
	Z: 0.0000
MOMENTOS DE INERCIA (kg·m²)	
	X: 346.1420·p
	Y: 451.4120·p
	Z: 796.6468·p
PRODUCTOS DE INERCIA (kg·m²)	
	XY: 382.2178·p
	YZ: 0.0000·p
	ZX: 0.0000·p
COORDENADAS DEL RADIO DE GIRO (m)	
	X: 7.9741
	Y: 9.1062
	Z:12.0972
MOMENTOS PRINCIPALES (kg·m²) Y DIRECCIONES X-Y-Z ALREDEDOR DEL CENTRO DE GRAVEDAD (m)	
	I: 7.6291·p a lo largo de [1.0000,-0.0001, 0.0000]
	J: 19.8450·p a lo largo de [0.0001, 1.0000, 0.0000]
	K: 26.5668·p a lo largo de [0.0000, 0.0000, 1.0000]

* Al ser un estudio geométrico, los datos tienen una dimensión dependiente de la variable p, que corresponde con la densidad del material en kg/m³.

FICHA: 9	
ARCO 3: Arbotante	AÑO: 1868
LOCALIZACIÓN: Arco arbotante de Santa Magdalena de Vézelay en 1868. Hipótesis de Viollet le Duc.

MASA (kg)	4.7859·ρ
VOLUMEN (m³)	4.7859
COORDENADAS DEL CUADRO DELIMITADOR (m)	
	X: 6.7913 -- 11.8354
	Y: 9.9404 -- 15.9927
	Z: -0.5000 -- 0.5000
COORDENADAS DEL CENTRO DE GRAVEDAD (m)	
	X: 9.8469
	Y: 13.2813
	Z: 0.0000
MOMENTOS DE INERCIA (kg·m²)	
	X: 859.1374·ρ
	Y: 474.2581·ρ
	Z: 1332.5979·ρ
PRODUCTOS DE INERCIA (kg·m²)	
	XY: 614.7484·ρ
	YZ: 0.0000·ρ
	ZX: 0.0000·ρ
COORDENADAS DEL RADIO DE GIRO (m)	
	X: 13.3983
	Y: 9.9547
	Z: 16.6867
MOMENTOS PRINCIPALES (kg·m²) Y DIRECCIONES X-Y-Z ALREDEDOR DEL CENTRO DE GRAVEDAD (m)	
	I: 23.9704·ρ a lo largo de [0.7769, 0.6296, 0.0000]
	J: 1.1873·ρ a lo largo de [-0.6296, 0.7769, 0.0000]
	K: 24.3601·ρ a lo largo de [0.0000, 0.0000, 1.0000]

* Al ser un estudio geométrico, los datos tienen una dimensión dependiente de la variable ρ, que corresponde con la densidad del material en kg/m³.

2.7. ESTUDIO COMPARATIVO DE CENTROS DE GRAVEDAD Y LÍNEAS DE EMPUJE DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA ABADÍA DE SANTA MAGDALENA DE VÉZELAY. 1250, 1840 Y 1868.

Con el fin de exponer la hipótesis de distribución tensional en función de las estereotomías posibles de las fábricas, y apoyándose en el análisis geométrico anterior, se ha desarrollado un trabajo comparativo de las líneas de empuje combinadas con la modificación de centros de gravedad que cada cambio de modelo constructivo ha constituido para cada arco de la sección principal de la Abadía de Santa Magdalena de Vézelay.

Este estudio se divide en dos partes para cada pieza estructural, una primera parte que consiste en la contextualización constructiva de cada fase histórica del arco; la primera fase corresponde al proyecto original ejecutado en 1250, la segunda a la reconstrucción llevada a cabo por Viollet Le Duc en 1840 y la última es la hipótesis ideal de reconstrucción planteada por el mismo arquitecto a modo teórico en la publicación de su “Diccionario razonado de la arquitectura” en 1868. En la segunda parte del estudio se hace el análisis de la geometría de un comportamiento natural de la suspensión en la catenaria en cada fase, es decir, se superponen las líneas de empuje de cada fase y se analizan las diferencias geométricas en el centro de gravedad de cada pieza que vienen dadas por la variación del modelo constructivo de cada época.

01 Comparativa entre líneas de empujes y centros de gravedad referentes a la nave central de Santa Magdalena de Vézelay en los años 1250 (fecha de la construcción original) 1840 (fecha de la reconstrucción de Viollet Le Duc) 1868 (fecha del cálculo gráfico teórico de Viollet le Duc para su Diccionario Razonado).

02 Comparativa entre líneas de empujes y centros de gravedad referentes a la nave lateral de Santa Magdalena de Vézelay en los años 1250 (fecha de la construcción original) 1840 (fecha de la reconstrucción de Viollet Le Duc) 1868 (fecha del cálculo gráfico teórico de Viollet le Duc para su Diccionario Razonado).

03 Comparativa entre líneas de empujes y centros de gravedad referentes a los arbotantes de Santa Magdalena de Vézelay en los años 1250 (fecha de la construcción original) 1840 (fecha de la reconstrucción de Viollet Le Duc) 1868 (fecha del cálculo gráfico teórico de Viollet le Duc para su Diccionario Razonado).

3

LA INFLUENCIA DEL COMIENZO DE LA INGENIERÍA EN LA PRÁCTICA DE LA ARQUITECTURA

3.1. LA EXISTENTE Y EXTENDIDA EXIGENCIA DE UNA NUEVA ARQUITECTURA ENTRE 1842 Y 1851

Fue el profesor Thomas Leerton Donaldson (1795-1885)¹, arquitecto británico y co-fundador y presidente de la Royal Institute of British Architect (R. I. B. A.), el que en el discurso inaugural de su cátedra en 1842 en la Universidad de Arquitectura de Londres criticó duramente la situación de la arquitectura contemporánea en su tiempo.

