

Métodos de cálculo de arcos y bóvedas basados en los tratados y su aplicación en la restauración: Un ejemplo de finales del siglo pasado

Javier Avendaño Pereda
José Luis Javier Pérez Martín
María Aurora Flórez de la Colina

Los tratados clásicos de Arquitectura recogen distintos métodos de diseño y trazado de arcos y bóvedas, cuyas enseñanzas se impartían en la Escuela de Arquitectura de Madrid, a finales del siglo pasado y principios de éste.

A estos conocimientos se añadían en el Plan de Enseñanza de 1896 otras materias destinadas a apoyar el análisis de la estabilidad y cálculo estructural de los edificios, como subraya esta frase de Arturo Mélida, Catedrático de Modelado: «Si en la Escuela se diese tan sólo un curso de Mecánica Racional, sin que el alumno llegase a estudiar la aplicación a la Resistencia de Materiales, jamás calcularía ninguna construcción»,¹ señalando la falta de continuidad de su asignatura.

La Estática Gráfica, desarrollada para el cálculo de puentes, era en ese momento una «moderna y utilísimas ciencia que permite averiguar las condiciones de equilibrio que existen en un edificio»,² en palabras del arquitecto Eladio Laredo (1864-1941) que estaba realizando una intervención de cierta importancia en la iglesia de Santa María en Castro Urdiales.

A través del análisis de la actuación de este joven arquitecto, queremos subrayar el profundo cambio de enfoque en la restauración de monumentos construidos con estas técnicas. La práctica desaparición de esta Tecnología de los planes de estudio actuales, reducida en el mejor de los casos al tercer ciclo, ha variado drásticamente la aproximación de los arquitectos y otros profesionales de la construcción al deterioro del Patrimonio edificado con piedra.

FORMACIÓN ACADÉMICA DE ELADIO LAREDO EN LA ESCUELA DE MADRID

Hijo de un comerciante de conservas de pescado de Castro Urdiales en Santander, Eladio Laredo estudió Arquitectura en Madrid entre 1885 y 1890.³

Siendo todavía estudiante, en 1889, emprendió la restauración de la iglesia gótica de Santa María, en su pueblo natal. En la memoria del proyecto, documento excepcional publicado en 1891, nos ha dejado una detallada descripción tanto de los criterios en los que basó su intervención como de los métodos de cálculo que utilizó para comprobar la estabilidad del edificio.

Este escrito recoge el magisterio de dos de sus profesores: Federico Aparici, Catedrático de Construcción, y Arturo Mélida, Catedrático de Modelado, así como de otros restauradores como Viollet-le-Duc, Ramé, Gilbert, Taylor, Jourdain, Duval, Godefroi, Boisserée y Binzer.⁴

Arturo Mélida Alinari restauró el claustro de San Juan de los Reyes de Toledo, conservándose la memoria de éste proyecto de restauración de 1881, realizada en pergamino con escritura gótica e ilustraciones miniadas, en el Departamento de Historia del Arte de la Escuela de Arquitectura de Madrid. Su influencia en Laredo fué muy fuerte y éste recoge muchas de sus ideas sobre criterios de restauración.

El conocimiento de las publicaciones de Viollet-le-Duc también es evidente a lo largo del texto en el que analiza la estabilidad de la estructura.

EMPLAZAMIENTO Y CONJUNTO MONUMENTAL DE CASTRO URDIALES

Un rasgo esencial de Santa María es el entorno excepcional en el que está situada. Así lo indica Laredo al principio de su Memoria, analizando el conjunto del que forma parte y citando a otros dos estudiosos que ya se habían interesado por la iglesia: Amos de Escalante, en «Costas y Montañas» y Manuel Assas, autor de una monografía sobre la lauda sepulcral de Martín Fernández de las Cortinas, que también hace una breve descripción.

