

Historia de la Ingeniería Civil 2007-08
Trabajo de curso:
Sistemas de contrafuertes: economía,
funcionalidad y belleza

Francisco Javier Tsao Santín

29 de agosto de 2008

Índice general

Prefacio	4
1. Tierra	6
2. Agua	12
3. Aire	19
A. Trabajo de campo	28
A.1. Contrafuertes de contención de ferrocarril en La Coruña	28
A.2. Muro de contención en el apeadero de ferrocarril de Miño . . .	33
A.3. Muro de contención en el barrio de Ricardo Sánchez, Pontedeume	34
A.4. Presa de Meicende	35
A.5. Colegiata de Santa María del Sar, Santiago de Compostela . .	38
A.6. Iglesia de Santa María del Azogue, Betanzos	40
A.7. Iglesia de Santiago Apóstol, Pontedeume	43
A.8. Nave industrial en Betanzos	46
A.9. Iglesia de Santiago Apóstol, Narón	47
Bibliografía	50

Índice de figuras

1.	Esquema de la presa de Salas aguas abajo	5
1.1.	Muro de contención romano en la Vía Flaminia	7
1.2.	Depósito de abastecimiento de Andelos	8
1.3.	Muro de contención del arroyo Cantarranas	10
1.4.	Muro de contención del arroyo Cantarranas, esquema de funcionamiento	11
2.1.	Presa de Proserpina	14
2.2.	Presa de Arencibia-Errota	15
2.3.	Presa de Trujillo	16
2.4.	Presa de San Renovato	16
2.5.	Tajamares de Santiago de Chile	18
3.1.	Basílica laterana de Roma	21
3.2.	Bóveda de cañón románica	22
3.3.	Sistema de contrafuertes gótico, esquema de funcionamiento	23
3.4.	Catedral de Notre-Dame de París	24
3.5.	Fábricas de vidrio del Centro en Montluçon	26
3.6.	Hangar del aeródromo de Torrejón	27
A.1.	Contrafuertes de contención de ferrocarril en La Coruña. Visión general	29
A.2.	Contrafuertes de contención de ferrocarril en La Coruña. Visión desde la coronación del muro	30
A.3.	Contrafuertes de contención de ferrocarril en La Coruña. Detalle del conglomerante en las juntas(1)	31
A.4.	Contrafuertes de contención de ferrocarril en La Coruña. Detalle del conglomerante en las juntas (2)	32

A.5. Muro de contención en el apeadero del ferrocarril en Miño . .	33
A.6. Muro de contención en el barrio de Ricardo Sánchez, Pontedeume	34
A.7. Presa de Meicende. Vista general aguas arriba.	35
A.8. Presa de Meicende. Vista general del intradós	36
A.9. Presa de Meicende. Vista detalle del intradós	37
A.10. Colegiata de Santa María del Sar. Visión lateral	38
A.11. Colegiata de Santa María del Sar. Detalle de arbotante	39
A.12. Iglesia de Santa María del Azogue, Betanzos. Fachada	40
A.13. Iglesia de Santa María del Azogue, Betanzos. Sistemas de con- trafuertes laterales y en el ábside	41
A.14. Iglesia de Santa María del Azogue, Betanzos. Visión interior .	42
A.15. Iglesia de Santiago Apóstol, Pontedeume. Fachada	43
A.16. Iglesia de Santiago Apóstol, Pontedeume. Interior	44
A.17. Iglesia de Santiago Apóstol, Pontedeume. Detalle de contra- fuertes en el ábside	45
A.18. Nave industrial en Betanzos	46
A.19. Iglesia de Santiago Apóstol, Narón. Visión general interior . .	47
A.20. Iglesia de Santiago Apóstol, Narón. Detalle de fisuración (1) .	48
A.21. Iglesia de Santiago Apóstol, Narón. Detalle de fisuración (2) .	49

Prefacio

*«...desgarró su polvorienta piel
con los cuchillos de sus manos
y sus pétreos dedos se cruzaron
diestros, al norte
siniestros, al sur
y pulgares saludando al ocaso;
y en el silencio de la gruta
se alzaban loas a Dios
desde la humana penumbra...»*

El subconsciente colectivo parece utilizar en gran medida, para identificar la etapa del arte a la que una construcción singular pertenece, la forma y decoración de las columnas que la sostienen. Con bastante acierto, hay que apuntar, ya que éstas son habituales en las construcciones humanas, tanto en el pasado, como en el presente. Precisamente esa profusión de elementos, es posiblemente, la causa final que ha obligado a los que las diseñaban, a utilizarlas como elementos no sólo estructurales, sino decorativos, para goce y disfrute de los profanos en ciencias de la construcción, y enaltecimiento del diseñador. Este disfrute viene aumentado por el afán de superación del hombre, de ver en la columna una creación propia resistente a los esfuerzos verticales que él, de forma natural, no es capaz de soportar.

Sin embargo, en un determinado punto de la carrera por llegar más alto, el hombre se encontró con el límite tecnológico de las columnas, en particular, y, en general, de todo elemento destinado a resistir cargas verticales (muros portantes, etc.). Cobraban importancia, por una parte, las inestabilidades propias por axil; por otro lado, esfuerzos horizontales debidos al intento de conseguir espacios más amplios y a acciones variables (viento, sismo) que en un principio se resistieron por peso propio. Y el hombre, una vez más, miró a

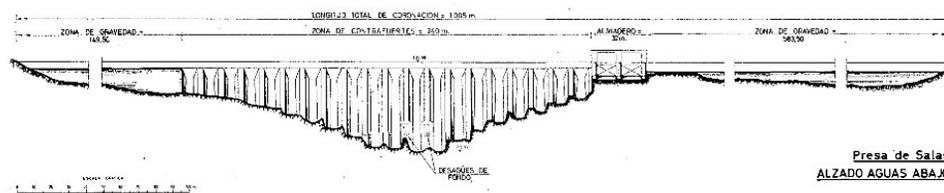


Figura 1: *Esquema de la presa de Salas aguas abajo*[15]. Una de las últimas grandes obras de contrafuertes en Galicia, de la mano del ingeniero coruñés Luciano Yordi

la naturaleza para imitarla, y construyó con sistemas de contrafuertes.

Los contrafuertes *arrastraron los nuevos problemas a tierra, y los descargaron sobre ella*. Sin embargo, aunque hicieron posible el engrandecer las construcciones humanas como nunca se había hecho en la historia, su papel a los ojos del público profano, fue meramente secundario o inexistente. La humildad de su trabajo se vio reflejada en la desnudez de sus formas, en el románico, o en la ocultación bajo una distribución de espacios interiores artificiosa, en el gótico. Sin ánimo de abusar de los tópicos ¹, parece que incluso podríamos establecer una analogía entre pilares y contrafuertes con la personalidad de arquitectos e ingenieros.

El presente trabajo académico pretende hacer una reflexión sobre la evolución de los sistemas de contrafuertes, entendiendo éstos como subgrupo de los sistemas de contención por gravedad², de desde sus orígenes en la naturaleza y con la aparición de cada nuevo material, observando de forma transversal, como se han producido esos cambios en tres grandes grupos de obras: de contención de tierras, hidráulicas, y edificación. Difícilmente exhaustiva en catálogo, fechas y localizaciones, el esfuerzo principal estará en determinar los puntos por los que la ingeniería ha ido pasando más tarde, o más temprano, en todas las civilizaciones.

¹más allá de los informales chascarrillos, la dialéctica entre ingenieros y arquitectos ha hecho correr ríos de tinta. Representativo de ello, el libro «*La polémica ingenieros-arquitectos en España*», de Bonet, Miranda y Lorenzo.

²ateniéndonos a la división de «*Razón y Ser...*»[10], pág. 182

Capítulo 1

Tierra

La primera aparición de los contrafuertes supera a la historia de la humanidad. Algo tan sencillo como la tierra conteniendo a la propia tierra, o el natural equilibrio determinado por el rozamiento interno de los materiales que componen el suelo. Es muy probable que el hombre aprendiera rápidamente la lección y adaptara el terreno en sus primeros asentamientos haciendo uso de los taludes. Por si no lo tuviésemos suficientemente presente, escribe Torroja[10]:

«Porque la mejor solución de un problema puede consistir en suprimirlo. Un talud estable del terreno evita totalmente los empujes y la necesidad de su contención, si el ancho que ese talud ocupa es aceptable.»