A partir de este acto público de llamada hacia una nueva arquitectura, se sucede la búsqueda de un nuevo estilo acorde con los progresos tecnológicos que se están desarrollando en ese momento. A esta declaración tan relevante por la influencia directa que tiene sobre la formación de los nuevos arquitectos, se

¹ Thomas Leverton Donaldson (1795-1885) fue pionero no sólo como fundador de la revista que nos va a ocupar en el texto sino que además fue el primer profesor de arquitectura de la University College of London desde 1841 hasta 1865). En 1879 fue descrito por el Príncipe de Gales como “el padre de la Institución (R.I.B.A.) y de la profesión (la arquitectura)”.

"A recurrence to first principles was never more essential than at this moment. For not only our own school, but those of our continental neighbours, have reached a most critical period. We are all, in fact, in a state of transition. There is no fixed style now prevalent here or at Paris, at Munich or Berlin. There is no predominant predilection nor acknowledged reason for adopting any one of the old styles of art. We are wandering in a labyrinth of experiments, and trying by an amalgamation of certain features, in this or that style, of every period and country, to form a homogeneous whole with some distinctive character of its own, for the purpose of working it out into its fullest development, and thus creating a new and peculiar style. This movement has placed the schools of all countries in a state of great uncertainty; as yet we have no fine leading principle as a guiding star."

Fig. 1. Extracto del artículo publicado por la revista "the Builder" en su primer número (1842 pg 36)

le suman muchas más voces. La revista *The Builder*², en 1843, en el número de inauguración, anuncia los signos de una nueva época y sobre todo explica por qué se considera la defunción de cada una de los estilos clásicos. Se hace consciente a todos los arquitectos, incluso a los ingenieros de un estado de transición.(Fig. 1)

3.1.1. La valorización del patrimonio arquitectónico: los monumentos

Es notable la relación que existe entre la búsqueda de una nueva arquitectura y el comienzo de la revalorización del patrimonio, que hasta ahora solo había servido para su estudio geométrico o histórico y cuyo estudio nunca había supuesto un cambio radical de conceptos arquitectónicos.

Es en esta época cuando empieza a concebirse el edificio como documento de una época; es, posiblemente, gracias a los monumentos medievales que los arquitectos de la época comprendieron y estudiaron las estructuras y aplicaron el cálculo estructural para las consolidaciones y reconstrucciones.

A partir de 1750, existe una evolución sobre el concepto de la ruina, que será la base de lo que más adelante se convertirá en el nuevo concepto de modelo. Hasta bien entrado el siglo XVIII, los arquitectos consideraban las ruinas una colección de fragmentos tectónicos almacenados ideales para reaprovechar en sus proyectos, aunque también se valoraban como objetos de estudio, entre otras cosas gracias a los textos de Vitruvio, que servían de guía en la catalogación y la valoración de los mismos de manera individual. Hay muchos ejemplos de proyectos de reutilización del material de las ruinas para proyectos del XVIII; un ejemplo de ello es cómo Camilo Rusconi³ en 1725 utilizó las piezas de mármol del

2 *The Builder* es una publicación mensual publicada en Londres desde el 31 de Diciembre de 1842, de ahí que podamos encontrar posibles alusiones a su comienzo en 1843.

3 Camillo Rusconi (1658-1728) escultor italiano centrado mayoritariamente en la realización de obras de estuco, pero teniendo grandes esculturas de mármol. Tuvo influencia internacional, por ejemplo en España es suyo el relieve de la Apoteosis de san Juan Francisco de Regis que corona el actual altar mayor del monasterio de las Descalzas Reales de Madrid, labrado por encargo de Felipe V en 1716.

Fig. 2. Vista de la Crescenza. Claude Lorrain. 1650. Imagen del Metropolitan Museum of Art.

mausoleo de Adriano para ejecutar su obra de la capilla de Gregorio XIII dentro de la basílica de San Pedro y así mantenerse dentro del presupuesto prometido. Estos gestos determinan que el sentimentalismo de las ruinas romanas y, por supuesto, de las obras arquitectónicas realizadas en estilos anteriores fue muy posterior al comienzo de siglo. El Reuso, como lo conocemos ahora, no existía y era más bien un concepto de reciclaje.

Después de esto y a raíz de varias cosas, comienza una época en que las ruinas empiezan a considerarse como elementos bellos; se les da un aire melancólico y se las liga a la naturaleza. Es cierto que las ruinas romanas se valoraban como parte de la naturaleza o como un «decorado» idóneo para fomentar el paisajismo, como se puede apreciar, por ejemplo, en las pinturas de Lorrain y Poussin, y precisamente por la influencia tan fuerte que produjo esta corriente pictórica Ruskin aseguró en 1856 en el tercer volumen de su tratado *Los pintores modernos: (Fig.2)*

«Que yo conozca no existe en el mundo un solo ejemplo de buena pintura histórica;... producirla es una tarea que el final del siglo XIX bien puede proponerse». Con afirmaciones de este tipo y a lo largo de su tratado, Ruskin identifica el fracaso de la pintura histórica con la dedicación hacia lo que llama «el instinto paisajista» y que condena a las ruinas a tomar su valor como parte del paisaje.