«No sé de qué enemigos recelaban, qué acometidas de herejes ó paganos temían los fundadores de Santa María de Castro, para erigir su templo en el centro de una fortaleza, sobre un áspero escollo, cuya entrada cerraron con muro y cava.»⁵

El peñasco de caliza que separa las dos ensenadas de Castro y de Urdiales, está formado por una península o lengua de tierra, parcialmente protegida en el noroeste de las galernas del Cantábrico por otros bloques o masas rocosos. El terreno en que se asienta la parroquia se eleva notablemente sobre el nivel de la población, dominándola desde su altura, como recoge el plano de 1901 realizado por Laredo, con la altimetría y las construcciones del entorno más próximo de Santa María [Fig. 1].

La Iglesia aparece hoy, tras las intervenciones realizadas en los últimos años, como un elemento exento e independiente, aunque esto no ha sido así hasta hace poco.

Su fachada principal, orientada al noroeste siempre estuvo protegida por un muro que la unía «con la

casa hoy en ruinas y de la que no existe mas que una de sus paredes, que se supone que sirvió en algunas épocas de morada regia».⁶ Hoy en día, queda muy poco de este muro, del que sin embargo subsiste un testimonio documental importante en la *Arquitectura Civil* de Vicente Lampérez en la que aparece una foto con el siguiente pie: «Palacio de Alfonso VIII, en Castro Urdiales (Santander). Fachada. Fot. Ruca-bado», recogéndola el autor como prototipo de palacio fortificado «con planta baja maciza, sin más hueco que la puerta y no siempre algunas aspilleras».⁷ Hay documentos de principios del siglo XIII que recogen dos estancias del rey Alfonso VIII en Castro Urdiales, en agosto de 1208 y septiembre de 1209, aunque hay autores que consideran que posiblemente se alojaría en el castillo.⁸ Recientemente, al realizar la nueva pavimentación del perímetro de la iglesia, se eliminó el arco que, tapiado con ladrillo, unía este muro con la iglesia actuando de cortavientos de la portada.

Laredo reseña en su Memoria otras construcciones relevantes, entre las que destaca las ruinas del Templo de San Pedro, primitiva iglesia de la villa, señalando su ábside y la puerta del crucero entre las tapias que quedan como único vestigio. Uno de los documentos más antiguos sobre la villa, de 1178, menciona la donación de este edificio al Monasterio de San Juan de Burgos.⁹

Y siguiendo con su descripción: «A unos 15 metros de la Parroquia y de las ruinas de que hemos hecho mención, se alza un castillo, que aunque revela muy distintas épocas de construcción tiene algunos elementos pertenecientes a la misma época de la fundación de Santa María. Se compone de cinco torreones sirviendo cuatro de ellos de contrafuertes de la gran bóveda que forma la vivienda del castillo; el quinto torreón avanzando hacia tierra forma un recinto de planta triangular que indudablemente estuvo coronado por almenas como lo indica un tercer cuerpo donde hay dos puertas, cuyos arcos son de época bien determinada por la severidad y belleza de su línea, así como por la falta absoluta de ornamentación. Dicho castillo es la parte más saliente hacia el mar por el lado del Este. Dos peñotes aislados fueron unidos por medio de arcos o puentes que conducían a un pequeño santuario dedicado a Santa Ana. De aquéllos aún quedan vestigios para estudiar su época; siendo el mayor de la misma forma apuntada que la fortaleza e iglesia; el más pequeño es de medio pun-

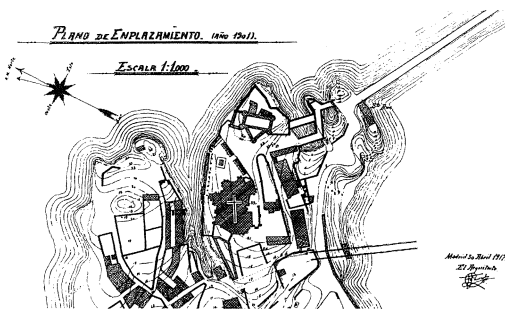


Figura 1
Plano de emplazamiento del Conjunto Monumental de Castro Urdiales en 1901, realizado por Eladio Laredo