Por economía, por falta de medios, y porque, en definitiva, las primeras comunidades no lo necesitaban, es posible que durante mucho tiempo, no hubo necesidad de ir más allá, como mucho de taludes estabilizados con piedras y rudimentarios muros de escollera. Pero las civilizaciones avanzaron, las aldeas, las villas, dieron lugar a las primeras ciudades, y de ahí, se empezaron a gestar los estados en la concepción que hoy tenemos de ellos.

En Europa, la consolidación definitiva del estado moderno vino de mano de los romanos. Como los egipcios sobre el Nilo, como los griegos sobre el mediterráneo, como los chinos sobre el Gran Canal, Roma extendió su civilización apoyada sobre sus vías de comunicación. Utilizaron las primigéneas vías de comunicación marítimas y fluviales, pero la capacidad de mantenerse y expandirse nuevamente por cada nuevo territorio, vino determinada por la calidad de las vías terrestres que tendieron.



Figura 1.1: Muro de contención romano en la Vía Flaminia, en Cagli (Italia) (foto: M. Durán[7]). Impresionante la dimensión global del muro y de los sillares que lo componen. La pujanza de la economía romana permitió ejecutar obras de estas dimensiones que, en otros tiempos, se habrían evitado con un cambio de trazado.

La ingeniería romana buscó la economía, ciertamente, pero sin sacrificar los parámetros de calidad que aseguraban la misión para la que estaban diseñadas. Por ello, tuvieron que hacer esfuerzos adicionales en terrenos difíciles. Así, han llegado hasta nuestros días, sistemas de contención de tierras junto a las calzadas.

Parece lógico pensar que los primeros muros de contención de piedra fueron absolutamente verticales. Seguramente, entendieron después que, si eran demasiado delgados no resistían, y si eran lo gruesos que necesitaban ser, el material estaría desaprovechado, así que empezaron a inclinar el intradós.

El siguiente paso no era tan obvio, porque suponía un cambio estructural importante: los muros descritos hasta ahora, resistían esencialmente la flexión



Figura 1.2: *Depósito de abastecimiento de la ciudad romana de Andelos, en Navarra[2]. Muro con contrafuertes, de sillería, con la doble misión de estabilizar la forma del vaso e impedir que la tierra contamine el agua. Hablaremos de contención de tierra en obras hidráulicas en el capítulo siguiente.*

de eje horizontal. Conscientes de lo que hacían, o no, al aligerar el prisma triangular descargaron sobre los contrafuertes la función de resistir, como ménsulas, la flexión de eje horizontal, mientras que en los tramos de muro aligerado, reaparecían flexiones de eje vertical. Ambos esfuerzos habían de ser resistidos por rozamiento entre sillares, por lo que, en un principio, resultaron obras muy pesadas.

Este fue, esencialmente, el comportamiento de los muros de contención, durante siglos. Las mejoras en las dimensiones debieron venir de la mano de mejoras en el rozamiento entre los elementos que conformaban los muros, con el uso de conglomerantes (morteros romanos de puzolana, argamasa de cal, hasta llegar al uso de morteros de cemento portland) y llaves entre hiladas.

En paralelo, los muros de contención hechos de madera, por supuesto, en obras menores, que difícilmente han podido llegar hasta nuestros días, parecían anunciar la extinción de los muros de contención de piedra. Y así casi pudo haber sido en la etapa oscura de la ingeniería de caminos, la Edad Media, en la que la fragmentación del Imperio Romano dio lugar a sistemas políticos cuyo ámbito territorial difícilmente podía asumir la construcción de nuevas calzadas, o el mantenimiento de las existentes. Pero con la refundación de los que hoy entendemos como los primeros estados de la Europa

moderna, se retomaron las buenas costumbres en la construcción de las vías, y, efectivamente, tuvo que llegar el hormigón armado y el uso industrial de los materiales cerámicos, para que los muros de contrafuertes de piedra desaparecieran frente a una competencia que ganaba la batalla en facilidad de ejecución y economía de materiales.

Con el hormigón, armado o no, se imitan, en forma y esquema estructural, todos los tipos de muros de contención anteriores, especialmente los más ligeros, los que en tiempos se debieron construir con tabla y ménsulas de madera, ya que las exigencias de contención son, en general, menores: la mejora en la maquinaria de movimiento de tierras ha facilitado mucho el trabajo en las obras lineales. Por otra parte, han aparecido nuevas formas de contener las tierras haciendo que trabajen contra sí mismas, con el uso de anclajes más (muros pantalla) o menos (tierra armada, muros verdes) contundentes.

Por lo tanto, los muros de contención con contrafuertes podrían parecer condenados definitivamente a la *extinción*. Pero, en realidad, a lo que están condenados es a su *desaparición*, entendiéndose en el sentido literal de la palabra. Porque los armados permiten resistir las tracciones que antes la piedra, o la cerámica, de por sí no resistían. Y por lo tanto, la historia da un giro de 180°, nunca mejor dicho, y encontramos muros de contención en los que los contrafuertes resisten los empujes de las tierras en el sentido contrario al que tradicionalmente los resistían, trasladando tracciones a la cimentación, donde antes se trasladaban compresiones, quedando los contrafuertes ocultos bajo las tierras que contienen, y, una vez más, cerrando de forma elegante el ciclo de humildad del que hablamos en el prefacio.

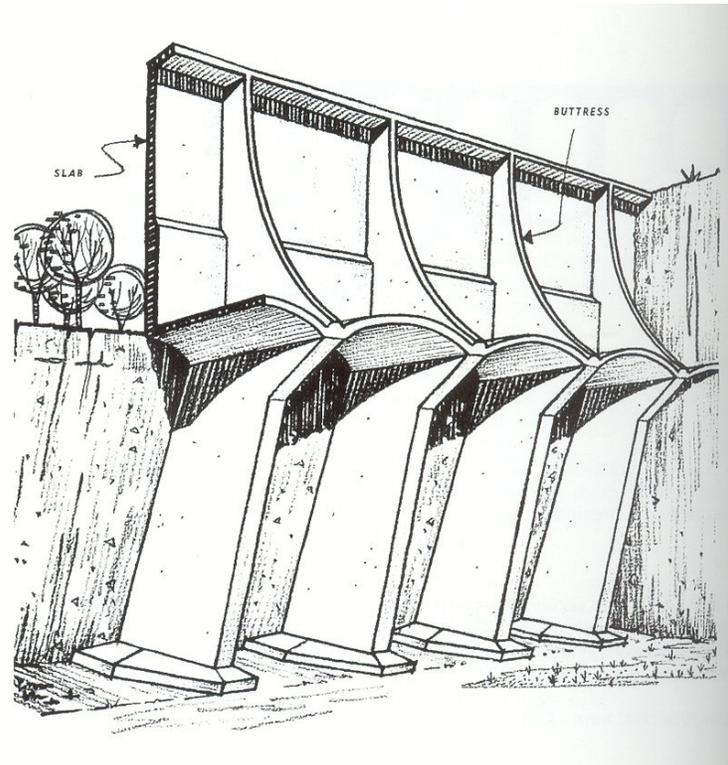


Figura 1.3: Muro de contención del arroyo Cantarranas, Ciudad Universitaria de Madrid, 1933[4]. Belleza oculta en formas suaves que redistribuyen los esfuerzos debidos a los empujes del terreno a columnas de cimentación.