En realidad, Ruskin exagera, ya que a mediados del s. XVIII ya se intuye un cambio de concepto del valor del monumento como tal, no como una ruina parte del paisaje; por ejemplo, Lord Kames (Henry Homes 1696-1782)⁴ escribe en 1756 en sus *Elements of Criticism*:

«La belleza del efecto, por una transición sencilla de ideas, se transfiere a la causa; y se percibe como una cualidad. Por lo tanto, la belleza intrínseca aparece por su utilidad; una torre gótica, que no tiene por qué ser bella por sí misma, se

⁴ Henry Home, Lord Kames (1696-1782) fue un filósofo escocés. Aunque no escribió sobre arquitectura o arte directamente, sí que tanto en *Introduction to the art of thinking* (1761) como en *Elements of Criticism* (1762) asentó las bases de un nuevo pensamiento que afectó a la interpretación de la arquitectura en años posteriores.

Fig. 3. Ejemplo de estudio geométrico aplicado a Patrimonio realizado por Viollet Le Duc.1854.

muestra bella si se considera como apropiada para la defensa contra el enemigo; (...) y la falta de forma o la simetría de un árbol no impedirá que sea hermoso si sabemos que produce un buen fruto».

Con esta afirmación, no solo se refiere a la belleza de la utilidad, sino que especifica que dicha belleza puede encontrarse en una torre gótica si esta estaba diseñada y ejecutada para mantener su función de defensa, es decir, habría que estudiarla históricamente y arquitectónicamente como documento en sí mismo⁵. Es importante ver la diferencia del punto de vista, detectar el pequeño cambio de visión respecto a la arquitectura del pasado. (Fig.3)

3.1.2. El trabajo en equipo en la restauración

Cuando Walter Gropius (1883-1969) insistía en la colaboración como la base de la arquitectura del Bauhaus, no era ni mucho menos el primero que hacía esta reflexión. De hecho, fue Fergusson casi cincuenta años antes (1808-1886) el que ya afirmaba que la colaboración en la arquitectura era necesaria y como ejemplo ponía una catedral medieval; decía: «En la realización de un barco moderno participan millones de cerebros de todos los calibres. Nadie sabe ni se preocupa de quién lo hizo, como nadie sabía ni se preocupaba de quién construía las grandes catedrales medievales».

Aunque es verdad que el concepto de ciencia frontera se aplica al patrimonio realmente tarde, también es cierto que desde casi los principios de la valorización del patrimonio se consideraba un trabajo en el que debía incluirse a mucha gente, dependiendo de un arquitecto, sí, pero no solo y exclusivamente; él debía tener los conocimientos de todo. Fue Viollet Le Duc (1814-1879) el que aseguraba en el prólogo de su *Diccionario razonado de la arquitectura francesa desde el s. XI al s. XVI*, una obra dedicada exclusivamente a analizar y a los estudiar la arquitectura

5 Aunque el concepto de monumento como documento es moderno o incluso contemporáneo, es cierto que interpretaciones de estas teorías fueron el germen de este nuevo concepto sobre patrimonio.

Fig. 4. Estudios de Viollet Le Duc de Notre Dame de París. Imagen de su Diccionario razonado de Arquitectura Francesa entre s.XI y s.XVI (1854-1868).

medieval como documentos constructivos de su época, lo siguiente: «La vida de un hombre no es lo suficientemente larga como para permitir que un arquitecto pueda absorber la totalidad de un trabajo que es a la vez intelectual y material. Un arquitecto solo puede ser parte de un todo; empieza lo que otros acabarán o acaba lo que otros han empezado, pero no puede trabajar aislado, pues su trabajo no es un hecho puntual como una pintura o un poema»⁶. Lo realmente importante de esta idea es que, al contrario que Fergusson⁷, vincula directamente la idea de restauración o reconstrucción con un trabajo intelectual, no solo material o proyectual del arquitecto, sino que se basa en un esfuerzo de análisis y estudio que aportará conocimiento nuevo basándose en los «documentos» del pasado. (Fig.4)

6 De nuevo vemos en estas afirmaciones conceptos modernos o contemporáneos sobre, en este caso, la idea de la profesión de la arquitectura que no llegarán a madurar hasta mucho más adelante pero que, como queda patente, tuvieron su primer nacimiento en esta época.

7 James Fergusson (1808-1886). Arquitecto e historiador. Escribió en 1855 *Concise and Popular Account of the different Styles of Architecture prevailing in all Ages and Countries* que fueron dos volúmenes que completó más adelante en 1862 con *A History of the Modern Styles of Architecture*. Entre su extensa obra cabe destacar, para esta referencia, la dedicada expresamente a la restauración como es *Palaces of Nineveh and Persepolis restored* (1851) o *Mausoleum at Halicarnassus restored* (1862). Por último señalar que en 1856 Fergusson fue consejero general de la Crystal Palace Company y que en 1886 fue miembro del comité que aconsejó a Henry Scott en aspectos de diseño del Royal Albert Hall, junto con los arquitectos William Tite y Matthew Digby Wyatt, y los ingenieros John Hawkshaw y John Fowler.

Fig. 5. Ejemplo de valorización y Divulgación de Patrimonio, en este caso Helenístico. Imagen de la revista francesa “Revue Générale de l’architecture” del volumen 11 del año 1842.

Fig. 6. Sección transversal del proyecto de la estación de tren de Versailles. El modelo escogido de sección recuerda a una iglesia de tres naves clásica a pesar del nuevo uso que se le quiere dar al espacio y a la ligereza de la sección por el uso de nuevos materiales. . Imagen de la revista francesa “Revue Générale de l’architecture” del volumen 3 del año 1841.