to. No sucede así desgraciadamente con la ermita; pues hay un mirador que a fuerza de transformaciones, por más estudios que se practiquen, no se encuentra un sólo documento para poder fijar el tiempo de su primitiva construcción. El mar entrando por varios puntos viene a formar un conjunto armónico de estos distintos elementos, igualmente batidos por las olas. Por la parte de tierra, se hallan circunscritos por una muralla en la cual se observan también los distintos períodos de ejecución, siendo uno de ellos de la misma época que la Parroquia y otro posterior. La parte más antigua arranca de una construcción hoy en ruinas, que dice la tradición fué morada de personas reales, unida hoy a la iglesia por medio de un gran pórtico llamado vulgarmente de las mujeres, del peor gusto artístico y de ejecución completamente moderna».¹⁰

LA IGLESIA DE SANTA MARÍA: TIPOLOGÍA Y DIMENSIONES

Eladio Laredo sitúa el principio de las obras de Santa María a comienzos del siglo XII, basándose en consideraciones sobre su planta y en el diseño de su portada principal, aunque la mayoría de los autores (Amos Escalante, Manuel Assas, Lampérez...) lo sitúan un siglo después.

Si nos atenemos a consideraciones históricas, Rogelio Pérez Bustamante indica que el inicio del desarrollo económico y social de Castro Urdiales se produjo a partir de la fecha de 10 de marzo de 1163, en que el rey Alfonso VIII de Castilla otorgaba mediante privilegio el Fuero de Castro, señalando la época de oro de esta villa medieval de 1296 a 1368, en la que encabezando la Hermandad de las Marismas, declinando su esplendor entre 1369 y 1471, llegando a la ruina entre 1471 y 1516 (11). Este mismo autor recoge la opinión de J.L. Saiz que considera que la puerta principal, llamada Puerta del Refugio en la Edad Media podría datarse en los comienzos del siglo XIII, mientras que el cuerpo, el ábside y la torre serían del XIV, en su trabajo sobre el *Conjunto Monumental de Santa María*.¹²

La iglesia es de estilo gótico u ojival, con de tres naves, de mayor altura la central y menor las laterales. Tiene planta rectangular, con crucero marcado por la mayor longitud del tramo, y ábside formado por un tramo recto que prolonga tanto la nave central

como las laterales que continúan en una girola en torno a la capilla mayor poligonal (semidecágono), a la que se abren tres capillas hexagonales y una rectangular, añadida en el siglo XV [Fig. 2].

PLANTA DE SANTA MARÍA

1. PUERTA DEL REFUGIO
2. CAPILLA BAUTISMAL
3. CAPILLA DE SANTA CATALINA
4. SACRISTÍA
5. PUERTA DE LOS HOMBRES
6. CAPILLA DE SAN JOSÉ

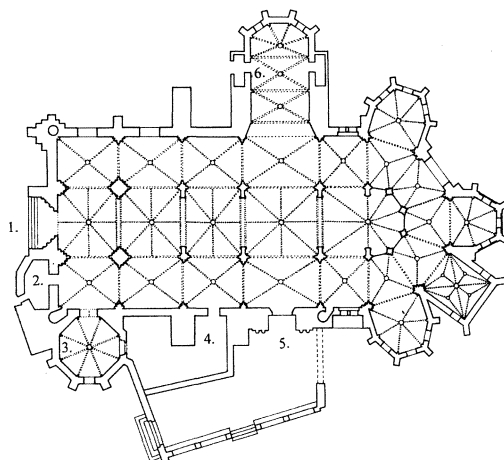


Figura 2
Planta de Santa María, en Castro Urdiales

Otro añadidos serían la capilla de Santa Catalina, de planta octogonal, en el siglo XVI, y una pequeña estancia utilizada como capilla bautismal, teniendo acceso ambas desde el primer tramo de la nave lateral situada bajo la torre. En el XVII se realizaron la sacristía y la casa del sacristán, adosadas también a este muro de la fachada meridional, que en el XVIII sufrió además la sustitución de la puerta que daba acceso al crucero o Puerta de los Hombres, por una nueva traza de factura neoclásica. Finalmente, a finales del XIX, Eladio Laredo sustituyó la otra portada gótica del crucero, deteriorada no sólo por su exposición al oleaje sino también por las construcciones adosadas que se habían hecho en conexión con el depósito de cadáveres del cementerio situado entre el