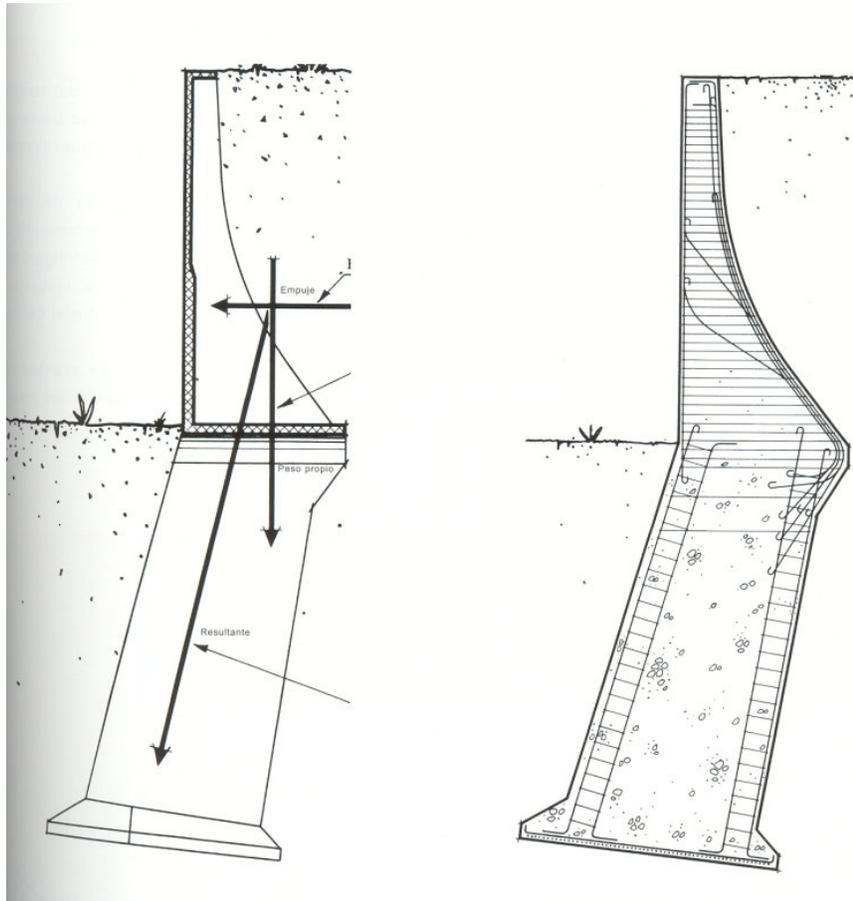


Figura 1.4: Muro de contención del arroyo Cantarranas, esquema de funcionamiento[4]. Los contrafuertes unidos solidariamente a las cabezas de los pilares de cimentación, descargan sobre ellos las flexiones debidas a los empujes en el sentido contrario al tradicional.

Capítulo 2

Agua

Las obras hidráulicas añadieron nuevas variables al problema estructural. El agua ataca al punto crítico común a todas las estructuras, esto es, en la cimentación, con subpresiones que aumentan el momento de vuelco, y con inestabilidades por sifonamiento. Funcionalmente, debemos pensar ¹, por una parte, en las obras portuarias, donde la importancia está en la disipación de energía de las olas; en presas, embalses y diques de control de avenidas, prima el control del flujo del agua por los medios porosos de los que están contruídos.

Los diques que protegían las actividades en el interior del puerto, probablemente siguieron una evolución en la que, primero pretendieron ser pared contra Poseidón; después descubrieron que el airado dios se cansaba y golpeaba más suave si tenía que recorrer una rampa; para finalmente entender, cuando los ingenieros se tuvieron que enfrentar a oleaje *de verdad*, construyendo los primeros puertos modernos a ambos lados del Atlántico en el siglo XVIII, que el dios del mar perdía más fuerza todavía cuando aquellos sillares que tan ordenadamente colocaban en tiempos antiguos, se convertían en irregulares escolleras, predecesoras de los enormes bloques de hormigón de nuestros superpuertos modernos.

Cómo no, sistemas de contrafuertes, en forma de talud nada aligerado, fueron las herramientas para estabilizar la construcción y contener la fuerza del mar. Esto, no ha cambiado desde la antigüedad hasta nuestros días, sólo se ha mejorado en la contundencia de los materiales.

¹[10]pág. 192

Más interés para nuestra reflexión, tiene la evolución de las obras fluviales. Casi sin excepción, los asentamientos más primitivos se situaron al lado de corrientes de agua dulce, pero la evolución técnica en las primeras civilizaciones modernas esto dejó de ser un condicionante. Una vez más, los romanos dieron un ejemplo de ingeniería tendiendo acueductos, alimentados directamente por ríos, o indirectamente con sistemas de azudes, presas, depósitos...

Díaz-Marta y García Diego[2] clasifican estructuralmente las presas de la época romana:

«[...]Desde el punto de vista estructural, podemos enumerarlas en estas cuatro categorías:

1. *Las formadas por un simple muro pétreo, que suelen ser menos de 5 m. de altura: aunque con algunas excepciones, como el azud de San Marcos*
2. *Las constituídas por un muro con contrafuertes, de las cuales tenemos una acabada muestra en las de Esparragalejo, y Consuegra. La de Proserpina también los tiene, pero están del lado del agua, y como se les puede atribuir otra función –quizá más ornamental que resistente–, la incluimos en el siguiente apartado.*
3. *Otras que están formadas por un muro del lado del agua y un espaldón de tierras adosado al mismo, que además de contrarrestar la presión hidrostática, facilitaba el establecer, a veces, un camino de coronación. de este tipo son las de Alcantarilla, Proserpina y también, Consuegra. Vemos que esta última tiene partes de las tres clases hasta ahora citadas.*
4. *Presas de tierra, de las cuales la única que conocemos es la de Cornalbo. Es de suponer que hubo otras, pero de menores dimensiones y con fines más modestos y/o circunstanciales; la construcción no sería tan cuidada y por ello, no han llegado hasta nosotros.»*

Se repite entonces el desarrollo conceptual del que hablábamos en el capítulo anterior: muros verticales para obras sencillas, y cuando las fuerzas son mayores, se resuelven con un sistema de contrafuerte. En el caso de las obras más elementales, las presas de tierra, llevarían taludes aguas arriba y

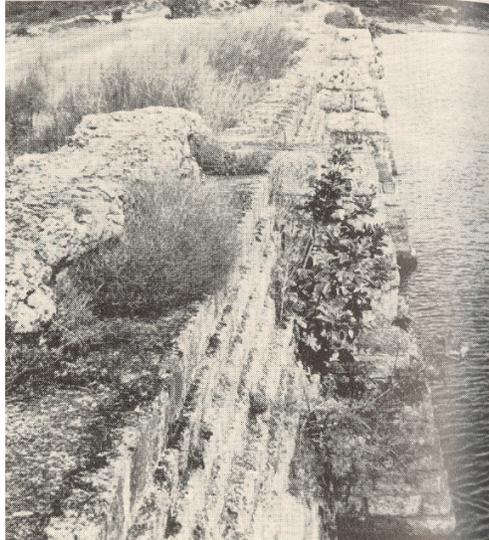


Figura 2.1: *Presa de Proserpina[2]. Los contrafuertes protegen el paramento aguas arriba en el vaciado.*

aguas abajo.

Pero como paso previo del sencillo azud de pared vertical, a la presa de gravedad y después de contrafuertes, tenemos una tipología en la que el esfuerzo de resistir la presión hidrostática lo realiza un espaldón de tierra, y el empuje de éste sobre el muro, a embalse vacío, se resiste con contrafuertes. Por ello, esta tipología, desde el más estricto sentido estructural, debiera haberse incluido en el capítulo anterior ya que de contención de tierras hablábamos (de hecho, ya anunciábamos una primicia con el comentario sobre el depósito de Andelos).

Y si las presas con contrafuertes sobre el paramento aguas arriba fueron el paso previo conceptual a las conocidas comunmente como de contrafuertes, de esta época también datan lo que hoy entendemos como las primeras presas de bóvedas múltiples, caso de la de Esparragalejo. Los romanos trajeron a la civilización el arco, «*donde la materia se supera a sí misma*», que decía Vitruvio, y no lo limitaron a las obras en superficie.