3.1.3. Consecuencias de esta exigencia

Como resultado de esta parte de la investigación, sacamos varias conclusiones. En primer lugar, la exigencia de una nueva arquitectura era algo que estaba presente en todos los ámbitos de la arquitectura (críticos, docentes, teóricos...). Todos los relacionados con la arquitectura de un modo u otro exigían una nueva arquitectura; en realidad, ya había llegado, los avances se habían impuesto y los nuevos espacios ya se estaban construyendo, así que lo que de verdad se necesitaba y lo que todos buscaban no era una nueva arquitectura en sí, sino un nuevo criterio para solucionar los problemas derivados del uso de antiguos modelos para nuevas necesidades. (Fig.5)

Por otro lado, comienza una época de valorización del patrimonio, no solo como parte de la naturaleza, sino como posibles documentos arquitectónicos que serán especialmente útiles para dar respuesta al concepto de Reuso, que empieza a implantarse precisamente por esta valorización derivada del conocimiento.

Por último, esta situación de incertidumbre, donde tantos cambios son requeridos y tan rápidamente, inicia una conciencia global de trabajo colaborativo. Hasta ahora, se esperaba del arquitecto que llevase la carga de todo el trabajo; a partir de ahora, se empieza a plantear un arquitecto que organiza un posible equipo de trabajadores de más nivel, ya que se entiende que con el patrimonio no solo se ha de hacer un trabajo proyectual, sino que va unido directamente a un trabajo intelectual que también debe depender necesariamente del arquitecto.

En resumen, la unión de estas circunstancias hace de la época comprendida entre los años 1842 y 1851 una época realmente interesante para el patrimonio y, sobre todo, estos años son la base del nuevo concepto de Reuso como lo entendemos ahora, a pesar de que todavía tendrá que variar enormemente el «respeto» y el «proyecto» de los arquitectos frente a su pasado. (Fig.6)

Fig. 7. Galeria de Orleans. Sistema arquitectónico de hierro y cristal para Estructuras abovedadas. Fontaine y Rohault, Orleans, Francia en 1829

Fig. 8. Pabellón del Jardín de las Plantas, Sistema arquitectónico de hierro y cristal para Estructuras abovedadas. Fontaine y Rohault, París, Francia en 1834-1836

3.2. PRIMERAS EXPRESIONES DE LA INFLUENCIA DE LA TÉCNICA EN LA ARQUITECTURA

Ya en los primeros tiempos de la construcción de hierro, Francia ha disputado a los ingleses el primer lugar en estas tendencias. Las primeras armaduras de cubierta de hierro aparecieron en Francia antes que los puentes de fundición en Inglaterra; con las estructuras abovedadas de hierro y cristal de la Galerie D'Orleans (1829) (Fig.7) y del pabellón del Jardín des Plantes (1834-1836) (Fig.8) , Fontaine⁸ y Rohault⁹ crearon un sistema fundamentalmente nuevo para la arquitectura del siglo XIX, mucho antes de que estos avances se tradujeran a la arquitectura inglesa.

Es cierto que fue en Inglaterra donde se gestó la Revolución Industrial; fue en 1720 cuando Abraham Darby consiguió obtener el hierro por fundición con coque y con ello la obtención del hierro de primera fusión en grandes masas. Después de varias mejoras punteras en el proceso de fundición y fabricación, se consigue a mediados del s. XVIII planchas de hierro laminadas; esto evolucionará durante los próximos cincuenta años hasta los raíles de ferrocarril en 1830, que serán los precursores de las vigas en T en Inglaterra y más adelante de doble T en Francia, que cambiarán el concepto estructural de la arquitectura y la ingeniería durante el s. XIX.

8 Pierre-François-Léonard Fontaine (1762-1853). Arquitecto francés que tuvo una línea muy clásica en su obra construida, pero que trabajó en grandes proyectos de restauración en Francia como por ejemplo el proyecto de restauración del Castillo de Chambord. Se alejó de su natural línea, aunque influyó en una composición eminentemente clásica, en el proyecto que alude el texto.

9 Charles Rohault de Fleury (1801-1875). Arquitecto francés con gran influencia de Roma y de la arquitectura italiana, entre sus escritos destacan *Manuel des lois du bâtiment* de 1862 y *Monuments de Pise au Moyen Âge* de 1866. Sin embargo su obra construida fue más innovadora que su aportación teórica en la combinación de tradición y tecnología, suyo fue un tempranísimo ejemplo de la arquitectura francesa de hierro y cristal, *The Mexican Hothouse*, built de los años 1834-1836 y más adelante, en esta línea, junto con el arquitecto Alfred Armand (1805-1888) el *Grand Hôtel du Louvre* construido en 1855.

Fig. 9. Cubierta del Teatro Francés de París. Sección transversal por la cúpula acristalada, unos de los primeros avances en el campo de la protección anti-incendios, por Victor Louis en París en 1786

A pesar de que Inglaterra estaba en este auge tecnológico, Francia fue el primer país que tuvo claro desde un principio que el descubrimiento de Abraham Darby supondría un auténtico adelanto; de hecho, comprendió que la posibilidad de tener un nuevo material resistente y en grandes masas daba la oportunidad de cambiar de escala y así lo intentó en 1755, con una fracasada tentativa de construir un puente de hierro fundido sobre el río Rin, veinte años antes de que lo consiguiera Inglaterra a través del río Severn. Esto demuestra que Francia con su pensamiento constructivo y su espíritu racionalista fue pionero en su nueva concepción de la arquitectura moderna.

Tan pronto como el hierro fue fácilmente asequible en gran cantidad, se pensó que el uso de este material en grandes estructuras podía evitar los grandes incendios que colapsaban las estructuras de madera en cuestión de minutos. Un primer adelanto en este sentido se llevó a cabo en la cubierta del Teatro Francés en París (*Fig.9*) , que fue diseñada con gran osadía en 1786 por el arquitecto francés Victor Louis (1731-1800)¹⁰. La cubierta era una estructura de hierro sujeta por paredes extremadamente ligeras; la forma de sus armaduras apuntaba ya un conocimiento instintivo de los momentos de inercia y del trabajo de fuerzas que será, probablemente, el inicio de la arquitectura de esqueleto.