ábside y el castillo, y construyendo la actual capilla de San José. También debió eliminar algunas construcciones que en fecha no determinada se habían añadido a la Puerta del Perdón o de las mujeres, situadas en la fachada principal.¹³

Estas «disparatadas agregaciones de cuerpos, mil y mil postizos, remiendos y absurdidades» que Vicente Lampérez hace desaparecer en la planta que dibuja de Santa María [Fig. 3], no le impiden ver sus cualidades: «Dentro de la sencillez de la planta es de notar el deseo de dotarla de un elemento de importancia, cual es la girola, y el bellissimo partido de las capillas en ella alternando con las ventanas, que dan al deambulatorio una claridad y ligereza notables, según una disposición de que las grandes plantas románicas presentaban ya ejemplos (catedral de Santiago, entre otras)».¹⁴

PLANTA DE SANTA MARÍA, V. LAMPÉREZ

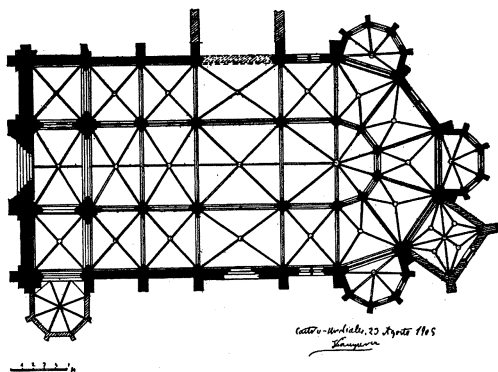


Figura 3
Planta de Santa María, en Castro Urdiales, de Vicente Lampérez

Eladio Laredo, que tomó medidas detalladas, indica en su memoria «lo poco escrupulosos que eran con sus medidas estos artistas, que buscaban la proporción de sus líneas a simple vista, pues siempre se hallan diferencias, y algunas veces bien notables, pero nunca lo bastante para que fije en ellas su mirada el observador, a no ser que haga uso de alguna medida», indicando seguidamente que él va a utilizar valores medios, salvo cuando haga mención expresa de ello. Extractando parte del texto en que describe

la planta y dimensiones de Santa María, podemos tener una idea del interés que puso en este trabajo:

«Se compone de tres naves: la central, que tiene un ancho de 7,70 metros, y las dos laterales, que miden un ancho de 5,50 metros. Estas medidas son en sentido transversal. En el sentido longitudinal se compone de cinco bóvedas hasta el ábside, teniendo 5 metros de luz, con la que nos da la siguiente solución de cuatro de sus bóvedas: empezando a contar desde la puerta principal, observamos que la primera, segunda, tercera y quinta de las bóvedas bajas, o de los costados, se elevan sobre planta cuadrada, mientras que las bóvedas centrales se elevan sobre planta rectangular, siendo el lado mayor de este rectángulo en sentido transversal. La cuarta resuelve el problema de manera inversa, puesto que la bóveda central se alza sobre planta cuadrada, marcando de este modo la cruz, mientras que las laterales están sobre planta rectangular, teniendo su mayor lado en sentido longitudinal.

La longitud total de las cinco naves, de que hemos hecho mención es de 31,90 metros, siendo su ancho de 18,10 metros por una parte, en tanto que por otra no tiene más que 17,40. Tomando un término medio, nos da un resultado de 17,75 metros. Así pues, tenemos una superficie total de 248,21 metros cuadrados. De la cual, descontando el lugar que ocupan los machos o pilares, altares, etc., obtendremos la superficie disponible, 224,274 metros cuadrados que arroja la parte recta de la iglesia. Halladas la superficie del ábside, capillas y girola, y descontadas las superficies no disponibles, nos dan un total de 285,11 metros cuadrados. De este cálculo resulta que la iglesia puede contener cómodamente el número de 856 personas, y en días de gran concurrencia, en que se estrechan más aun los fieles, caben en su recinto dos mil almas.