En paralelo al desmembramiento de la jerarquizada red viaria romana,



Figura 2.2: *Presa de Arencibia-Errota, del siglo XVIII[2]. Ejemplo de una de las primeras presas de bóvedas múltiples modernas*

cuyas causas ya mencionamos, el resto de obra civil se readaptó a las nuevas circunstancias en la Edad Media: con notables excepciones, obras menores para abastecimiento de cultivos y producción de la energía que movía los molinos de grano. Por tanto, hubo que esperar a la formación de estados con organismos territoriales más complejos y ciudades más grandes, para que la ingeniería se aventurara con embalses más importantes. Así, la presa en el río Vinapoló (Elche), de Joanes del Temple, primera presa bóveda en España, data de 1640.

Evidentemente, la aparición de las presas bóveda no disminuyó el número de presas de contrafuertes. Por dos razones principales: la primera, por la versatilidad de éstas, que, además, eran fácilmente reparables, añadiendo más contrafuertes si así se requería; la segunda, es, obviamente, que cada tipología se usa para una situación diferente.

Y así llegamos hasta nuestros días. El hormigón en masa no ha hecho sino permitir construir *más rápido, más alto, más fuerte,...* y más barato² que en

²quizás sea más apropiado decir *más rentable*.



Figura 2.3: Presa de Trujillo. El ingeniero y arquitecto Francisco Becerra es autor de esta presa del siglo XVI, donde se conjugan influencias de la ingeniería romana y la arquitectura medieval[2].

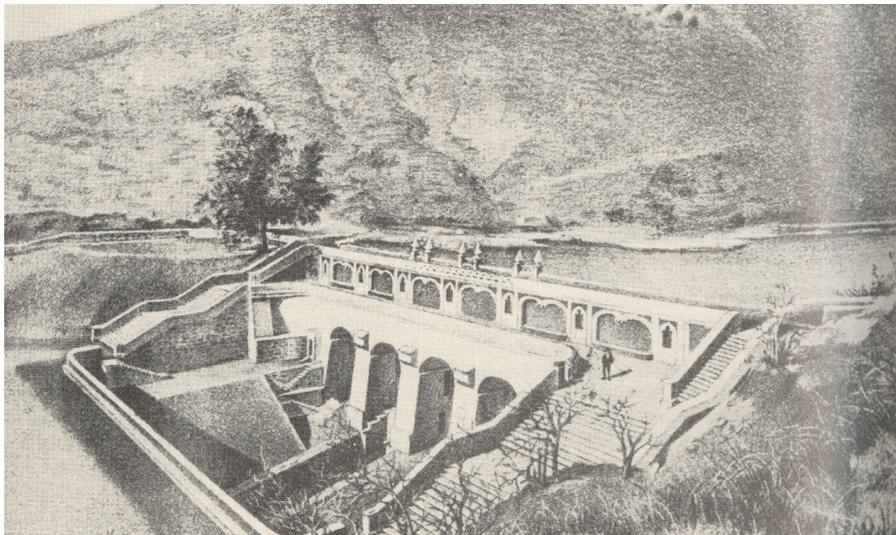


Figura 2.4: Presa de San Renovato, en Guanajato (1895)[1]. Hermosa presa de contrafuertes cuyas cabezas están unidas por arcos, sobre los cuales se dispone un paso superior.

los siglos precedentes. Esto no resta, ni mucho menos, mérito a las modernas presas, que han conseguido domar ríos antes imposibles, y han tenido que acometer sus propios problemas tecnológicos derivados de las propias características del hormigón³. Además, estas obras no están exentas de una belleza funcionalista que se integra fácilmente en el entorno.

Para rematar este capítulo, debemos indicar que el progreso en el desarrollo de las diferentes tipologías de presas se extendió a otras dos grandes obras de ingeniería: los diques en los canales de navegación, y de contención de avenidas.

En los canales de navegación podremos encontrar estructuras contrarrestadas de la escala de azudes y presas, ya que las dimensiones mayores de estas obras suelen corresponderse al surco trazado a base de excavación. Se podría pensar que estas son situaciones propicias para estructuras abovedadas, pero las operaciones que se requieren en servicio lo desaconsejan.

Por contra, los diques de contención de avenidas no suelen ser excesivamente altos, pero sí kilométricamente largos. Dependiendo de la importancia de lo que se hubiere proteger, las soluciones han ido desde tierra, más o menos reforzada, hasta piedra y hormigón. Con más justificación si cabe que en las situaciones que desembocan en la decisión de construir una presa de contrafuertes, se han ejecutado largos muros dispuestos a frenar la presión hidrostática del agua de los ríos que reclaman su valle.

³el nuevo reto será intentar conseguir un compromiso entre el diseño de estos elementos tan invasivos con la protección del ecosistema en el que se construyen.

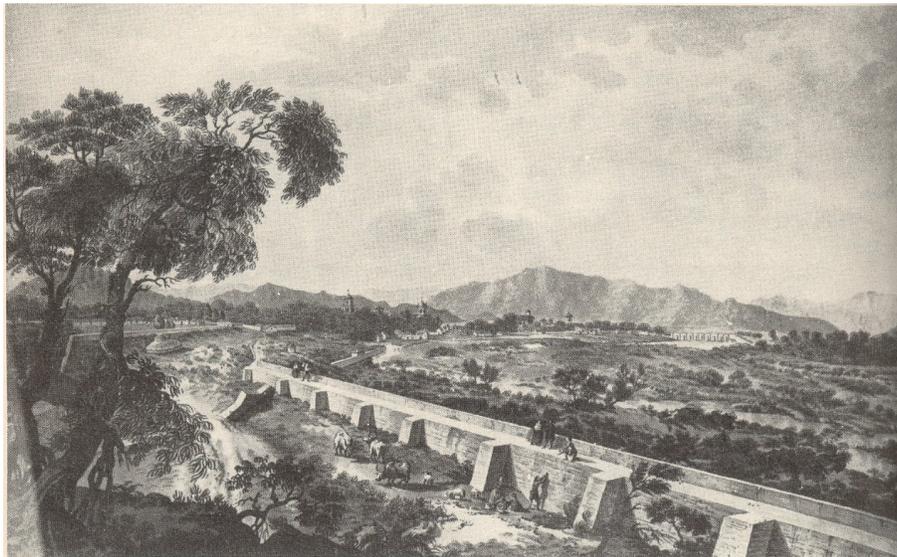


Figura 2.5: *Tajamares de Santiago de Chile*[5]. Los ingenieros españoles tuvieron que afrontar el reto de defender las nuevas capitales del imperio de ríos mucho más caudalosos y valles más amplios que los de la Península Ibérica. Este muro no sólo sirvió de defensa de las crecidas, sino también de vía transitable, como se aprecia en el dibujo.

Capítulo 3

Aire

En los capítulos anteriores, los contrafuertes se enfrentaron a las fuerzas de la naturaleza. En la misma línea de titánicas misiones, esta tipología aparece de nuevo, en esta ocasión, para *declarar la alabanza del hombre hacia Dios*.

Efectivamente, desde que el hombre se bajó de los árboles y se puso en pie, hasta nuestros días, incluso, el cielo ha simbolizado todo lo que lo supera. Por lo tanto, cuanto más alto se construía, más cerca se estaba de la o las divinidades de la civilización.

Así, en Mesopotamia pronto descubrieron la estabilidad de las formas contrarrestadas con paredes inclinadas en sus zigurats. La mejora de los materiales (¿o debiéramos decir el abaratamiento de la mano de obra?) permitió a los egipcios no sólo llegar más alto, también consiguieron que sus mastabas y pirámides llegaran hasta nuestros días; si en algún momento se hubieran encontrado con los mayas, habrían descubierto también, la importancia del suelo a la hora de dimensionar pendientes.