¹⁰ Victor Louis (1731-1800). Arquitecto francés que diseñó y ejecutó muchos de los grandes teatros de la época como fueron, además del alusivo en el texto, el Gran Teatro de Burdeos en 1780 o el Teatro Nacional de la calle de la Loi en 1793. La experiencia en grandes cubiertas y grandes luces dieron a este arquitecto una gran osadía a la hora de utilizar los nuevos materiales.

Fig. 10. Grabado de cabecera principal en el primer número de la revista “Revue Générale de l’architecture et des Travaux Publics”, Francia. Editada y dirigida por César Daly. 1840.

Fig. 11. Puente sobre el río James. Alzado y Sección longitudinales. Diseñado por M. Michel Chevalier situado en Richmond, Virginia. 1840

3.3. ORÍGENES DE LA RELACIÓN ENTRE ARQUITECTURA E INGENIERÍA EN FRANCIA

La teoría de base científica que a mediados del s. XIX quiso aprovechar todos los avances tecnológicos que se habían desarrollado empezó sobre todo en Francia. La aparición de revistas científicas revolucionó la divulgación de las distintas teorías y facilitó enormemente la difusión y la puesta en práctica de dichas teorías en distintos países, sobre todo en Inglaterra.

En 1840, nace la publicación de la revista *Revue générale de l'architecture*, (Fig.10) , que es la primera encargada de anunciar las nuevas teorías basadas en cálculos. En su primer año de edición, su editor, César Daly¹¹, comienza por explicar y defender la teoría de puentes suspendidos; para ello, divide el texto en secciones que a su vez están divididas en capítulos; por otro lado, la parte teórica viene reforzada por el estudio y los análisis técnicos de obras ejecutadas; en el caso del primer número, el puente que apoya la teoría es el Pont sur le James-river, en Richmond, Virgina (Fig.11) con este ejemplo, Daly quiere plasmar dos cosas: una, que su revista es internacional, que pretende englobar el conocimiento universal y, por otro lado, gran parte de los artículos que se escriben en la revista se dedican a la historia de la arquitectura y al estilo exhaustivo de los estilos, lo que hace de esta publicación una gran fuente de conocimiento histórico y fuente de inspiración «neo» de su época.

En las relaciones entre ingeniero y arquitecto, Francia siempre ha sido un país pionero; no en vano, uno de los primeros edificios en que un arquitecto y un ingeniero trabajaron conjuntamente, pero con competencias distintas y distintas

¹¹ César Denis Daly (1811-1894). Arquitecto francés, alumno y discípulo de Félix Duban (1798-1870). Fue precursor de Viollet Le Duc como arquitecto restaurador. Fue, sobre todo, un arquitecto tremendamente influyente en lo que a divulgación y posición se refiere. Funda en 1848 la “Société d’artistes décorateurs et industriels”, fue el secretario de la “Société centrale des architectes”, propietario, fundador y editor de las publicaciones “Revue Générale de l’architecture et des travaux publics” entre los años 1840 y 1888 y “La Semaine des constructeurs” entre los años 1877 y 1895.

Fig. 12. Granero de París. Fotografía dónde se aprecian la sustitución de la antigua estructura de madera de la cúpula por nervios de hierro y cobre según el diseño de Bellangé y Brunet en París 1811-1820 por Bellangé.

responsabilidades, fue en la cúpula del «Granero» de París en 1811 (Fig.12) donde la antigua estructura de madera del mercado que cubría el patio circular fue destruida por el fuego en 1802; el arquitecto Bélanger¹² junto con el ingeniero Brunet construyeron en 1811 una adaptación de los métodos antiguos al nuevo material, sustituyendo las vigas de madera por una estructura de nervios de hierro y cobre.

También fue cerca de París, donde se construyó el primer edificio concebido como un esqueleto y ejecutado enteramente con estructura metálica: fue la fábrica de chocolate Menier (Fig.13), en Noisiel-sur-Marne, por Julio Saulnier¹³ entre

- 12 François-Joseph Bélanger (1744-1818). Arquitecto francés que estudia en la Real Academia de Arquitectura de París, estuvo cerca de la corte llegando a ser el arquitecto personal del hermano del Rey Luis XVI. Fue uno de los pocos arquitectos de la época que no tuvo influencia directa de Italia, ya que no realizó el viaje de estudios por aquel país, esto le hizo tener una visión algo distinta del uso de las tecnologías en la arquitectura que se ven claramente en su obra de reconstrucción aludida en el texto.
- 13 Jules Saulnier (1817-1881). Arquitecto francés. No fue un arquitecto especialmente prolífico, pero el proyecto de la Fábrica de Chocolate Menier fue destacado en 1997 como “uno de los edificios icono de la revolución industrial” en la publicación especializada *Architectural Review*.

Fig. 13. Fábrica de Chocolate “Menier”, Fotografía de la estructura metálica de la sala principal. Diseño de Saulnier. En Noisiel-sur-Marne, Francia en 1871-1872.

Fig. 14. Puente Neuilly sobre el Sena. Grabado de los trabajos sobre el puente. Vista principal. diseño de Rodolphe Perronet en Neuilly-sur-Seine, Francia en 1768-1772.

1871 y 1872. Fue el primer edificio cuyos muros exteriores de ladrillo tienen una función meramente envolvente y donde todas las líneas de carga se reflejan con estructura metálica, minimizando la estructura y funcionando esta como un todo único; así, la estructura incluye, por primera vez, cimientos, vigas riostras, pilares y vigas, todos metálicos y todos con una función concreta, conocida y calculada.