Por las indicaciones y datos anteriores, fácilmente se llegará a formar una idea exacta de la forma y dimensiones de nuestro monumento».¹⁵

ANÁLISIS DE LAS BÓVEDAS

Al describir las líneas generales de los alzados exteriores e interiores, Eladio Laredo va analizando la estabilidad del edificio. Hemos entresacado la parte esencial relativa a la descripción en sección y a la transmisión de empujes, que queremos relacionar

con los dibujos de 1909 de Vicente Lampérez, del alzado interior y de la sección de un tramo de bóveda, con los dobles arbotantes que absorben una parte de los esfuerzos horizontales [Fig. 4].

SECCIONES LONGITUDINAL Y
TRANSVERSAL DE SANTA MARÍA,
V. LAMPÉREZ

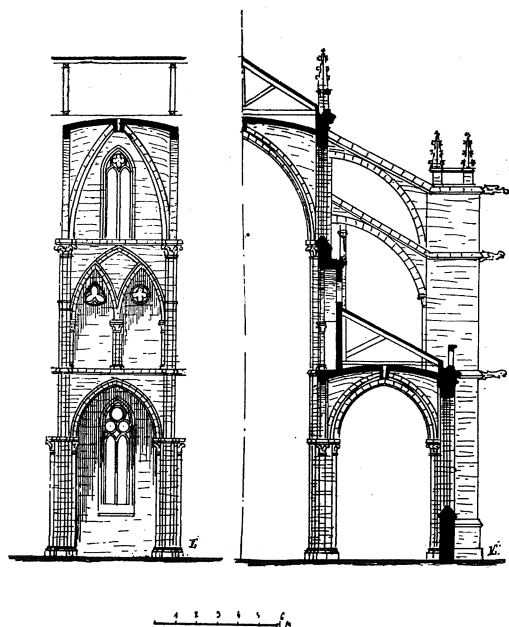


Figura 4
Secciones longitudinal y transversal de Santa María, en Castro Urdiales, de Vicente Lampérez

«Diremos en primer lugar que las bóvedas bajas tienen sus líneas de capiteles a una altura del suelo de 4,85 metros, mientras que las bóvedas altas las tienen a la altura de 15,17 metros. Ahora bien: entre el punto de aplicación de la bóveda alta y el de la bóveda baja, hay una diferencia de 10,32 metros. Esta línea es la que podemos llamar principal, por venir a resolverse en ella todos los problemas que plantea este arte. En efecto, a esta línea vienen a dar los esfuerzos de todos los elementos de la construcción. Para poder entenderlo mejor, veremos, empezando por la parte superior, los esfuerzos que en ella se efectúan, y la manera

de contrarrestarlos. En primer lugar, tenemos, que en la parte más alta recibe el empuje de los dos arcos formeros y de un fajón. Los formeros, por hallarse en el mismo plano, y ser contrarios, se componen, dando una resultante vertical representada en peso. Nos queda, pues, solamente el empuje del arco fajón. A este mismo punto vienen a parar los arcos diagonales, cuyos planos se cortan según esta misma línea; y por consiguiente, sus empujes se compondrán en una resultante que se confunde con el empuje del arco formero. Vemos pues que el empuje en ese punto de aplicación, y en sentido de dentro a fuera se halla compuesto de dos esfuerzos. Los arcos diagonales son de medio punto, para que de este modo, pueda quedar su intersección a la altura de las claves respectivas de arcos formeros y fajones.