En las civilizaciones más antiguas, los conceptos religiosos eran lógicamente elementales: los dioses eran *enormes y poderosos*, y las reverencias hacia ellos debían ser consecuentes. Pero griegos y romanos humanizaron a sus divinidades, y en consecuencia, rebajaron la escala de sus edificios religiosos. Los segundos importaron de los primeros parte de su arquitectura, pero la tecnología que desarrollaron les permitió ir mucho más allá¹. Viollet-

¹Se podría establecer una analogía entre las relaciones histórico-afectivas de griegos y romanos en la Edad Antigua, con la de europeos y estadounidenses en el mundo de hoy: incluso cuando la tecnología que ha puesto en la cima del mundo a los Estados Unidos les ha permitido hacer los edificios más altos del mundo, siguen aquejando de un cierto

le-Duc esclarece[9]:

«En Grecia la estabilidad se obtiene sólo por la observación juiciosa de la ley de la gravedad; los griegos no persiguen la adherencia entre los materiales; en una palabra, no conocen ni emplean los morteros. En sus monumentos la dirección exclusivamente vertical de las cargas no requiere otra cosa que las resistencias verticales; desconociendo la bóveda, no tienen que contrarrestar presiones oblicuas, es decir, empujes. [...]»

Los romanos afrontaron el nuevo reto con el poderío que demostraron en toda construcción: aportando técnica, calidad y recursos humanos. Cortaron de raíz los movimientos desiguales por asiento de la cimentación, construyeron muros sólidos con sus fórmulas de mortero y, llegado el caso en que esto no era suficiente para resistir los empujes de las bóvedas, atacaron con contrafuertes o sistemas que hacían uso de naves laterales estabilizadoras.

Desgraciadamente, gran parte del conocimiento técnico de los romanos se perdió con el desmembramiento del imperio, y esto, unido a la nueva situación económica, social y política, fue la causa de que, tras la *primera gran crisis del sector de la construcción de la historia*², que duró unos cuantos siglos (desde la caída del imperio hasta la aparición de las primeras órdenes monásticas), los primeros intentos de recuperar una arquitectura que hiciera gala al fervor religioso de la época, hoy nos parezcan burdos y desastrosos.

Viollet-le-Duc entiende esta fase, de prerrománico Carolingio, primero, y del desarrollo del románico por la Alta Edad Media, como una nueva infancia de las tecnologías constructivas, en la que la formación, fundamentalmente en escuelas monásticas, intenta imitar la construcción romana, y, cuando fracasan, inician las correcciones a base de prueba y error. El libro *«La construcción medieval»*[9] del arquitecto francés, es una magnífica y detallada exposición de la evolución técnica de la arquitectura desde la descomposición de Roma hasta los albores del Renacimiento. No vamos a profundizar tanto aquí, pero sí extraemos los puntos críticos de su análisis referente a la trans-

complejo que les mueve a imitar la construcción europea. La fachada del edificio de la bolsa en Wall Street, corazón financiero del mundo, con su fachada de imitación, es un buen ejemplo de ello.

²las consecuencias fueron las mismas que las de las crisis actuales: se deja de construir y se pasa al mantenimiento y la restauración, en este caso, por parte de los nuevos pueblos ocupantes

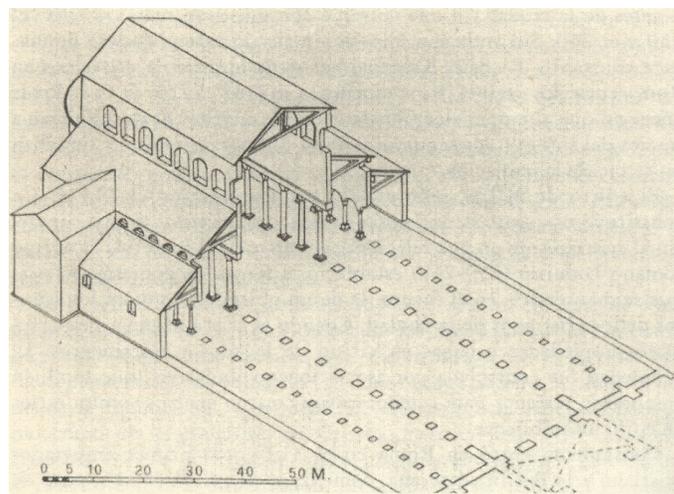


Figura 3.1: *Basílica laterana de Roma [8]. Las basílicas originales se usaban como edificios administrativos, luego su uso cambió y se reprodujeron con la cristianización del Imperio Romano. En este caso, se aprecia un esquema estructural que se repetirá siglos después.*

formación de los sistemas de contrafuertes.

Los contrafuertes, como estribos exteriores o machones recibieron los esfuerzos que los arcos perpiños, finas cimbras perdidas bajo las bóvedas de cañón, descargaban en ellos. En la figura 3.2 se esquematiza la composición de estas bóvedas arquetípicas del románico.

En la transición del románico al gótico, esto es, lo que Viollet-le-Duc describe como una adolescente³ rebeldía por parte de artesanos laicos, surgidos de los habitantes de los burgos, se producen dos avances conceptuales: el primero, el arco de medio punto deja lugar al arco apuntado, reduciendo los empujes laterales; y el segundo, contrafuertes y machones se funden a través del muro, convirtiéndose éste en mero cerramiento.

Las naves laterales ya se venían usando como elemento intermedio entre la bóveda central y el estribo exterior, aunque no eran tan frecuentes como

³entiéndase esta *adolescencia* como el paso del niño que hace lo que sus padres le mandan, al adulto que razona por sí mismo. Esta definición hoy, desgraciadamente, es discutible.

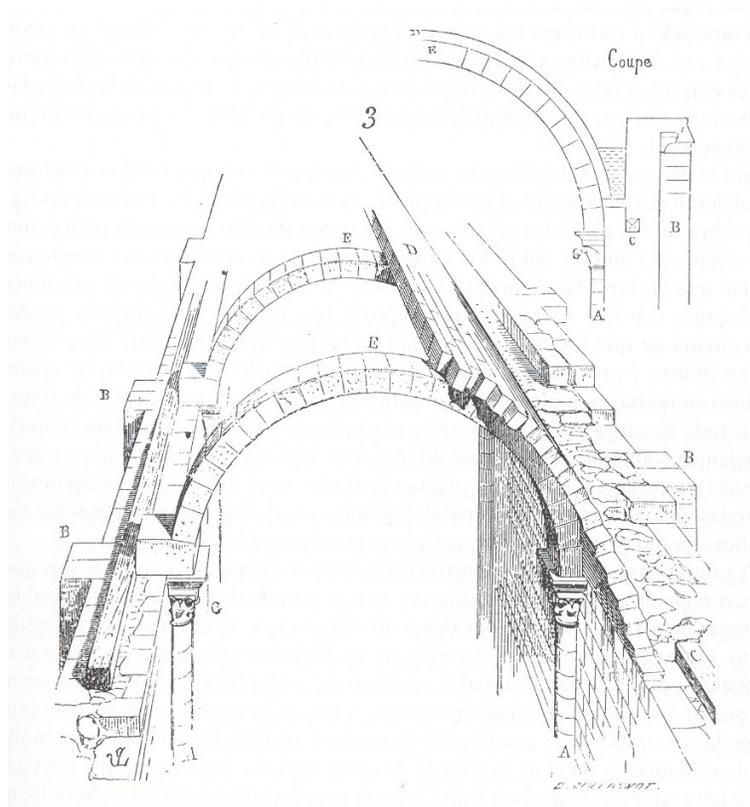


Figura 3.2: *Bóveda de cañón románica [9]. Los arcos perpiaños (E) descargan sobre machones (G) y contrafuertes exteriores (B), unidos en cabeza por un madero que pretendía repartir mejor los esfuerzos; acababan pudriéndose en el interior del muro y degradaban más rápidamente la estructura.*

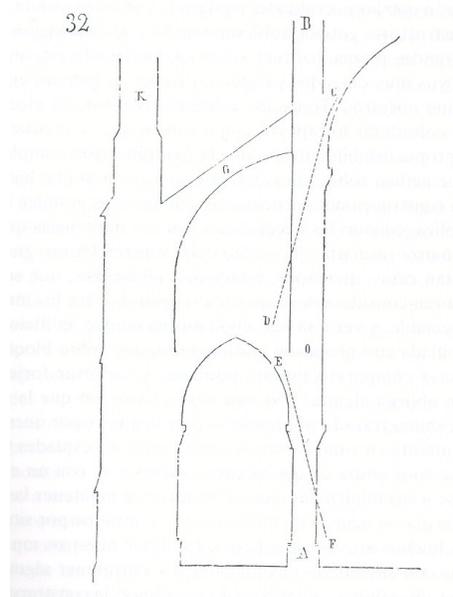


Figura 3.3: *Sistema de contrafuertes gótico [9], funcionamiento. Al colocar más peso más sobre pilares y botareles, las líneas de carga CD y EF se verticalizan, estabilizando el conjunto.*

en la nueva etapa: la estabilidad lateral de los pilares aislados, que separaban ambos espacios en el románico, era un problema grave, especialmente cuando se producían asientos. En el gótico sí se hizo un uso más intensivo de estas naves, como justificación para la colocación de arbotantes (en plural en muchos casos: uno para sostener la bóveda principal, y el segundo, para recibir la fuerza del viento sobre la cubierta. El cómo los hermosos pináculos funcionan como estabilizadores⁴ de pilares y botareles, se esquematiza en la figura 3.3.

