

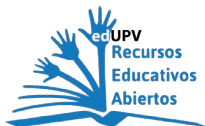
The background image shows a perspective view through a series of stone arches. The arches are constructed from dark, rough-hewn stones. The light from the end of the passage creates a strong contrast, highlighting the texture of the stone and the cobblestone path that leads away. On the left, a wall with faint, etched architectural drawings is visible.

SISTEMI COSTRUTTIVI VOLTATI EL ARCO Y LA BÓVEDA

Graziella Bernardo
Luis Manuel Palmero Iglesias

SISTEMI COSTRUTTIVI VOLTATI

EL ARCO Y LA BÓVEDA



http://tiny.cc/edUPV_rea

Colección *Académica*

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita:

Bernardo, Graziella ; Palmero Iglesias, Luis Manuel. (2022). *Sistemi Costruttivi Voltati / El arco y la bóveda*. Valencia: edUPV. doi.org/10.4995/REA.2022.642301

Autoría

Graziella Bernardo

Luis Manuel Palmero Iglesias

Editado por edUPV , 2022

Ref: 6423_01_01_01

<https://doi.org/10.4995/REA.2022.642301>

Imagen de portada

Scorcio del borgo di Aliano, Matera, foto degli autori, 2020 / Vista del pueblo de Aliano, Matera, foto de los autores, 2020

©de los textos y las imágenes: los autores

ISBN: 978-84-1396-094-4

Si el lector detecta algún error en el libro o bien quiere contactar con los autores, puede enviar un correo a edicion@editorial.upv.es



Sistemi Costruttivi Voltati / El arco y la bóveda / edUPV

Se permite la reutilización de los contenidos mediante la copia, distribución, exhibición y representación de la obra, así como la generación de obras derivadas siempre que se reconozca la autoría y se cite con la información bibliográfica completa. No se permite el uso comercial y las obras derivadas deberán distribuirse con la misma licencia que regula la obra original.

Homines dum docent discunt
Epistulae Morales ad Lucilium
Lucio Anneo Seneca

BIOGRAFIA AUTORE | BIOGRAFÍA DEL AUTOR

Graziella Bernardo è ricercatrice in Architettura Tecnica presso l'Università degli Studi della Basilicata, dove svolge importanti ricerche in questo campo dal 2001. Consegue il Dottorato di Ricerca in "Scienza e tecnologia dei minerali e dei sottoprodotti industriali" presso l'Università degli Studi di Sassari. La sua attività di ricerca riguarda soprattutto lo studio dei materiali nell'ambito del restauro e l'utilizzo di tecnologie costruttive sostenibili e resilienti sviluppando una metodologia innovativa per la conservazione e il restauro di manufatti di interesse storico e artistico. Ha partecipato a numerosi congressi, corsi e seminari a livello nazionale e internazionale ed è stata ospite di numerose e prestigiose Università. È autrice di diverse pubblicazioni su riviste scientifiche, libri ed atti di importanti convegni nazionali ed internazionali, inoltre coordina diversi progetti scientifico di notevole rilevanza.

Graziella Bernardo es investigadora en Arquitectura Técnica en la Universidad de Basilicata, donde lleva a cabo importantes investigaciones en este campo desde 2001. Se doctoró en "Ciencia y tecnología de minerales y subproductos industriales" en la Universidad de Sassari. Su actividad investigadora se centra principalmente en el estudio de materiales en el campo de la restauración y el uso de tecnologías de construcción sostenibles y resilientes, desarrollando una metodología innovadora para la conservación y restauración de obras de interés arquitectónico, histórico y artístico. Ha participado en numerosos congresos, cursos y seminarios nacionales e internacionales y ha sido ponente invitada en numerosas universidades de prestigio. Es autora de varias publicaciones en revistas científicas, libros y actas de congresos nacionales e internacionales, asimismo, coordina diversos proyectos científicos de relevante importancia.

Luis Manuel Palmero Iglesias è professore titolare presso l'Universitat Politècnica de València. Dottorato di ricerca Europeus. Ha iniziato ad insegnare nel 1995, le sue aree di lavoro e ricerca riguardano i campi dell'ingegneria edile e dell'architettura e temi relativi alla conservazione e alla riabilitazione del patrimonio edilizio. Riconosciuto come Professore di eccellenza, nello svolgere la didattica in modo efficiente ed appassionato. Ha partecipato a importanti congressi, corsi e seminari a livello nazionale e internazionale ed è stato ospite di numerose e prestigiose Università. Ha all'attivo molte pubblicazioni in importanti riviste e con diverse case editrici, è ricercatore in progetti per concorsi nazionali ed internazionali. Attualmente è anche Editor in Chief della rivista *Vitruvio International Journal of Architecture Technology and Sustainability*.

Luis Manuel Palmero Iglesias es profesor titular de la Universitat Politècnica de València. PhD Europeus. Se inicia en la docencia en el año 1995, y sus áreas de trabajo e investigación han estado vinculadas a los campos de la ingeniería de edificación y la arquitectura, a temas relacionados con la conservación y rehabilitación del patrimonio construido. Reconocido como profesor de excelencia, desarrolla la docencia de forma apasionada y eficiente. Ha participado en importantes congresos, cursos y seminarios tanto a nivel nacional como internacional, siendo profesor invitado a numerosas y prestigiosas universidades. Cuenta con numerosas publicaciones en revistas y editoriales de reconocido prestigio. Es a su vez investigador en proyectos competitivos nacionales e internacionales. En la actualidad también es editor jefe de la revista *Vitruvio International Journal of Architecture Technology and Sustainability*.

RINGRAZIAMENTI | AGRADECIMIENTOS

Si ringrazia María Remedios Pérez, responsabile della casa editrice dell'UPV, per il suo supporto; il professore José Vicente Blat Lloréns (†), per aver fornito i riferimenti grafici a questo lavoro; Chiara Antonetti e Marica Merola, per il loro aiuto nell'impaginazione del libro.

Un ringraziamento speciale al professor Massimo Ricci, per le sue osservazioni e intuizioni sulla cupola del Brunelleschi e alle opere dell'architetto Rafael Guastavino, che rappresentano un modello esemplare di innovazione costruttiva legata alla tradizione artigianale; a tutti i ricercatori ed esperti che continuano a studiare con passione e impegno l'affascinante mondo dei sistemi costruttivi a volta.

Ai nostri studenti, i principali destinatari di questo libro, che sia utile per una loro crescita professionale, competente ed etica nello sviluppo di un'architettura basata sulla qualità, la sicurezza e la sostenibilità.

Agradecemos la colaboración de María Remedios Pérez, responsable de la Editorial UPV, al profesor José Vicente Blat Lloréns (†), por su legado en la parte gráfica de este trabajo; a Chiara Antonetti y Marica Merola, por su ayuda en la maquetación del libro.

Un especial agradecimiento al profesor Massimo Ricci, por sus observaciones y conocimientos sobre la cúpula de Brunelleschi y a las obras del arquitecto Rafael Guastavino que representan un modelo ejemplar de innovación constructiva ligada a la tradición artesanal; a todos aquellos investigadores y expertos que siguen estudiando con pasión y compromiso el fascinante mundo de los sistemas de construcción abovedados.

A nuestros alumnos, principales destinatarios de este libro, para que les sea útil en un crecimiento profesional competente y ético para el desarrollo de una arquitectura basada en la calidad, la seguridad, la sostenibilidad.