Estas resultantes están, con relación a la vertical, en un sentido inclinado, y que, en el caso que nos ocupa, podemos considerarlas, representadas por un ángulo de 22 grados y 5 minutos; por lo que, para hallar el punto de aplicación en el muro, tenemos que prolongar esta línea hasta que se encuentre con la línea media del macizo, que en este caso representa el lugar geométrico de todos los centros de gravedad de cada uno de los distintos tambores o elementos que forman parte del macizo; así pues esta línea se halla representada, en el caso presente, por una línea de 1,55 metros, a contar de los arranques hacia abajo.

Éste es el cálculo que solían hacer los célebres arquitectos de aquella época; puesto que los arcos, dobles arbotantes que empujan del exterior al interior, debían comprender entre ambos este punto. Nos encontramos en nuestro caso, que los arbotantes se hallan a uno y otro lado de este punto, a distancia de 1,70 metros». ¹⁶

Tras explicar este efecto, cuantifica la magnitud de los esfuerzos que se producen, en función de los pesos de los distintos materiales, tanto en la parte alta como en el arranque de las bóvedas bajas. Es interesante comprobar el conocimiento que tiene de los textos de Viollet-le-Duc, ya que resulta evidente la relación de la explicación anterior con el texto del *Dictionnaire Raisoné* que hace referencia al contrarresto de empujes en bóvedas góticas de crucería, o con la parte en la que recoge las ventajas de colocar un tramo recto con medios nervios diagonales para contrarrestar los empujes producidos por la bóveda de crucería con planta de semidecagono que cubre la capilla mayor en el ábside. ¹⁷

ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DEL CONJUNTO

Una última idea que nos gustaría recoger es el análisis de la estabilidad en el espacio del conjunto de las bóvedas, de los distintas deformaciones del conjunto y de los elementos que se habían colocado anteriormente.

«Sentados estos principios, vamos a examinar la iglesia y el aspecto que ofrece al espectador que la contempla. En primer lugar nos encontramos con que la bóveda alta, o sea la que se halla entre los campanarios, no ha sufrido desperfecto alguno, y se conserva en el mismo estado que si hoy se concluyera de construir. Esto obedece a que la bóveda alta ha sido contrarrestada en su totalidad por dichos campanarios; mientras que el punto de aplicación de las diferencias en las bóvedas bajas dista mucho más que en los otros casos del centro de simetría, por hallarse el macho en una sección mucho mayor que los demás; por lo cual estas fuerzas están totalmente muertas, y por esta causa no ha tenido movimiento alguno. En la segunda bóveda uno de sus estribos es el mismo, pero el otro no, y por eso se observa, que es a la vista la que parece que ha tenido mayor deformación, pues a medida que uno de sus arcos fajones la ha tenido, el otro no ha sufrido absolutamente nada; de ahí que como el movimiento, como todas las cosas, es relativo, en ésta se observa mucho más que en las restantes. En la parte del presbiterio o ábside, se observa algo parecido, y por consiguiente, también ha habido menos movimiento en la obra. En el centro en cambio, se vieron en la imposibilidad de cargar más los arcos botareles, cuando al quitar las cimbras se produjo el movimiento, que podemos llamar de asiento, hizo que la obra tomara una nueva posición para buscar mejor equilibrio que el que se le había querido dar. Lo que hicieron fue, hacer o reforzar los contrafuertes, para que estos hicieran el oficio de muros de contención. Así lo vemos, pues los contrafuertes en su parte alta tienen hacia el medio una línea que declara o manifiesta que parte de aquellos ha sido colocada después de tener ejecutados los que en un principio fueron los originales. A pesar de esto, en la fachada N.E., ya dejamos apuntado, que los arcos botareles interpuestos entre la bóveda y el contrafuerte, se encuentran saltados; por lo cual se hace indispensable que sea sustituido y remediado.