⁴como si de un rudimentario pretensado se tratara

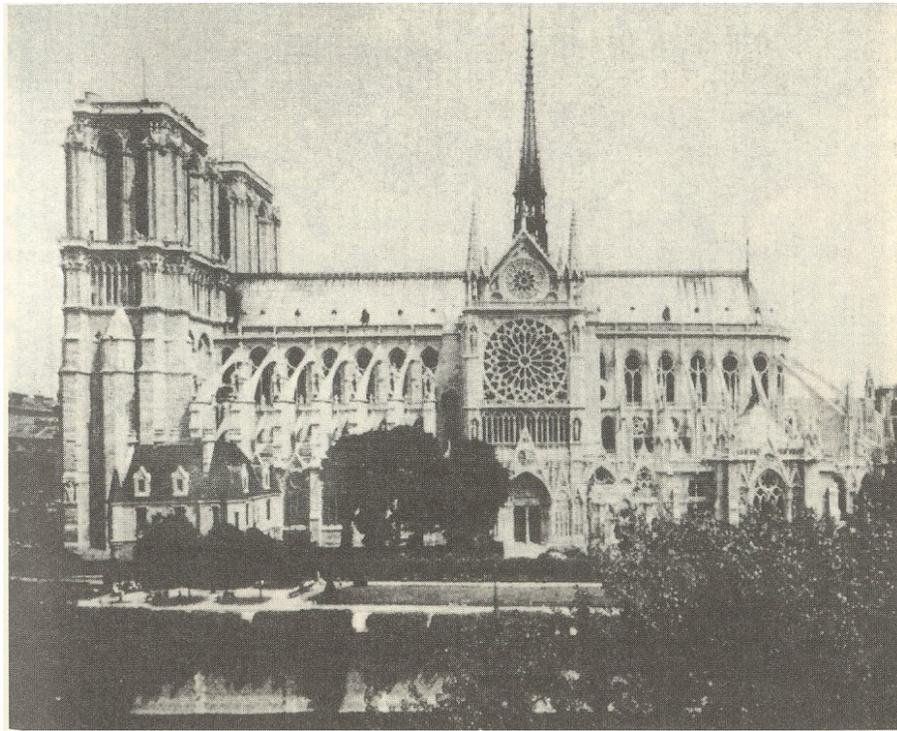


Figura 3.4: *Catedral de Notre-Dame de París [8]. Bajo un manto de pétrea belleza, se oculta el complejo sistema de contrafuertes. Sennet cierra el círculo estableciendo un lógico nexo entre la Basílica laterana (figura 3.1) y esta joya arquitectónica.*

Obvia decir que la arquitectura religiosa en los siglos posteriores a la Baja Edad Media no hizo sino perfeccionar en los detalles constructivos (materiales y sus puestas en obra), así como evolucionar la estética con las tendencias del momento. Con el tiempo, los estados modernos se consolidaron, se expandieron en imperios, y se volvió a la situación económica que permitió, como en tiempos a los romanos, construir sin la precariedad de medios de la Edad Media. Seguramente los métodos de análisis y dimensionamiento mejoraron, especialmente con la llegada del Siglo de las Luces, pero los materiales habían tocado techo tecnológico, y no hubo cambios estructurales significativos hasta la aparición del hormigón y el acero. En realidad, con éstos, tampoco hubo especiales cambios estructurales en lo que a contrafuertes se refiere. Cuando fue necesario construirlos, lo hicieron readaptando sus dimensiones a las propiedades de los nuevos materiales, especialmente con el hormigón, ya que el acero, después de intentar imitar a las construcciones antiguas⁵, descubrió su propia personalidad traccionable, y sirvió para solucionar el mismo problema arriostrando a base de tirantes.

⁵ caso paradigmático, el puente de Coalbrookdale

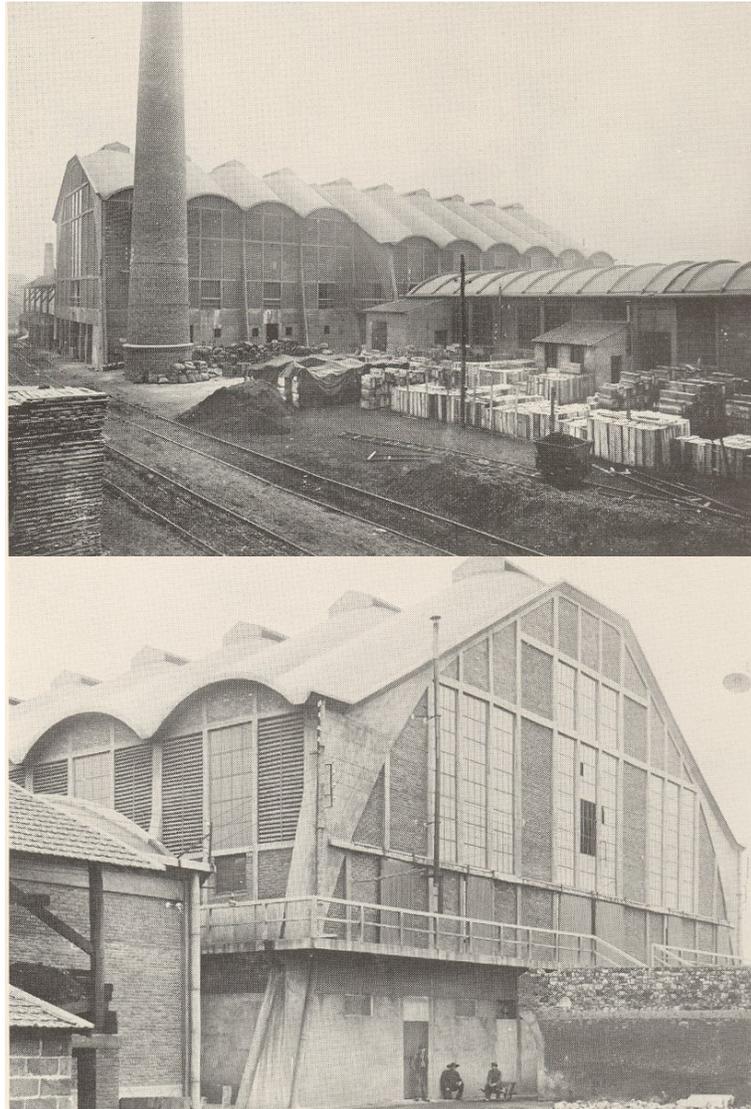


Figura 3.5: *Fábricas de vidrio del Centro en Montluçon*[3]. *Freyssinet reinterpretando el contrafuerte clásico, con hormigón armado.*

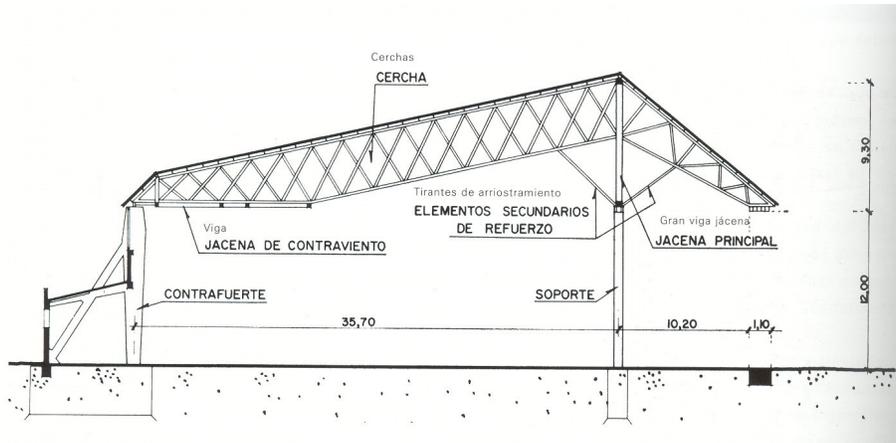


Figura 3.6: Hangar del aeródromo de Torrejón[4]. La manejabilidad y resistencia del hormigón permite construir contrafuertes con formas aligeradas a la par que bellas.