PREMESSA | PRÓLOGO

*“Un arco è costituito da due debolezze che,
appoggiate l’una all’altra,
formano una fortezza”.*

Leonardo Da Vinci

Il libro che avete tra le mani si propone di diffondere una serie di conoscenze sulla costruzione di archi e volte, con finalità principalmente didattiche e divulgative, nei confronti di un pubblico il più ampio possibile e non necessariamente del settore.

Il testo si concentra su diversi aspetti: la terminologia ricca esistente in questo ambito, i materiali e le tecniche costruttive impiegate nella realizzazione di queste opere ed infine gli aspetti strutturali e statici che, in tali sistemi, in accordo con i postulati dell’architettura moderna, rispondono anche al principio di coincidenza tra *forma e funzione*. L’arco e la volta sono due elementi che, nel corso della storia, hanno svolto un ruolo fondamentale nel mondo delle costruzioni. Che si tratti di palazzi, case, chiese, cattedrali, monumenti o costruzioni civili, le loro soluzioni variegata e funzionali offrono un ricco ventaglio di soluzioni che si basano sulla logica pura di un sistema di forze in equilibrio, rispondono ad un lavoro di costruzione meticoloso e conferiscono personalità alla costruzione, definendone lo stile architettonico.

Gli autori ritengono che la conoscenza più approfondita di questi temi aiuti a riscoprire la storia, in particolare quella architettonica, in modo da incuriosire ed avvicinare a questa disciplina, considerando che persino molti progettisti del nostro tempo ne rimangono lontani, relegandone la conoscenza ad un settore di tipo specialistico ed esclusivo, in molti casi legato alla critica d’arte o agli studi archeologici.

Il libro vuole anche fornire principi di carattere procedurale, trasmettendo l’idea che, per fare bene qualcosa, è necessario prima di tutto avere ben chiaro *che cosa* si voglia fare e successivamente *come* farlo, dunque il primo obiettivo deve essere l’individuazione del tema dello studio, riassunto in due parole: oggetto e metodo.

*“Un arco consta de dos debilidades que,
apoyadas una contra la otra,
forman una fortaleza”*

Leonardo Da Vinci

El libro que tienes en tus manos pretende difundir una serie de conocimientos acerca de la construcción de arcos y bóvedas, con fines principalmente didácticos y de divulgación, a un público lo más amplio posible y no necesariamente del sector.

El texto se centra en varios aspectos: la rica terminología que existe en este campo, los materiales y las técnicas constructivas que se utilizan en la realización de estas obras y, finalmente, los aspectos estructurales y estáticos que, en estos sistemas, atendiendo a los postulados de la arquitectura moderna, responden también al principio de coincidencia entre *forma y función*. El arco y la bóveda son dos elementos que, a lo largo de la historia, han tenido un papel fundamental en la construcción. Ya sea en palacios, casas, iglesias, catedrales, monumentos o construcciones civiles, sus soluciones variadas y funcionales ofrecen un rico conjunto de soluciones que se basan sobre la lógica pura de un sistema de fuerzas en equilibrio, atienden a una meticulosa puesta en obra y dan una personalidad a la construcción, definiendo su estilo arquitectónico.

Los autores consideran que el conocimiento más profundo de estos temas ayuda a redescubrir y apreciar la historia, en particular aquella de la arquitectura, una forma de motivar cierta curiosidad y acercamiento a esta disciplina, teniendo en cuenta que incluso muchos proyectistas de nuestro tiempo permanecen alejados de ella, relegando su conocimiento a un campo especializado y exclusivo, en muchos casos ligado a la crítica de arte o a los estudios arqueológicos.

El libro también pretende aportar principios relacionados con el proceso constructivo, transmitiendo la idea de que, para hacer algo bien, ante todo, hay que tener claro *qué* se quiere hacer, y luego *cómo* hacerlo,

Per quanto riguarda la pratica costruttiva gli elementi fondamentali sono due: i materiali e il modo di porli in opera, ciò che chiamiamo *tecnologia delle costruzioni*; per una lettura più 'antropologica' delle strutture bisogna poi aggiungere altri temi: l'uso dell'edificio, il suo valore simbolico e rappresentativo ed il collegamento al contesto.

È evidente, ma vale sempre la pena ribadirlo, che senza la capacità di gestire i materiali ed organizzare gli elementi costruttivi in un certo modo nello spazio non sarebbe possibile dare vita ai valori culturali delle opere di architettura. I materiali da costruzione vengono trasformati e combinati tra loro con tecniche specifiche e servono per creare spazi architettonici, organizzati in tipologie, destinati a usi specifici. Nel testo vengono esposte questioni fondamentali ed utili per il lettore, viene proposta la comprensione unitaria della meccanica delle strutture e della ragione dell'espressione formale di quest'ultima nell'ambito della storia dell'architettura, introducendo il dialogo tra due aspetti fondamentali: quello scientifico e quello umanistico. La gestione dell'aspetto strutturale delle costruzioni ha avuto diverse modalità, essendo storicamente basata soprattutto su una conoscenza empirica ed un approccio pratico, scollegato da una padronanza scientifica e razionale del suo funzionamento.

Le capriate di Palladio, ad esempio, immutate per l'efficacia della loro forma e per questo ancora oggi presenti, confermano l'evidenza che la *forma architettonica* non va di pari passo con il *progresso scientifico*, poiché a quel tempo non si conosceva la teoria del calcolo iperstatico. In termini costruttivi e di comportamento strutturale, nella storia dell'architettura sono individuabili due grandi categorie: quella che fa riferimento alle strutture voltate, o '*a spinta*', e quella costituita dalle strutture architravate, o '*a flessione*'. Attualmente i due modelli sopra citati continuano a coesistere e ad essere oggetto di una ricerca costante e sempre più approfondita, con il supporto di nozioni teoriche un tempo sconosciute e software di calcolo che aiutano nella progettazione, ma anche e soprattutto con l'impiego di una vasta gamma di materiali sempre più performanti ed in continua evoluzione: prima di ogni altra cosa, i materiali occupano sempre un ruolo chiave.

I materiali per così dire '*classici*' sono quelli che lavorano sottoposti a compressione e sono stati quelli impiegati in forma quasi esclusiva, almeno per costruzioni solide e durature nel tempo (escludendo quindi il legno),

por lo que el primer objetivo debe ser identificar cuál es objeto de estudio, resumido en dos palabras: materia y método.

En cuanto a la práctica constructiva los elementos básicos son dos, los materiales y la forma de utilizarlos, lo que solemos llamar en italiano *tecnologia delle costruzioni*; para una lectura más 'antropológica' de las estructuras hay que añadir otros temas: el uso del edificio, su valor simbólico y representativo y la conexión con el entorno.

Es evidente, pero siempre vale la pena recordarlo, que, sin la capacidad de disponer los materiales y organizar los elementos de la construcción de una determinada manera en el espacio, no sería posible dar vida a los valores culturales de las obras arquitectónicas. Los materiales constructivos se transforman mediante técnicas específicas, creando espacios arquitectónicos, ordenados en tipologías, destinados a usos específicos. En el texto se plantean cuestiones fundamentales y de aprovechamiento para el lector, plantear de forma unitaria la comprensión de la mecánica de la estructura y la razón de su forma dentro de la historia de la arquitectura, es decir, entrar en el diálogo entre dos aspectos fundamentales: el científico y el humanístico. La gestión del aspecto estructural de las construcciones ha tenido diferentes formas, estando ciertamente desconectada tanto en el tiempo como en el espacio en su conocimiento racional y en el dominio de su funcionamiento.