¿De qué provienen las grandes deformaciones que existen en la bóveda baja? Al ser toda la construc-

ción una cadena de tal manera entrelazada, que cuando sufre un elemento de ella, sufren también todos los demás, el movimiento para encontrar el punto en el que el equilibrio estuviese asegurado, ha producido una rotación que ha empujado sucesivamente a las bóvedas laterales por los puntos que tenía contacto con ellas. Por ello, los pilares de la bóveda baja están todos inclinados por la parte alta hacia la bóveda central, inclinación tan acentuada que llega a tener en una altura de 4,85 metros, la desviación de 0,75 metros. De aquí resulta que, hacia esta parte se note un gran abultamiento desde la nave central. Abultamiento tanto más pronunciado, cuanto mayor es la desviación o el asiento que ha hecho la obra; así se ve que en la nave que se halla hacia el N.E. la desviación es mucho más acentuada que en otros lados. En las partes en que hemos marcado el minimum de asientos, estos defectos son imperceptibles; lo cual viene a evidenciar nuestro aserto, pues si no estuviesen tan íntimamente ligados como hemos dicho los distintos elementos, no se hubiese transmitido su movimiento de este modo. Aún hay otro dato para demostrar este principio. Existen como a una altura de dos a tres metros sobre las bóvedas bajas, unos arcos de punto sumamente rebajado, y que las unen a esta altura interrumpiendo la bóveda central. Estos arcos, a no dudarlo, han sido colocados por el temor de que el empuje de las bóvedas bajas siguiera actuando, y que por consiguiente, hiciera venir la iglesia abajo.»

Esta descripción, que nos recuerda la conocida lámina de Frézier sobre colapso de arcos, continua con el estudio de cada tramo de bóveda y los contiguos, señalando sus patologías. La comparación del texto de Eladio Laredo con el edificio objeto de su estudio o con los textos que menciona, comprobando así los conocimientos que había adquirido en su etapa de aprendizaje en Madrid, es un ejemplo singular de la aplicación de las teorías de restauración del XIX. Nos puede ayudar a percibir algunas de las carencias que tiene la formación actual de los arquitectos en este campo.

NOTAS

1. Actas de los Claustros de Profesores de la Escuela de Arquitectura de Madrid. Acta de 4 de diciembre de 1892, citada por Teodoro Anasagasti en *Enseñanza de la Arquitectura. Cultura Moderna Técnico Artística*, Madrid 1923, p. 55.

2. Eladio Laredo y Carranza, *Obras de Restauración de la Iglesia Monumental de Santa María de Castro-Urdiales. Memoria Descriptiva*, Castro-Urdiales 1891, p. 80.
3. Título fechado el 15 de diciembre de 1890. Isabel Ordieres, *Eladio Laredo, el Historicismo Nacionalista en la Arquitectura*, Castro Urdiales 1992, p.17.
4. Eladio Laredo, op. cit. pp. 21, 28, 36.
5. Amos de Escalante, *Costas y Montañas*, Madrid 1879.
6. Eladio Laredo, op. cit. p. 25
7. Vicente Lampérez y Romea, *Arquitectura Civil Española de los siglos I al XVIII*, tomo I, Madrid 1922, pp. 340, 342.
8. Rogelio Pérez de Bustamante, *Historia de la Villa de Castro Urdiales*, Castro Urdiales 1980, p. 114.
9. Rogelio Pérez de Bustamante, op. cit. p. 114
10. Eladio Laredo, op. cit. pp. 16, 17.
11. Rogelio Pérez de Bustamante, op. cit. pp. 51-97
12. J.L.Saez, *Conjunto Monumental de Santa María*, Santander 1972.
13. Eladio Laredo, op. cit. pp. 24, 25, 145.
14. Vicente Lampérez y Romea, *Historia de la Arquitectura Cristiana Española*, tomo III, Madrid 1930, p. 125.
15. Eladio Laredo, op. cit. pp. 73, 75, 76, 77.
16. Eladio Laredo, op. cit. pp. 78, 79.
17. E. Viollet-le-Duc, *La construcción Medieval*, Paris 1859. Artículo «Construcción» del *Dictionnaire Raisoné de L'Architecture Française du XI au XVI siècle*, Ed. CEHOPU, madrid 1996, pp. 70, 71, 95.