Hoy en día la construcción religiosa ha disminuído como los practicantes, y las nuevas iglesias suelen tender a adaptarse a la edificación del entorno, o a hacer ligeras reinterpretaciones de las iglesias tradicionales con los nuevos materiales. Si queremos ver sistemas de contrafuertes, los tenemos que desenlazar de las nuevas grandes estructuras singulares, las que sirven de templos a las nuevas divinidades veneradas por la humanidad, caso del dinero (edificios industriales) o los deportistas (estadios y otras grandes instalaciones). Pero, al contrario que en el medievo, esta vez sí, la funcionalidad suele ir íntimamente ligada al espacio que genera en el conjunto.

Apéndice A

Trabajo de campo

Para ejemplificar lo anteriormente expuesto, se comentan a continuación algunos ejemplos, cercanos y actuales, o que, afortunadamente, han llegado hasta nuestros días.

A.1. Contrafuertes de contención de ferrocarril en La Coruña

Decidí incluir este ejemplo para describir los puntos extremos de la evolución del pensamiento desde el talud hasta la solución aligerada, si bien lo hago desde la visión de lo que aparenta, esto es, contrafuertes de mampostería careada que estabilizan el talud del túnel, y no de lo que podría ser en realidad, un muro cubierto de tierra, por la erosión de los años, y maleza, cuyas únicas partes visibles son la base y los contrafuertes.

El muro se encuentra situado a la entrada del túnel ferroviario que une Matogrande y el Campus de Elviña, y es recomendable acordar con Adif cualquier tipo de inspección por el importante riesgo que entraña el acercarse al muro tanto por la coronación como por la base.



Figura A.1: *Contrafuertes de contención de ferrocarril en La Coruña. Visión general: el careado de la mampostería en los tres planos visibles descarta que estemos ante los restos de un muro de trasdós inclinado completo.*



Figura A.2: *Contrafuertes de contención de ferrocarril en La Coruña. Visión desde la coronación del muro*



Figura A.3: *Contrafuertes de contención de ferrocarril en La Coruña. Detalle del conglomerante en las juntas (1). Si bien la base parece recientemente revocada con mortero convencional, el material en los contrafuertes parece diferente.*



Figura A.4: *Contrafuertes de contención de ferrocarril en La Coruña. Detalle del conglomerante en las juntas (2). Arañando con un cortaplumas, el material se disgrega con cierta facilidad, parece argamasa de cal, lo que, desde mis limitados conocimientos, apuntaría como pronto, al primer tercio del siglo XX, si no más antiguo. Habría que comprobar cuando se ejecutó ese tramo del ferrocarril hacia la terminal de pasajeros.*



Figura A.5: Muro de contención en el apeadero del ferrocarril en Miño. Por la erosionada superficie de hormigón, debió ser construido en los años 60-70. Los contrafuertes parecen un tanto sobredimensionados, y es posible por tanto, que tengan también un componente estético, de evocación a la antigüedad, desde el punto de vista del diseñador.

A.2. Muro de contención en el apeadero de ferrocarril de Miño

En la figura A.5 un ejemplo humilde de un muro de contención con contrafuertes, situado en el actual apeadero de Miño (no de la tristemente fuera de servicio estación de Miño-Castro). El estilo descuidado es conforme al entorno urbano degradado en el que está situado.



Figura A.6: *Muro de contención en el barrio de Ricardo Sánchez, Pontevedra*

A.3. Muro de contención en el barrio de Ricardo Sánchez, Pontevedra

Este gran muro de contención, bastante mejor dimensionado que el anterior, contiene las tierras entre fuertes desniveles en la zona nueva de la villa de Pontevedra. Ejecutado en los años 80, dos décadas más tarde, en una fase de redistribución de usos y equipamientos, quedó al descubierto.



Figura A.7: *Presa de Meicende. Vista general aguas arriba. La cerrada tiene una longitud de 285 metros, y la altura de la presa son 20 metros.*

A.4. Presa de Meicende

Como si hubiese sido construída para ilustrar a las primeras generaciones de ingenieros de la Escuela de La Coruña, que estudiaron en Arteixo a principios de los 90 en el edificio provisional, esta presa llama la atención del viajero que transita por la carretera antigua entre La Coruña y Arteixo¹. Ejemplo de la evolución de las presas de contrafuertes, Luciano Yordi la ensalza inicialmente[14] para, con una década perspectiva, criticar la decisión por los costes en su construcción[15]. Una obra para la historia, en cualquier caso.

¹En realidad, se construyó para abastecer la industria del polígono de la Grela



Figura A.8: *Presa de Meicende. Vista general del intradós*



Figura A.9: Presa de Meicende. Vista detalle del intradós. Cada una de las bóvedas tenía 1 metro de espesor, 11 metros de radio, lo que supuso un salto importante para lo que habitualmente se venía haciendo y 60° de desplome. Los contrafuertes tienen un ancho de 2.50 metros



Figura A.10: *Colegiata de Santa María del Sar. Visión lateral. Desde cualquier punto se entienden como descontextualizados, pero necesarios, los contrafuertes laterales (Foto: B. Lombardía)*

A.5. Colegiata de Santa María del Sar, Santiago de Compostela

Esta es la única obra que, por circunstancias, no pude visitar en persona, pero una amable compañera me cedió unas fotos. Me parece interesante a modo de contraste frente al resto de iglesias que se comentan a continuación. La colegiata de Santa María del Sar fue construida en el siglo XII, y su destino natural hubiera sido, como en otros intentos románicos de imitar la ingeniería romana, el colapso, de no haber construido los arbotantes entre los siglos XVII y XVIII.