Las cerchas de Palladio, por ejemplo, no modificadas por la eficacia de su forma, y por ese motivo presentes en nuestros días, constatan la evidencia que *forma arquitectónica* no va en consonancia con *progreso científico* ya que en ese tiempo no se conocía la teoría del cálculo hiperestático. En términos constructivos y de comportamiento estructural, en la historia de la arquitectura es posible detectar dos grandes caminos: aquello que se refiere a las estructuras abovedadas, o '*de empujes*', y la constituida por estructuras adinteladas, o '*de flexiones*'. En la actualidad, los dos modelos mencionados siguen coexistiendo y son objeto de una investigación constante y cada vez más profunda, con el apoyo de nociones teóricas desconocidas en el pasado y programas informáticos de cálculo que ayudan a su comprensión, pero, también, con el uso de una amplia gama de materiales cada vez más eficaces y en constante evolución: antes que cualquier otra cosa, los materiales siempre juegan un papel determinante.

fino alla rivoluzione industriale, con la comparsa di quei nuovi componenti strutturali capaci di sopportare sforzi di trazione.

L'arco, la volta e la cupola si basano proprio sul loro impiego e per secoli sono stati gli unici principi costruttivi in grado di dar forma ad architetture straordinarie per forma, dimensione e carattere evocativo, che ancora oggi ammiriamo e studiamo. A tal proposito, a conclusione dei discorsi di carattere più generale, si è ritenuto opportuno riportare alcuni rilevanti esempi storici da ammirare, in cui l'arco, la volta o la cupola, o il loro uso congiunto, hanno segnato pietre miliari costruttive ed architettoniche nel corso dei secoli, ancora oggi oggetto di studi e ricerche di notevole interesse.

Nello specifico, il riferimento è alle opere dello spagnolo Rafael Guastavino, architetto valenciano che brevettò negli Stati Uniti un sistema costruttivo basato su archi e cupole in *'rasillas'*, e alla Cupola di Santa Maria del Fiore di Brunelleschi, il cui ingegnoso processo costruttivo è stato reso noto negli ultimi anni da esperti e studiosi del settore. La scelta di affrontare questi argomenti nell'ultima parte del libro vuole conferire un'aria romantica alla conoscenza della materia e suscitare interesse verso il campo della ricerca, dopo aver fornito ai nostri lettori le nozioni necessarie alla comprensione della logica costruttiva.

Los materiales '*clásicos*' son los que trabajan a compresión y eran los que se utilizaban casi exclusivamente, al menos para las construcciones que nos ocupan, sólidas y duraderas (excluyendo así la madera), hasta la revolución industrial, con la aparición de los nuevos componentes estructurales capaces de soportar esfuerzos de tracción.

El arco, la bóveda y la cúpula se basan precisamente en su uso, y durante siglos fueron los únicos principios constructivos capaces de dar forma a una arquitectura extraordinaria en cuanto a forma, tamaño y carácter evocador, que aún hoy admiramos y estudiamos. A conclusión de los discursos más generales, se ha considerado conveniente mencionar algunos relevantes y admirables ejemplos históricos, en los que el arco, la bóveda, la cúpula o, en su conjunto los dos, han marcado hitos constructivos y arquitectónicos a lo largo de los siglos, que todavía hoy son objeto de estudio e investigación de gran interés.

En concreto, se hace referencia a las obras del español Rafael Guastavino, arquitecto valenciano que patentó en Estados Unidos un sistema de construcción basado en arcos y cúpulas '*de rasillas*', y a la Cúpula de Santa María del Fiore de Brunelleschi, cuyo ingenioso proceso de construcción ha sido difundido en los últimos años por expertos y estudiosos del tema. La decisión de abordar estos temas en la última parte del libro significa imprimir un aire romántico al conocimiento de la materia, a su vez que abrir una puerta a la investigación, después de haber proporcionado a nuestros lectores las nociones necesarias para entender la lógica de estas construcciones.

INDICE | ÍNDICE

Premessa | Prólogo

ARCO | ARCO

Introduzione e cenni storici	
Introducción y antecedentes históricos.....	2 - 11
Parti e componenti di un arco	
Partes y componentes de un arco.....	14 - 29
Tipologie di arco	
Tipologías de arcos	
Classificazione in base alla forma	
Clasificación por su forma.....	32 - 45
Archi con funzioni specifiche	
Arcos con funciones específicas.....	46 - 55
Organizzazione costruttiva: casi particolari	
Organización constructiva: casos particulares.....	56 - 59
Costruzione di un arco	
Construcción de un arco.....	62 - 73
I materiali dell'arco in muratura	
Los materiales de los arcos en las obras de fábrica.....	76 - 83
Comportamento meccanico dell'arco	
Comportamiento mecánico del arco.....	86 - 93

VOLTA | BÓVEDA

Introduzione e cenni storici

Introducción y antecedentes históricos..... 96 - 103

Parti e componenti di una volta

Partes y componentes de una bóveda..... 106 - 109

Tipologie di volte

Tipologías de bóvedas

Classificazione in base all'origine

Clasificación por su origen..... 112 - 113

Classificazione in base alla forma

Clasificación por su forma..... 114 - 133

Materiali utilizzati nelle volte

Materiales utilizados en las bóvedas..... 136 - 143

Costruzione della volta

Construcción de la bóveda..... 146 - 151

Rafael Guastavino. La volta in folio "*alla catalana*"

Rafael Guastavino. Las bóvedas tabicadas "*a la catalana*" 154 - 163

Filippo Brunelleschi. La cupola a doppia calotta

Filippo Brunelleschi. La cúpula de doble hoja..... 166 - 177

(*ipotesi costruttiva* | *hipótesis constructiva* prof. Massimo Ricci)

Bibliografia | Bibliografía



Veduta della città di Craco, Matera, 2020
Vista de la ciudad de Craco, Matera, 2020



ARCO

INTRODUZIONE E CENNI STORICI

Introducción y antecedentes históricos

ARCO



introduzione e cenni storici

L'arco è il principio costruttivo che più di ogni altro incarna una corrispondenza perfetta tra materiale, forma e funzione. Fin dalla sua scoperta è stato impiegato, perfezionato e adattato a tutti gli stili e le epoche: un elemento fondamentale nel mondo dell'architettura che, declinato in diversi assetti figurativi e sistemi costruttivi, ha contraddistinto ogni linguaggio architettonico fino ai giorni nostri e caratterizzato molte delle opere più famose del mondo. Volendo ricercare l'origine di questo sistema si può ipotizzare che esso sia nato in primo luogo per rispondere all'esigenza di creare aperture di grandi dimensioni nelle pareti per poi essere man mano sviluppato dall'ingegno dei progettisti e dei costruttori fino al suo impiego nella realizzazione di sistemi strutturali molto più complessi, dalle straordinarie caratteristiche spaziali ed estetiche.