De hecho, fue en París también donde por primera vez, en 1747, se estableció una escuela de ingenieros civiles (École des Ponts et Chaussées)¹⁴, y en Mézières, una de ingenieros militares en 1748¹⁵, casi 100 años antes del proyecto de Viollet Le Duc en Vézelay. Así podemos suponer que existía ya en Francia una conciencia clara de disciplinas, si no separadas, sí al menos complementarias y distintas. Antes de 1750, antes de la creación de estas escuelas oficiales de ingenieros, los puentes estaban considerados una derivación del problema de bóvedas; de ahí que los arquitectos estuviesen encargados del diseño y construcción de los mismos, hasta que Rodolphe Perronet (1708-1794)¹⁶, organizador de la escuela de ingeniería civil y director de la École des Ponts et Chaussées comprendió que no eran suficientes las reglas y tablas aplicadas al dimensionamiento, sino que se necesitaba un método científico y cálculos basados en la mecánica y la resistencia de materiales; con esta teoría de cálculo realizó el primer puente, cuyo despiece está basado íntegramente en principios científicos, el puente en Neuilly sobre el Sena entre 1768 y 1772 (Fig. 14), y gracias a eso pudo reducir a una décima parte sus pilares, dejando un camino abierto, que se recorrerá en el

14 Creada en 1747 por Daniel-Charles Trudaine (1703-1769) bajo el nombre de “École royale des ponts et chaussées”. En 1775 se le cambió el nombre por el de “École nationale des ponts et chaussées”, puede verse con este último nombre referida en otros textos.

15 Llamada “École royale du génie de Mézières” se fundó en 1748 por el Conde D’Argenson y Nicolas de Chastillon. La primera formación de ingenieros incluía una fuerte educación en matemáticas y química, de hecho esta escuela fue el lugar de estudios de grandes científicos (no ingenieros propiamente dichos) como son Pierre-Simon Laplace, Charles Étienne Louis Camus, Étienne Bézout, Sylvestre François Lacroix, Siméon o Denis Poisson, Gaspard Monge.

16 Jean-Rodolphe Perronet (1708-1794). Arquitecto francés especializado en diseño y construcción de puentes, fue un destacado estructuralista del momento. De hecho realizó unas tablas de cálculo de arcos en puentes que fueron utilizadas por arquitectos e ingenieros durante casi todo el siglo.

Fig. 15. Abadía de Santa Magdalena de Vézelay. Grabado de la Fachada principal en el estado previo a las obras de restauración dirigidas por Viollet Le Duc. 1840.

siglo siguiente, sobre el uso de las matemáticas y el análisis de esfuerzos en la aplicación práctica de los puentes. Es difícil entender cómo el diseño de puentes pasó a ser competencia casi exclusiva de los ingenieros y de la ingeniería; por una parte, Perronet, a pesar de ser arquitecto, divulgó sus conocimientos y teorías en las escuelas de ingeniería, creando así un caldo de cultivo muy distinto al que se estaba instaurando en las escuelas de arquitectura, más ligadas a las universidades de historia y bellas artes. Por otra parte, los ingenieros junto con los matemáticos supieron obtener muy pronto una aplicación directa a estas nuevas técnicas; por ejemplo, fue un ingeniero civil, junto con tres matemáticos¹⁷, el primero en estudiar científicamente la estructura de la cúpula de San Pedro de Roma como resultado de dudas estructurales acerca de su estabilidad.

Es lógico pensar que cuando Viollet Le Duc acomete la obra de la abadía de Vézelay en 1836, conoce perfectamente los avances de los que su propio país es protagonista. (Fig.15)

17 Fue el Papa Benedicto XIV quien, ante los daños evidentes de la cúpula, decide acudir a tres prestigiosos matemáticos, Francesco Jacquier, Tommaso Le Seur y Ruggiero Giuseppe Boscovich, que en 1743 escriben un informe acerca del problema de estabilidad. El título de dicho informe es: *Parere di tre matematici sopra i danni, che ji fono trovati nella cupo la di S. Pietro, sul fine del' Anno MDCCXLII*. El ingeniero al que se refiere el texto es Giovanni Poleni (1683-1761) que aunque no firma el informe fue el que prescribe la ejecución de zunchos de atado en la cúpula y se encarga de documentar, en 1748, la obra de la cúpula y su restauración en el texto: *Memorie Istoriche delta Gran Cupola del Tempio Vaticano, e de danni di essa, e de ristoramenti loro*.

Fig. 16. Puente Menai. Vista general de la estructura suspendida diseñada por Telford. Inglaterra. 1826,

Fig. 17. Puente Britannia. Vista general de la estructura de "viga cajón" diseñada por Stephenson. Inglaterra. 1846.

3.4. ANÁLISIS SEGÚN LAS PUBLICACIONES PERIÓDICAS EN FRANCIA E INGLATERRA

En 1840, en el primer número de la *Revue générale*, se publica en Francia la teoría de puentes suspendidos. Pudiera parecer que esta teoría llega tarde, teniendo en cuenta que es en 1826 cuando Telford¹⁸ inaugura el Menai Bridge en Inglaterra (*Fig. 16*), , como uno de los primeros puentes colgantes con una solución de este tipo. Aunque si analizamos en su contexto, es verdad que el cálculo estricto de este tipo de puentes no estaba todavía controlado; de hecho, el Menai Bridge llegó a colapsarse en dos ocasiones y fue el propio Stephenson¹⁹ en 1846 el que denegó la propuesta para usar esta tipología de puente colgante cuando se le encarga el Britannia Bridge (*Fig. 17*), donde plantea la estructura como una gran viga cajón utilizada por el interior, alejándose de la teoría colgante que había causado problemas unos años antes en la misma localización. (*Fig. 18*) y (*Fig. 19*) .