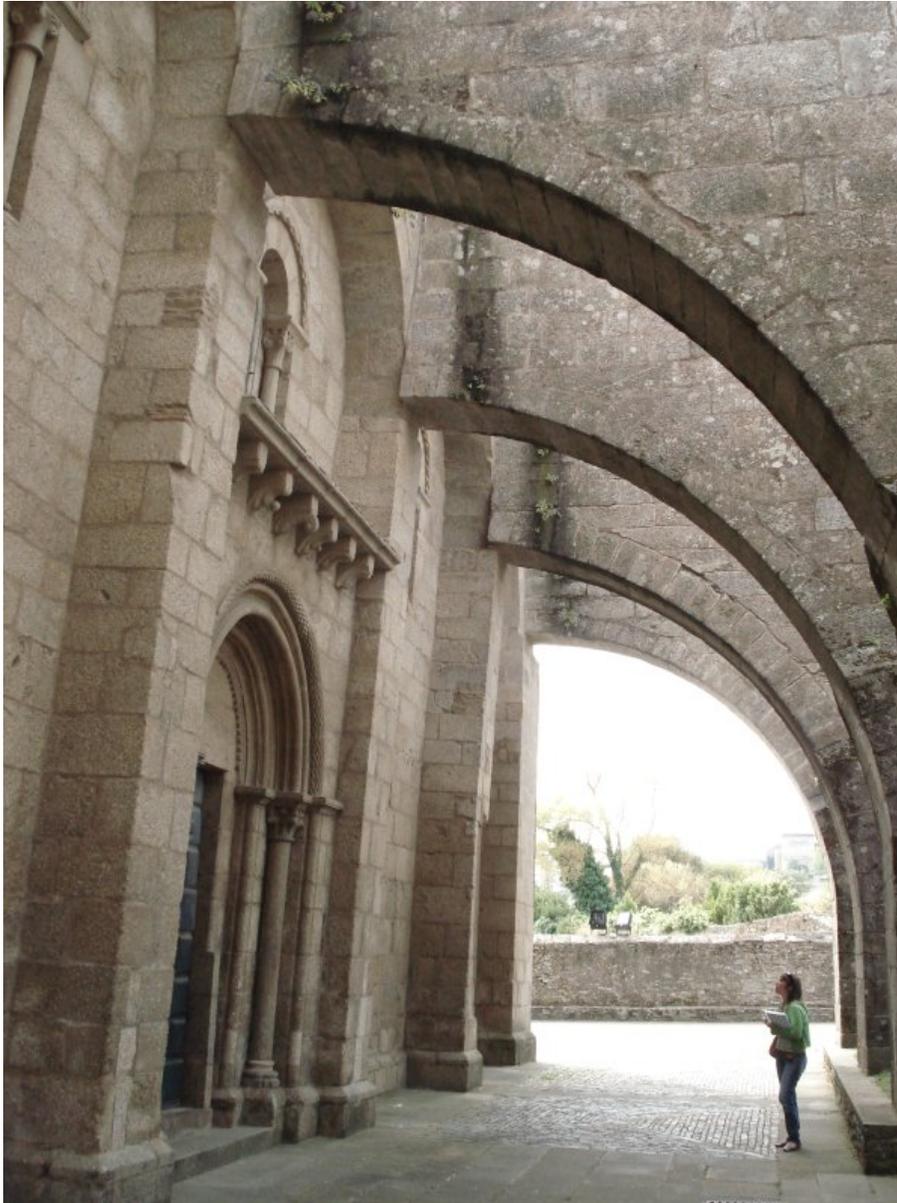


Figura A.11: *Colegiata de Santa María del Sar. Detalle de arbotante. Obsérvese la inclinación del muro lateral y el contacto con el contrafuerte. (Foto: B. Lombardía)*



Figura A.12: *Iglesia de Santa María del Azogue, Betanzos. Fachada*

A.6. Iglesia de Santa María del Azogue, Betanzos

Como comentamos ya, el gótico conlleva a la evolución estética del románico un progreso estructural. Este es el caso de la humilde iglesia de Santa María del Azogue, del siglo XIV, en la que la desnudez de ornamentos deja a la vista el esqueleto de piedra.



Figura A.13: Iglesia de Santa María del Azogue, Betanzos. Sistemas de contrafuertes laterales y en el ábside



Figura A.14: *Iglesia de Santa María del Azogue, Betanzos. Visión interior. El complejo sistema de arcos apuntados y naves laterales*



Figura A.15: *Iglesia de Santiago Apóstol, Pontevedra. Fachada.*

A.7. Iglesia de Santiago Apóstol, Pontevedra

Como consolidación de los conceptos desarrollados en la Baja Edad Media, esta iglesia del siglo XVIII fusiona contrafuertes y pilares en la unión de la nave central y las laterales.



Figura A.16: *Iglesia de Santiago Apóstol, Pontedeume. Interior. Impresionante nave central apoyada en las naves laterales y los contrafuertes que arrancan de ellas por el exterior.*



Figura A.17: *Iglesia de Santiago Apóstol, Pontedeume. Detalle de contrafuertes en el ábside.*



Figura A.18: *Nave industrial en Betanzos*

A.8. Nave industrial en Betanzos

Esta nave industrial de hormigón armado, está cercana a la estación de ferrocarril de Betanzos-Infesta. Semiabandonada, parece esconder un sistema de contrafuertes a tres niveles, que se aprecian en los portones de la fachada.



Figura A.19: *Iglesia de Santiago Apóstol, Narón. Visión general interior.*

A.9. Iglesia de Santiago Apóstol, Narón

No he podido evitar terminar con un ejemplo de lo que sucede cuando se *reinterpreta* un estilo sin comprender la estructura que la sustenta. En esta iglesia de reciente construcción en Narón, se copiaron todos los tópicos de una iglesia: una nave central amplia apoyada, aparentemente, en naves laterales con velados contrafuertes exteriores, y tejado a dos aguas. El problema viene cuando no se comprende como se sustenta el tejado en unos casos y otros: todo el peso del forjado de la techumbre descansa sobre celosías y pilares, lo que en provoca en la realidad, cargas verticales principales frente a empujes casi despreciables, por lo que se podría haber resuelto con unos pilares decentes. Pero más allá, el problema no es sólo económico: cualquier devoto visitante puede detectar y observar sin mucho esfuerzo una grieta que parece demostrar que el arquitecto no entendió como funcionaba la techumbre apoyada cual placa sobre la celosía. Y fijándose uno un poco más, se pueden observar más fisuras de peso propio y, en el entorno de algunos pilares, de punzonamiento de placa.



Figura A.20: *Iglesia de Santiago Apóstol, Narón. Detalle de fisuración (1). Grieta que arranca desde el apoyo sobre la celosía de madera, y fisura de punzonamiento alrededor del pilar*



Figura A.21: *Iglesia de Santiago Apóstol, Narón. Detalle de fisuración (2). Grietas de flexión por peso propio*

Bibliografía

- [1] De la Rosa Falcó, G. *Obras hidráulicas para control y abastecimiento del agua en Guanajuato(Siglos XVI al XX). Antiguas Obras Hidráulicas en América. Actas del seminario México 1988.* CEHOPU. MOPT, 1989.
- [2] Díaz-Marta, J. y García-Diego, J.A. *Las obras hidráulicas españolas y su relación con las americanas.* Antiguas Obras Hidráulicas en América. Actas del seminario México 1988. MOPT, 1989.
- [3] Fernández Ordóñez, J.A. *Eugène Freyssinet.* Ediciones 2C, 1978
- [4] Fernández Ordóñez, J.A. y Navarro Vera, J.R. *Eduardo Torroja, Ingeniero.* Ediciones Pronaos, 1999.
- [5] Guarda, G. O.S.B. *Las obras hidráulicas en el reino de Chile. Antiguas Obras Hidráulicas en América. Actas del seminario México 1988.* CEHOPU. MOPT, 1989.
- [6] Icaza Lomelí, L. *Arquitectura hidráulica en la Nueva España. Antiguas Obras Hidráulicas en América. Actas del seminario México 1988.* CEHOPU. MOPT, 1989.
- [7] Moreno Gallo, I. *Vías romanas: ingeniería y técnica constructiva.* Ministerio de Fomento CEDEX-CEHOPU, 2004.
- [8] Sennet, R. *Carne y piedra.* Alianza Editorial, 1997.
- [9] Violle-le-Duc, E. *La construcción medieval.* Instituto Juan de Herrera, CEDEX-CEHOPU, 1996.
- [10] Torroja Miret, E. *Razón y ser de los tipos estructurales.* Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto de Ciencias de la Construcción «Eduardo Torroja»

- [11] VV.AA. *Ingeniería Hispano Musulmana XII. Curso de Verano de Ingeniería Civil, Toledo 8 al 15 de julio de 2002*. Colección Ciencias, humanidades e ingeniería nº73. Colegio de Ingenieros, 2003.
- [12] VV. AA. *The builders: marvels of engineering*. National Geographic Society, 1992.
- [13] VV.AA. *Retrato de un hombre: Luciano Yordi de Carricarte*. La Voz de Galicia, 1978.
- [14] Yordi de Carricarte,L. *La presa de bóvedas múltiples de Meicende*. Revista de Obras Públicas, nº 2967 Julio 1962.
- [15] Yordi de Carricarte,L. *La presa y el aprovechamiento hidroeléctrico del río Salas*. Revista de Obras Públicas, nº3087 Julio 1972.