La soluzione più basilica ed immediata per l'apertura di varchi è dunque la prima ad essere usata nel mondo delle costruzioni: quella che prevede l'impiego di un singolo elemento longitudinale disposto al di sopra della bucatura, appoggiato alle estremità: questa parte, detta architrave, sostiene il peso della eventuale porzione di muro sovrastante e la trasmette agli elementi di sostegno laterali. L'architrave, dunque, deve avere caratteristiche materiche e dimensionali tali da poter sostenere i carichi verticali cui viene sottoposto, di entità variabile a seconda delle caratteristiche del muro e dell'apertura. Anticamente i materiali impiegabili per la realizzazione di un architrave erano il legno e la pietra e si rendeva necessario disporre di un elemento di dimensioni tanto più grandi quanto più aumentava la distanza da coprire tra i due appoggi. Pur non avendo nozioni esatte ed approfondite circa gli stati tensionali all'interno degli elementi costruttivi, con un approccio squisitamente pratico i costruttori erano arrivati alla conclusione che al crescere della lunghezza era necessario che aumentasse anche l'altezza dell'elemento orizzontale. La difficoltà non risiedeva solo nel reperire questi elementi di grandi dimensioni (non tutte le zone disponevano di

El arco es el principio constructivo que presenta la correspondencia perfecta entre material, forma y función. Desde su descubrimiento ha sido utilizado, perfeccionado y adaptado a todos los estilos y épocas: un elemento fundamental en el mundo de la arquitectura que, declinado en diferentes configuraciones figurativas y sistemas constructivos, ha diferenciado cada lenguaje arquitectónico hasta nuestros días y caracterizado muchas de las construcciones más famosas del mundo. Investigando el origen de este sistema, se puede suponer que nació en primer lugar para cubrir la necesidad de abrir huecos de gran tamaño en las paredes y, luego, fue desarrollado gradualmente por el ingenio de los diseñadores y constructores hasta su empleo en la realización de sistemas estructurales mucho más complejos, con características espaciales y estéticas extraordinarias.

La solución más básica e inmediata para la apertura de huecos, y por tanto, la primera que se utilizó en el mundo de la construcción, es la que contempla el uso de un único elemento longitudinal colocado horizontalmente por encima del hueco, apoyado en los extremos. Esta pieza llamada dintel, soporta el peso de la porción de muro que se encuentra arriba y lo transmite a los elementos laterales de soporte. El dintel, por tanto, debe tener unas características materiales y dimensionales tales que puedan soportar las cargas verticales a las que está sometido, cuya entidad varía en función de las características del muro y del propio hueco. Aparte, en la antigüedad, los materiales que se podían utilizar para la construcción de un dintel eran la madera y la piedra, y se precisaba contar con un elemento de mayor tamaño cuanto mayor fuera la distancia a cubrir entre los dos soportes. Aunque no tenían un conocimiento exacto y profundo de los estados tensionales en cada pieza de la construcción, con un enfoque puramente práctico, los constructores llegaron a la conclusión de que a medida que aumentaba la longitud, la altura del elemento horizontal también tenía que aumentar. La dificultad no sólo consistía en la búsqueda de estas piezas de gran tamaño (no todas las zonas contaban con

cave idonee o legname adeguato) ma anche nel trasportarli e nel metterli in opera, fattori che rendevano dunque molto difficile se non a volte impossibile la realizzazione di aperture di grande luce o con un notevole carico sovrastante. Nel caso di costruzioni dal carattere eccezionale, di natura sacra o rappresentativa come ad esempio templi o palazzi del potere si era disposti a compiere uno sforzo costruttivo maggiore, ma questo generalmente non si verificava nelle costruzioni ordinarie per le quali cui si dovevano quindi cercare alternative.

Il primo passo per arrivare alla definizione dell'arco, potrebbe essere stato la sostituzione del singolo elemento orizzontale appoggiato alle estremità, ossia l'architrave, con un sistema costituito da due elementi, a paragone più corti e meno alti, inclinati ed appoggiati l'un l'altro a formare un angolo. In questo modo, mantenendo la stessa altezza dell'elemento di fabbrica era possibile aumentare la distanza tra gli appoggi oppure, a parità di luce da coprire, potevano essere impiegati elementi di lunghezza minore. L'impiego di pezzi più piccoli risultava vantaggioso per il loro stesso ottenimento nonché per il trasporto e la messa in opera. A partire da questo primo arco "angolare" con la successiva suddivisione delle parti si arriva all'ottenimento di forme poligonali e, finalmente, frammentando ulteriormente gli elementi, all'arco di direttrice curva, con l'approssimazione della corda all'arco ed i singoli componenti di forma trapezoidale [Fig.1.1-1.2].

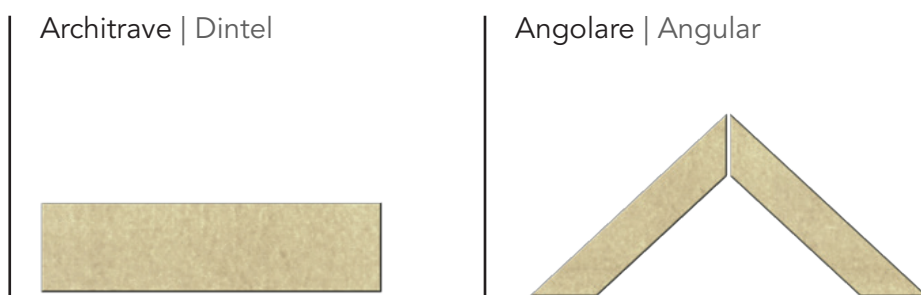


Fig. 1.1 Architrave e arco angolare | Dintel y arco angular

canteras adecuadas o con madera apropiada), sino también en el transporte y la instalación de las mismas, factores que hacían muy difícil, si no imposible a veces, la hendidura de grandes huecos o con mucha carga por encima. En el caso de las construcciones de carácter excepcional, naturaleza sagrada o representativa, por ejemplo como los templos o los palacios del poder, estaban dispuestos a realizar un mayor esfuerzo constructivo, pero generalmente no era así en las construcciones ordinarias para las que había que buscar alternativas.

El primer paso para llegar a la definición del arco, podría haber sido la sustitución del elemento horizontal apoyado en los extremos, es decir el dintel, por un sistema formado por dos piezas, en comparación más cortas y menos altas, inclinadas y apoyadas una sobre la otra para formar un ángulo. De esta forma, manteniendo la misma altura del elemento de fábrica, se podía aumentar la distancia entre los apoyos o, con la misma luz a cubrir, se podían utilizar elementos de menor longitud. El uso de piezas más pequeñas era ventajoso tanto para su obtención como para su transporte y colocación. A partir de este primer arco “angular” con la sucesiva subdivisión de sus componentes, se obtienen formas poligonales y, finalmente, fragmentando más los elementos, al arco de dirección curva, con la aproximación de la cuerda al arco desde el punto de vista geométrico y los distintos componentes en forma de trapecio [Fig.1.1-1.2].

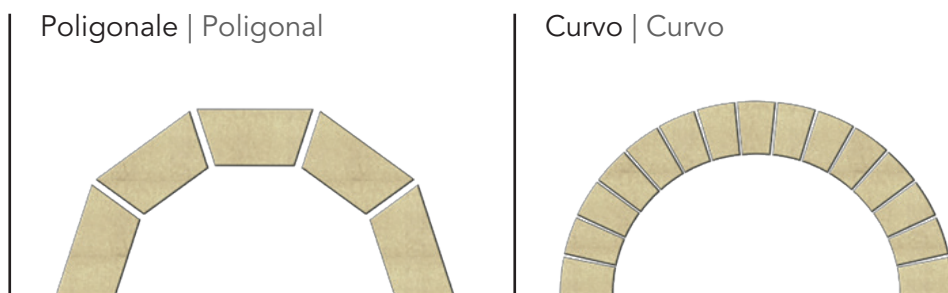


Fig. 1.2 Arco poligonale e curvo | Arco poligonal y curvo



Inoltre, un altro possibile antenato dell'arco potrebbe essere individuato nel cosiddetto arco falso, realizzato con conci a sviluppo orizzontale sovrapposti l'un l'altro con un leggero progressivo sbalzo a partite dai supporti laterali; questa struttura non può essere considerata un arco né per la sua modalità di lavoro né per la sua organizzazione costruttiva, tuttavia si può ritenere che abbiano comunque costituito una tappa tecnica intermedia verso la definizione dell'arco a conci.