Los arquitectos e ingenieros ingleses siguen aventurándose con la práctica antes de que la teoría y el cálculo les ofrezca una base científica sólida. Roebling es, sin duda alguna, pionero en el diseño de puentes colgantes. Fue en 1840

18 Thomas Telford (1757-1834). Constructor y diseñador de caminos, canales y puentes. En realidad Telford escribió su propia biografía en 1838 *The Life of Thomas Telford, Civil Engineer, written by himself* dónde se autodenomina como arquitecto a pesar de que ni su educación ni sus obras fueron propiamente "arquitectura". En un principio estuvo dos años formándose con los arquitectos Robert Adam y William Chambers, pero en seguida encontró trabajo en el puerto aprendiendo sobre diseño, especificación y ejecución de obras civiles hasta que en 1787 se le designó como supervisor de obras públicas y ahí empezó su carrera como "ingeniero".

19 Robert Stephenson (1803-1859). Ingeniero civil inglés. Hijo de George Stephenson (1781-1848) fundaron entre los dos una de las mayores y de las primeras empresas de construcción de locomotoras, la Robert Stephenson Company, que entre otros logros, diseñó y ejecutó la locomotora "The Rocket". Gracias a su conocimiento de ferrocarriles y locomotoras y a sus estudios de ingeniería, Robert Stephenson fue consejero y diseñador de grandes puentes a nivel internacional.

Fig. 18. Teoría de puentes suspendidos. Extracto gráfico del artículo escrito por M. A-A. Boudsot y publicado por César Daly en la revista "Revue Générale et des Travaux Publics" en 1840.

Fig. 19. Teoría de puentes suspendidos. Extracto gráfico del artículo escrito por M. A-A. Boudsot y publicado por César Daly en la revista "Revue Générale et des Travaux Publics" en 1840.

Fig. 20. Puente Monongahela, Estructura colgante de compensación de luces continuas. Diseñado por Roebling. Pittsburgh. 1846.

Fig. 21. Puente Monongahela, Grabado de la vista general del puente diseñado por Roebling. En primer plano una de los barcos de "General Knox". Pittsburgh. 1846.

cuando Roebling²⁰ escribió al diseñador de puentes colgantes Charles Ellet Jr.²¹, ofreciéndole ayuda con un puente cercano a Filadelfia, diciéndole:

«Mi ocupación favorita en los últimos años en mi residencia de Europa ha sido el estudio de puentes en suspensión... Deje que uno solo de este tipo de puentes se levante en Filadelfia exhibiendo las bellas formas provenientes del aprovechamiento máximo del sistema estructural, y no necesitará una profecía para predecir el efecto que este puente causará en las inteligentes mentes de los americanos».

Con esto vemos hasta qué punto creía en los beneficios de este tipo de estructura, pero no fue hasta 1844, en Pennsylvania, cuando Roebling hizo uno de los primeros diseños para una estructura colgante de gran duración. Estamos hablando de cuatro años después de que en Francia se publicase la teoría de puentes suspendidos y el proyecto ni siquiera fue un puente, sino un acueducto de madera de siete ojos de casi cincuenta metros de luz cada uno, soportado por un cable continuo de unos dieciocho centímetros de diámetro.

Un año después, en de la inauguración de este acueducto, Roebling construyó el Monongahela Bridge en Pittsburgh, donde, por primera vez, el principio del péndulo se aplicó para compensar las luces contiguas bajo la acción de cargas desiguales y fue el principio de una serie de cuatro acueductos colgantes. (Fig.20) y (Fig.21) .

También en 1840, César Daly plantea por primera vez un intento de base científica para la tipología de puentes con estructura de viga cajón (Fig.22) — ya hemos hablado del Britannia Bridge, en que la viga cajón se fusiona con la estructura de arco más convencional (Fig.23) —; como evolución crucial de esta

²⁰ John Augustus Roebling (1806-1869). Ingeniero civil estadounidense, pionero en diseño y construcción de puentes colgantes basado en cálculos de base francesa. También fue el que diseñó y fabricó el cable de acero para estructuras colgantes.

²¹ Charles Ellet, Jr. (1810-1862). Ingeniero civil americano. En el texto se hace referencia al puente colgante de Filadelfia cuando John Augustus Roebling estuvo trabajando en Estados Unidos después de las guerras napoleónicas. La cita completa en el libro de Steinman, David B. & Watson, Sara Ruth llamado *Bridges and their Builders* (1941).

Fig. 22. El puente-túnel o túnel de aire sobre el estrecho de Menai. Detalle de la estructura de cajón atornillada y acartelada. Grabado publicado en la "Revue General de l'architecture et Travaux Publics" en 1849

Fig. 23. Puente Britannia. Sección transversal y vista general de la estructura, diseñado por Stephenson. Inglaterra. 1852.

tipología, se encuentra el puente de las Cataratas del Niágara en 1851 (Fig.24) (Fig.25) , concebido como una gran viga cajón con una parte superior de trenes y un tablero inferior para carros. Esta nueva concepción de una viga cajón es importante porque es una viga que no se sabe calcular científicamente y que, en primera instancia, hacen funcionar por peso y masa con un entramado lo más denso posible. Este es un aspecto fundamental en la geometría del puente. Daly, en su teoría de 1840 (Fig.26) , sigue apoyando esta estructura con un apoyo simple, creando una proporción entre la gran pieza del puente y la sección del mampuesto que la ha de soportar muy irreal. Pero sí que vemos en este primer esbozo un concepto muy interesante, como que la viga no es simétrica en su parte superior e inferior, es decir, está arriostrada; de hecho, se podría traducir la estructura como dos grandes vigas laterales que funcionan solidariamente. Este boceto de 1840 es el embrión de lo que será un hito en la ingeniería, como el puente de las Cataratas del Niágara en 1851 y la misma tipología estructural que utilizará Eiffel en Cubzac-des-Ponts en 1883 (Fig.27) , y que servirá a Eiffel para presentar y presidir junto con Contamin²² y Fouquet el Primer Congreso Internacional de Procedimientos de Construcción asociado a la Exposición Universal de 1889.