L'arco può essere definito come quell'elemento strutturale a sviluppo bidimensionale e direttrice curvilinea che permette di trasmettere i carichi che riceve dall'alto sottoforma di risultanti spingenti su due elementi di appoggio puntuali. Nell'arco costituito da elementi lapidei l'organizzazione costruttiva è tale da far sì che i suoi elementi componenti siano sottoposti, in uno stato di equilibrio, solo a sforzi di compressione; questo non vale più nel caso di quei sistemi che per organizzazione costruttiva e materiali ammettono di essere sollecitati anche a flessione, come nel caso del cemento armato e dell'acciaio. L'arco semplice tramite traslazione o rotazione può generare strutture più complesse, come le volte.

Volendo tracciare un sintetico excursus dell'uso dell'arco nel corso della storia risulta evidentemente difficile datare il suo primo impiego. Tuttavia, sono pervenute sino a noi testimonianze che ne attestano la conoscenza già dai tempi dell'Antico Egitto, i quali lo usarono, ad esempio, nella tomba di Bet Kallaf e nella mastaba di Saqqara, risalenti al terzo millennio a.C., ma come costruttori preferivano comunque di molto l'architrave.

I Greci, come gli Egiziani, usavano preferenzialmente l'architrave, lasciando l'impiego dell'arco pressoché assente o piuttosto raro nelle costruzioni monumentali. Gli Etruschi, al contrario, svilupparono la costruzione di archi semi-circolari in muratura con grandi conci, di cui abbiamo testimonianza in strutture ipogee e nelle porte di accesso ad alcune città in Umbria.



Aparte, otro posible antecedente del arco podría identificarse en el llamado “falso arco”, realizado con sillares de desarrollo horizontal superpuestos uno sobre otro con un ligero voladizo progresivo a partir de los apoyos laterales. Esta estructura no puede considerarse un arco ni por su forma de trabajo ni por su organización constructiva, sin embargo, puede considerarse que constituyó un paso técnico intermedio hacia la definición del arco de sillería.

El arco puede definirse como aquel elemento estructural de desarrollo bidimensional y dirección curvilínea que permite transmitir las cargas que recibe desde arriba, en forma de empuje sobre dos elementos de apoyo puntuales. En el arco ejecutado por obras de fábrica, la organización constructiva es tal que los elementos que lo componen están sometidos, en estado de equilibrio, únicamente a esfuerzos de compresión; esto ya no se aplica en el caso de aquellos sistemas cuyos materiales permiten que también sean sometidos a esfuerzos de flexión, como es el caso del hormigón armado y el acero. El simple arco, por traslación o rotación puede generar estructuras más complejas, como las bóvedas.

Es difícil datar una fecha aproximada del empleo del arco como elemento constructivo, sin embargo, han llegado a nosotros pruebas de su utilización desde la época del antiguo Egipto, por ejemplo, en la tumba de Bet Kallaf y en la mastaba de Saqqara, que se remontan al tercer milenio antes de Cristo, pero como constructores preferían mucho más el dintel.

Los Griegos, al igual que los Egipcios, utilizaron preferentemente el dintel, dejando el empleo del arco casi ausente o bastante raro en las construcciones monumentales. Los Etruscos, por su parte, desarrollaron la construcción de arcos semicirculares de sillería con grandes dovelas talladas con gran precisión, de los que tenemos constancia en construcciones subterráneas y unas puertas de entrada de algunas ciudades de Umbría.

I Romani ripresero dagli Etruschi l'uso dell'arco a tutto sesto, nel corso dei secoli ne perfezionarono la costruzione e ne diffusero l'uso in tutto il loro vasto territorio, impiegandolo nella realizzazione di tutti i tipi di edifici (pubblici, religiosi e militari) e sperimentando l'applicazione di diversi materiali come mattoni, pietre e cemento romano. L'arco permise ai romani di costruire grandi opere come teatri, anfiteatri e terme ed importanti infrastrutture come ponti e acquedotti [Fig.1.3], strutture di valore fondamentale sia punto di vista culturale che simbolico nonché per ragioni strategiche, architetture che contribuirono all'affermazione del loro dominio in tutta Europa. Dai romani fu persino inventata una tipologia di monumento commemorativo detto "arco di trionfo", costituito proprio da un arco (o più) di grandi dimensioni, arricchito e decorato per celebrare eventi o offrire un tributo a personalità importanti per vittorie belliche o ruoli sociali di spicco.



Fig. 1.3 Acquedotto di Segovia, Spagna | Acueducto de Segovia, España

Los Romanos tomaron el uso del arco de medio punto de los Etruscos y, a lo largo de los siglos, perfeccionaron su construcción y extendieron su uso por todo su vasto territorio, empleándolo en la construcción de todo tipo de edificios (públicos, religiosos, militares, ecc.) y experimentando con la aplicación de diferentes materiales como ladrillos, tejas, piedras y cemento romano. El arco permitió a los romanos construir grandes obras como teatros, anfiteatros y termas e importantes infraestructuras como puentes y acueductos [Fig.1.3], estructuras de fundamental valor cultural y simbólico, además de estratégico, que contribuyeron al establecimiento de su dominio por toda Europa. Los Romanos incluso inventaron un tipo de monumento conmemorativo llamado “arco de triunfo”, que consistía precisamente en un gran arco adornado y decorado para celebrar acontecimientos o realizar tributos a personalidades destacadas por sus victorias belicas o sociales.



Fig. 1.4 Castello Aragonese di Ortona, Italia | Castillo Aragonés de Ortona, Italia



Dopo la scissione dell'Impero Romano, i costruttori Bizantini d'Oriente continuarono ad usare l'arco semicircolare, portandolo fino alla Russia ed ai Balcani.

Durante il Medioevo l'arco viene molto impiegato tanto nello stile romanico, principalmente in forma semicircolare, quanto nel gotico europeo, in cui con la tipologia a sesto acuto questo elemento strutturale raggiunge forse la sua massima espressione dal punto di vista estetico in chiese, cattedrali e fortezze [Fig.1.4]. È questo il caso in cui si può fare una menzione particolare al famoso arco rampante, un ingegno costruttivo introdotto per eliminare i carichi che ricevevano la parete dalla navata principale, tema che verrà esposto con maggior dettaglio più avanti.

Nel Rinascimento e nel Barocco, nonché in tutti gli stili e le epoche successive, l'arco ha continuato ad essere ampiamente usato, anche e soprattutto in ambienti dal valore simbolico e rappresentativo come potevano essere luoghi sacri o di potere, assumendo di volta in volta caratteristiche differenti dal punto di vista del materiale e della geometria, come nel caso degli incredibili archi parabolici di Antonio Gaudí.

L'architettura moderna, anche come conseguenza dei progressi tecnologici e per l'impiego di nuovi materiali, ha pressoché eliminato dal suo linguaggio l'arco, adottandolo solo occasionalmente per soluzioni particolari, di tipo funzionale o estetico.

L'arco, trasformato, evoluto, adattato a nuovi materiali o nuovi usi, conserva tutt'ora la vitalità e l'utilità che ha fornito fin dalla sua comparsa ai costruttori di tutte le epoche, senza aver perso la grazia, l'armonia e l'insieme di quegli intrinseci valori plastici presenti nella sua stessa essenza curva.



Tras la división del Imperio Romano, los constructores bizantinos de Oriente siguieron utilizando el arco de medio punto, llevándolo hasta Rusia y los Balcanes.

Durante la Edad Media, el arco fue muy utilizado en el estilo románico, principalmente en forma semicircular, así como en el gótico europeo, en el que con la tipología de arco apuntado, este elemento estructural alcanzó quizás su máxima expresión estética en iglesias, catedrales y fortalezas [Fig.1.4]. Es en uno de estos casos donde podemos hacer especial mención al famoso arco arbotante, un ingenio constructivo para eliminar las importantes cargas que recibía el muro de la nave principal y que más adelante se explica con mayor detalle.

En el Renacimiento y en el Barroco, así como en todos los estilos y épocas posteriores, el arco continuó siendo ampliamente utilizado, sobre todo en entornos con un valor simbólico y representativo como los lugares sagrados o los lugares de poder, adoptando de vez en cuando características diferentes en cuanto a material y geometría, como en el caso de los increíbles arcos parabólicos de Antonio Gaudí.

La arquitectura moderna, en parte como consecuencia de los avances tecnológicos y el uso de nuevos materiales, prácticamente ha eliminado el arco de su lenguaje, adoptándolo sólo ocasionalmente para soluciones especiales de carácter funcional o estético.

El arco, transformado, evolucionado, adaptado a los nuevos materiales o a una nueva forma de utilizarlo, tiene hoy en día la vitalidad y la utilidad que desde su aparición ha proporcionado a los constructores de todas las épocas, sin haber perdido por ello la gracia, armonía y conjunto de valores plásticos presentes en su propia esencia.



Castello di Alicante | Castillo de Alicante



PARTI E COMPONENTI DI UN ARCO

Partes y componentes de un arco



Approcciare la nomenclatura utilizzata per descrivere un elemento costruttivo tradizionale e universalmente diffuso come l'arco richiede una selezione critica dei termini da definire; in questo capitolo, si farà riferimento solo alle parole più comunemente utilizzate ed attualmente in vigore. Tali termini saranno raggruppati in base ai diversi aspetti dell'arco: i suoi componenti costruttivi, le linee e le superfici che lo definiscono, le dimensioni geometriche che lo limitano, i giunti e le modanature che lo caratterizzano. La terminologia costruttiva definisce un linguaggio preciso e ricco, che, nel caso degli archi, così come delle volte, si è mantenuto nel corso della storia; va osservato che, a seconda del luogo e dell'epoca di costruzione, è possibile riscontrare differenze, ma risulta comunque facile capire il riferimento all'elemento costruttivo in questione. Si tratta di una particolarità arrivata fino ai nostri giorni, che in qualche modo contribuisce ad arricchire il mondo dell'arco e della sua costruzione.



Fig. 2.1 | portici di Bologna | Los pórticos de Bolonia

Abordar la nomenclatura utilizada para describir un elemento constructivo tradicional y universalmente difundido, como es el caso del arco, exige una acotación en cuanto a los términos que se van a definir; en este capítulo, sólo se hará referencia a los más usados y que actualmente tienen vigencia. Estos términos se agruparán, según atendamos, a sus componentes constructivos, a las líneas y superficies que los definen, a las dimensiones geométricas que los limitan, a las juntas y molduras que los caracterizan. La terminología constructiva define un lenguaje específico y preciso, que, en el caso de los arcos y de la bóveda, se ha mantenido a lo largo de la historia, cierto es que, según el lugar y la época de su construcción esta terminología resulta en algunos aspectos diferente pero fácilmente identificable con el elemento constructivo en cuestión. Es una particularidad que de alguna manera enriquece al elemento y a su puesta en obra y que ha trascendido hasta nuestros días.



Fig. 2.2 Archi ogivali e a tutto sesto, Castello, Palma di Maiorca
Arcos apuntados y circulares, Castillo, Palma de Mallorca

componenti costruttivi dell'arco

Cuneo o concio: ciascuno dei pezzi che compongono gli archi. A seconda del materiale utilizzato questi pezzi possono essere conci trapezoidali i cui piani di giunzione sono radiali e si incontrano al centro della direttrice dell'arco nel caso di costruzione "a secco", possono essere cunei un po' irregolari nel caso della muratura o possono essere parallelepipedi quando si utilizza il mattone.

I conci assumono nomi differenti a seconda della loro posizione:

Chiave di volta: il concio centrale dell'arco, che si trova nella sua parte più alta e lo chiude; spesso è di dimensioni maggiori rispetto agli altri conci. Questo pezzo può non esistere nel caso di archi con un numero pari di conci, per i quali si può parlare di arco senza chiave di volta. L'assenza di chiave di volta è solitamente comune negli archi a sesto acuto.

Controchiave: ciascuno dei conci adiacenti la chiave di volta. Questi pezzi sono "speciali" in quanto devono essere perfettamente scolpiti e posizionati, soprattutto se si tratta di muratura. Essi chiudono la parte superiore dell'arco insieme alla chiave di volta e devono quindi combaciare in modo che quando si procede alla rimozione della centina non si verifichino assestamenti o deformazioni che possano compromettere la stabilità dell'arco.

Imposta: è il punto di contatto di appoggio dell'arco sul piedritto, dove sono collocati i conci laterali alla base dell'arco con la cui posa in opera ha inizio il processo di costruzione; tali elementi possono essere chiamati "somiero" o "peduccio" e a volte sono più grandi degli altri conci.

Fianchi: sono le zone intermedie di un arco comprese tra i punti di imposta e la chiave di volta, considerate all'estradosso.

Spalla o Piedritto: è ciascuno degli elementi massicci, generalmente in muratura, tra i quali è costruito l'arco. Hanno funzione di sostegno e ricevono la risultante di tutti i carichi che agiscono sull'arco; più precisamente, con il loro peso contrastano la componente orizzontale di tale risultante inclinata, tendendo a verticalizzarla.

Dovela: cada una de las piezas que componen el arco. En función del material con que se construya el arco, estas piezas pueden ser sillares trapezoidales cuyos planos de junta son radiales y concurren en el centro de la directriz del arco. En el caso de la construcción “*en seco*”, pueden ser piezas algo irregulares en forma de cuña en caso de emplear mampostería o pueden ser también paralelepípedos cuando se emplea ladrillo.

Las dovelas adoptan diferentes nombres según su posición:

Clave: dovela central del arco, que está situada en la parte más alta del mismo y lo cierra superiormente; a menudo suele ser más grande que las otras dovelas. Puede no existir esta pieza, en el caso de arcos con dovelas pares, en este caso podemos hablar de un arco sin clave. La ausencia de clave suele ser frecuente en los arcos apuntados.

Contraclave: cada una de las dovelas adyacentes a la clave. Estas piezas son “especiales” en cuanto deben estar perfectamente labradas y colocadas, especialmente si las piezas son de sillería. Las dos piezas contraclave, junto con la clave, cierran la construcción del arco, por lo cual deben ajustar entre sí para que no se produzcan asientos y deformaciones en las operaciones de descimbrado que pongan en peligro la estabilidad del arco.