²² Victor Contamin (1840–1893). Ingeniero de estructuras francés. Discípulo de Jean-Baptiste-Charles-Joseph Bélanger. Por otro lado, Contamin fue pionero en el uso del hormigón armado, trabajó en este campo con el arquitecto Anatole de Baudot (1834–1915). También, en 1889 Contamin trabajó junto al arquitecto Ferdinand Dutert (1845–1906) en el diseño de la Galería de las Máquinas de la Exposición Universal, en esta exposición fue dónde pudo ver también directamente el trabajo de Eiffel.

Fig. 24. Puente sobre las cataratas del Niágara. Vista general de la estructura que permite el paso superior de trenes y aprovecha el interior de la viga cajón para el paso de carruajes y peatones. Diseñado por J. A. Roebling. Estado unidos. 1851

Fig. 25. Puente sobre las cataratas del Niágara. Vista general de la estructura y vista desde el acceso peatonal, donde se aprecia la “viga cajón”. Diseñado por J. A. Roebling. Estado unidos. 1851

Fig. 26. Puente sobre el río James. Alzado y Sección longitudinales. Diseñado por M. Michel Chevalier situado en Richmond, Virginia. 1840

Fig. 27. Puente Cubzac, Detalle de estructura de pilastra y alzado general, diseñado por Eiffel. Gironde, Francia. 1883.

Fig. 28. Puente Royal Albert. Alzado y detalle de una de las estructuras de mayor luz y vista general del puente diseñado por Isambard Kindom Brunel. Inglaterra. 1854.

Viendo esto, no es raro el interés de Daly por intentar dar una base matemática a este modelo de puente. No será hasta 1854, catorce años más tarde, cuando Isambard Kingdom Brunel²³ comienza la construcción del Royal Albert Bridge, que es una versión última de algo excepcional y de una búsqueda internacional de respuestas a los nuevos progresos que la tecnología permitía. (Fig.28)

Es interesante ver cómo en el mismo número de la revista *Revue Générale* en que aparecen las nuevas teorías de puentes colgantes es donde también se puede ver la reseña sobre la restauración de la iglesia de Vézelay. Podemos ver cómo ambas cosas se consideran relevantes, crean debate y están muy relacionadas; Viollet está en el centro de todos los cambios profundos. (Fig.29)

Por este primer análisis, vemos cómo los que construyen son los ingleses mientras los que se preocupan por la teoría y el cálculo preciso serán sin duda los franceses. Esta tónica acompañará ambas revistas durante todo el período

23 Isambard Kingdom Brunel (1806-1859). Ingeniero inglés. Pionero en estructuras de puentes colgantes. También fue diseñador de barcos de vapor y consejero en la construcción de líneas de ferrocarril.

Fig. 29. Iglesia de Vézelay. Extracto del artículo “Monumentos históricos” de la “Revue General de l’architecture”. Publicado por César Daly en 1840

Fig. 30. Acta del Primer Congreso Internacional de procedimientos de Construcción presidido por Eiffel en París 1889.

estudiado. De hecho, el propio Eiffel en las actas del Primer Congreso Internacional de Procedimientos de Construcción publica: (Fig.30)

«Inglaterra fue el primer país, debido a la naturaleza de su suelo y a la situación especial de su industria, en hacer uso de este tipo de construcción; pero Francia pronto adquiere un lugar muy importante, gracias a la ciencia de sus ingenieros. De hecho, son los primeros en establecer los principios que deben guiar razonadamente el empleo de materia y forma, creando la ciencia que llamamos resistencia de materiales. Gracias a ella, el uso del metal se ha hecho con notable precisión y llegándose a realizar obras que parecen de audacia extrema para todos los espíritus que no están familiarizados con los recursos de la construcción moderna, donde el metal es de algún modo el tipo»²⁴.

Apoyando esta afirmación, en la revista francesa podemos encontrar una gran influencia británica, sobre todo, y casi únicamente, en lo que a la parte práctica se refiere, como puede ser la divulgación de proyectos de ingeniería y arquitectura o artículos y presentaciones de nueva maquinaria²⁵ empleada en Inglaterra para embarcar el carbón, por ejemplo.

24 Actas del *Primer Congreso Internacional de Procedimientos de Construcción*. Publicado en París en 1889 con motivo de la Exposición universal. El texto citado en el texto lo escribe Eiffel en sus “Notas sobre las construcciones metálicas” como parte de estas actas.

25 Como ejemplo de esto enumero varios artículos publicados en la revista *Revue Générale de l'architecture et des travaux publics* en su primer número de 1840 que desarrollan la idea citada en el texto: *Application des machines locomotives à la navigation sur les canaux*. Páginas 119-120 del número de Febrero (apartado Mélanges); *Nouvelle machine à épuisement*. Páginas 120-121 del número de Febrero (apartado Mélanges); *Machines employées en Angleterre pour embarquer le charbon* firmado por M.E. Teisserenc. Páginas 149-157 del número de Marzo (apartado Mélanges); *Importations de Machines Anglais*. Páginas 631-632 del número de Octubre (apartado Mélanges); *Machines à vapeur*. Páginas 701-702 del número de Noviembre (apartado Mélanges).