Arranque: punto de apoyo del arco sobre los estribos, donde se encuentran las dovelas con cuya colocación se inicia el proceso de ejecución de los arcos de fábrica; estos elementos se denominan “*salmer*” o “*almohadón*” y a veces son más grandes que las otras piezas.

Riñones: son las zonas intermedias del arco entre los arranques y la clave, consideradas por su parte exterior o extradós.

Estribo: es cada uno de los macizos, generalmente de fábrica, entre los que se tiende el arco, y por consiguiente le sirven de apoyo recibiendo la resultante de todas las cargas que actúan en él; precisamente, con su peso contrarrestan la componente horizontal de la resultante inclinada, tendiendo a verticalizarla y contenerla.



Fig. 2.3 Arco romano, Tarragona | Arco romano, Tarragona

Tirante: elemento posto al di sotto della linea di imposta o al di sopra dell'arco, generalmente metallico e sottoposto a sforzi di trazione; serve per contrastare, tramite la controventatura, la spinta in eccesso sui pilastri. Non è un elemento che fa parte dell'arco propriamente detto, il quale dovrebbe essere in grado di resistere al carico e alle spinte da solo. Viene utilizzato per rinforzare un sistema debole e prevenire il cedimento strutturale dell'arco.

Contrafforte: non fa parte dell'arco propriamente detto, ma talvolta può accompagnarlo; si tratta di un elemento costruttivo massiccio in muratura collocato in adiacenza al piedritto con lo scopo di contrastare ed assorbire l'eccesso di spinte orizzontale e oblique generate da un arco agli appoggi. Un elemento del gotico molto caratteristico, in quanto una delle estremità dell'arco del contrafforte volante era posta sul contrafforte stesso.

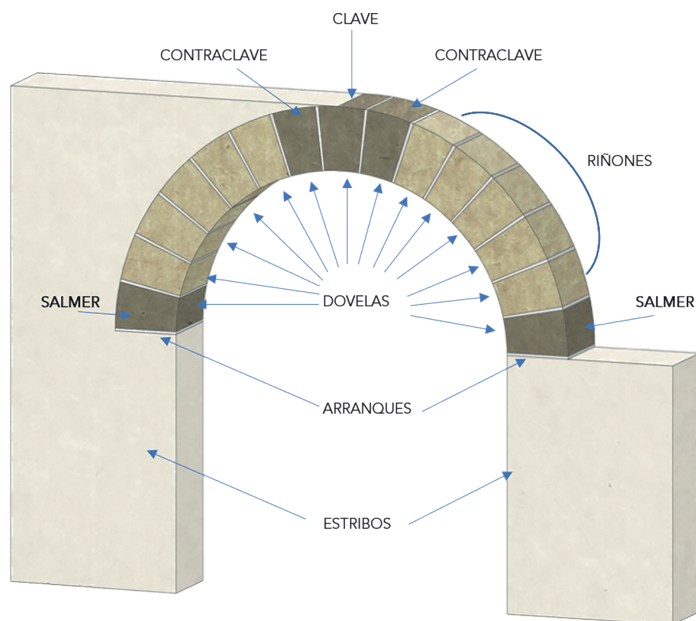


Fig. 2.4 Elementi costruttivi dell'arco | Elementos constructivos del arco

Tirante: pieza colocada por debajo de la línea de arranques o por encima del arco, generalmente metálica y sometida a un esfuerzo de tracción; sirve para contrarrestar, atirantando, el exceso de empuje en los estribos. No es un elemento que forma parte del arco propiamente dicho, lo cual debería ser capaz por sí mismo de resistir la carga y los empujes. Se utiliza para reforzar un sistema débil y evitar el fracaso estructural del arco.

Contrafuerte: no forma parte del arco propiamente dicho, pero a veces puede acompañarlo; es un elemento constructivo macizo, de mampostería, colocado junto al estribo con el fin de contrarrestar y absorber el exceso de empuje generado por un arco en los apoyos. Elemento muy característico del gótico, ya que uno de los extremos del arco arbotante era recayente sobre el propio contrafuerte.

linee dell'arco

Direttrice: l'elemento geometrico che determina il tracciato dell'arco, corrispondente alla linea mediana tra intradosso (linea interna) e estradosso (linea esterna). La direttrice adottata per un arco è decisiva per definirne la forma e dunque ne condiziona sia il valore estetico e che il funzionamento, poiché i carichi vengono trasmessi da un concio all'altro fino agli appoggi.

Linea delle pressioni: la linea immaginaria che unisce i punti di passaggio delle risultanti parziali della compressione nelle sezioni dell'arco considerate. Poiché il numero di sezioni possibili è infinito, per determinare questa linea vengono prese in considerazione solo quelle situate nei punti più caratteristici.

Linea di imposta: è la linea che unisce i punti di imposta di ciascun lato dell'arco, cioè i punti in cui iniziano il tracciato e l'esecuzione, dunque si configura sia come elemento geometrico che costruttivo. Normalmente corrisponde ad una linea orizzontale, ma ci possono essere casi (ad es. arco rampante) caratterizzati dall'avere i due punti di imposta a livelli diversi.



Fig. 2.5 Arco in pietra, Tarragona | Arco de piedra, Tarragona

Directriz: la componente geométrica que determina el trazado del arco, correspondiente a la línea media situada entre su intradós (línea interior) y trasdós (línea exterior). La directriz adoptada para un arco es determinante de su forma, por lo cual determina el valor estético del elemento y condiciona su manera de trabajo, al transmitirse las cargas de una dovela a la siguiente hasta los apoyos.

Línea de presiones: la línea imaginaria que une los puntos de paso de las resultantes parciales de compresión en las secciones consideradas del arco. Como el número de secciones posibles es infinito, para determinar esta línea, se toman en consideración sólo las secciones situadas en los puntos más característicos.

Línea de arranque: la línea que une los arranques a cada lado del arco, es decir los puntos en los que comienzan el trazado y la ejecución, así que se configura como un elemento tanto geométrico como constructivo. Normalmente corresponde a una línea horizontal, pero se pueden presentar casos (arco rampante) que se caracterizan por tener los arranques a distinto nivel.

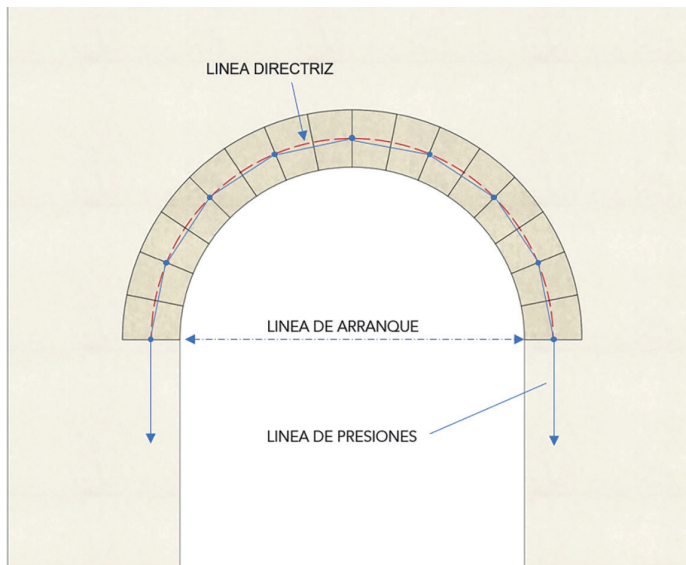


Fig. 2.6 Líneas del arco | Líneas del arco

superfici dell'arco

Fronte: è la superficie che definisce la faccia frontale dell'arco. In assenza di rivestimenti è possibile apprezzarvi la dimensione e la disposizione dei conci e i giunti tra essi; in alcuni casi può essere in rilievo sulla parete nel quale è inserito.

Intradosso: è la superficie curva che definisce l'arco inferiormente. Per analogia, la linea dell'intradosso è quella che delimita il fronte inferiore dell'arco e definisce la forma della centina utilizzata come elemento ausiliario di appoggio dei conci nella costruzione degli archi.

Estradosso: è la superficie curva che definisce superiormente l'arco. La linea che delimita il fronte superiore dell'arco è detta linea di estradosso.

Rinfianco: in un arco (o in una serie di archi) è la porzione della parete frontale che risulta compresa fra gli la linea di estradosso ed una retta orizzontale tangente all'arco stesso nel suo punto più alto [Fig. 2.5-2.6].



Fig. 2.7 Dettaglio arco di passaggio, Catalogna | Detalle de arco de paso, Cataluña

Frente: es la superficie que define el paramento anterior del arco. Si no está revestido, en él es posible apreciar el canto, la disposición y las juntas de las dovelas, pudiendo presentar en algunos casos relieve sobre el muro en el que se aloja.

Intradós: es la superficie que define el plano inferior del arco. Se llama línea del intradós a la línea que limita inferiormente el frente del arco y es la que define la forma de las cimbras, utilizadas como elemento auxiliar de apoyo de las dovelas en la construcción de los arcos.

Extradós: es la superficie definida por el paramento superior del arco. Se denomina línea de extradós la línea que limita superiormente el frente del arco.

Tímpano: en un arco (o serie de arcos) es la porción de la pared frontal que se encuentra entre la línea de extradós y una línea horizontal tangente al arco en su punto más alto [Fig. 2.5-2.6].

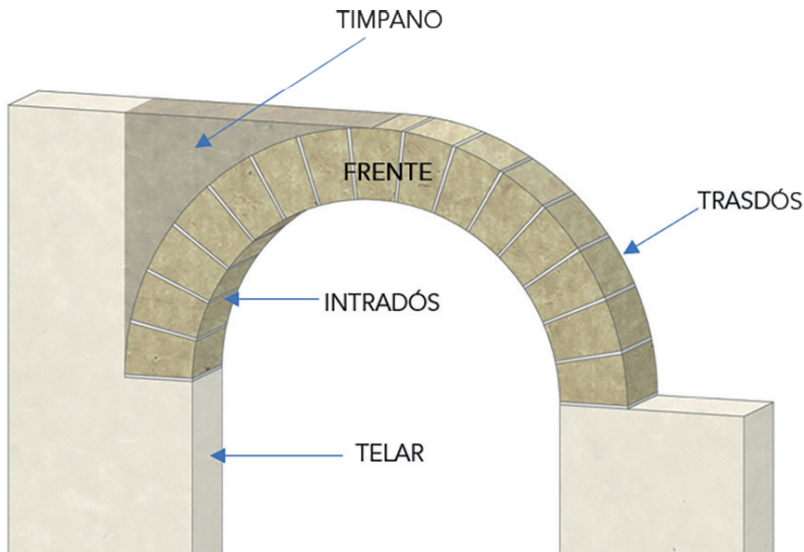


Fig. 2.8 Superfici dell'arco | Superficies del arco

dimensioni dell'arco

Luce o campata: è la distanza orizzontale misurata tra le imposte, ovvero i punti di appoggio dell'arco, e che definisce la larghezza del vuoto che definisce.

Freccia: è la distanza verticale misurata dal centro della linea di imposta dell'arco e la sommità del suo intradosso.

Sesto: questo termine si usa per mettere in relazione la luce, più precisamente la sua metà, e la freccia di un arco, dunque ci offre informazioni circa le proporzioni geometriche del sistema; quando la freccia è uguale alla metà della luce l'arco si dice a tutto sesto, in caso contrario sarà a sesto ribassato o rialzato.

Spessore: definisce la distanza radiale tra l'intradosso e l'intradosso dell'arco; se l'arco non è rivestito, è visibile nel fronte. Una volta determinati il tracciato e il materiale, essendo la profondità condizionata dal muro o dagli appoggi, lo spessore dell'arco è la dimensione da variare per aumentarne la resistenza.

Profondità: dimensione dell'arco nella direzione normale al suo piano; generalmente coincide con lo spessore del muro in cui alloggia o quello delle sue spalle [Fig. 2.7].

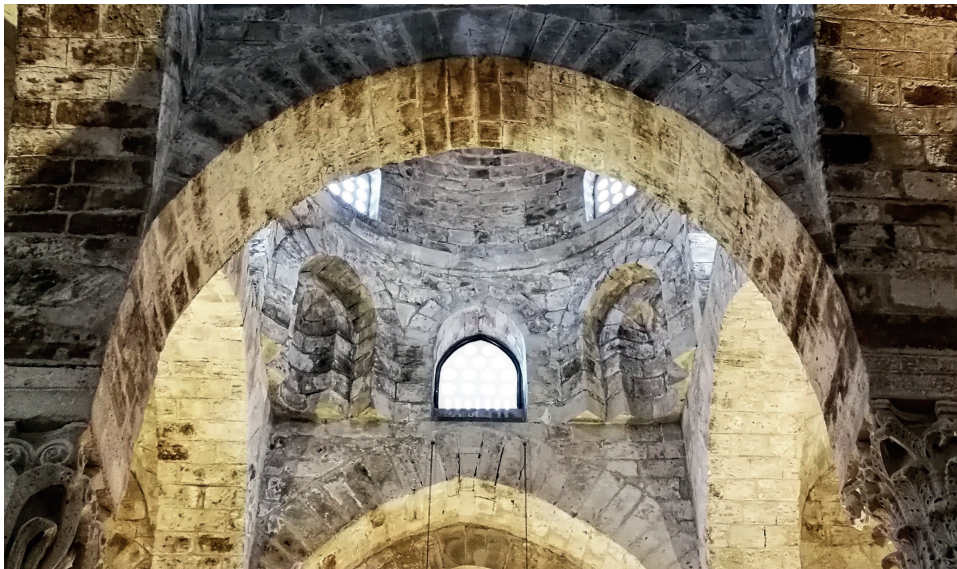


Fig. 2.9 Arco in pietra, Palermo | Arco de piedra, Palermo

Luz: es la distancia horizontal medida entre los arranques, que son sus puntos de apoyo, y que define la anchura del vano que salva.

Flecha: es la distancia vertical medida desde el centro de la línea de arranques del arco hasta la cima de su intradós.

Peralte: este término se utiliza para poner en relación la luz, más precisamente su mitad, y la flecha de un arco, entonces nos ofrece información sobre las proporciones geométricas del sistema; cuando la flecha es igual a la mitad de la luz, el arco se define de medio punto, de lo contrario será rebajado o peraltado.

Canto: define la distancia radial comprendida entre el intradós y el trasdós del arco; si el arco no está revestido, es visible en el frente. Prefijado el trazado y material, y con el espesor dado por el muro o los estribos, el canto del arco es la dimensión a variar para incrementar su resistencia.

Profundidad: dimensión del arco en la dirección normal a su plano; generalmente coincide con el espesor del muro en el que se aloja, o el de sus estribos [Fig. 2.7].

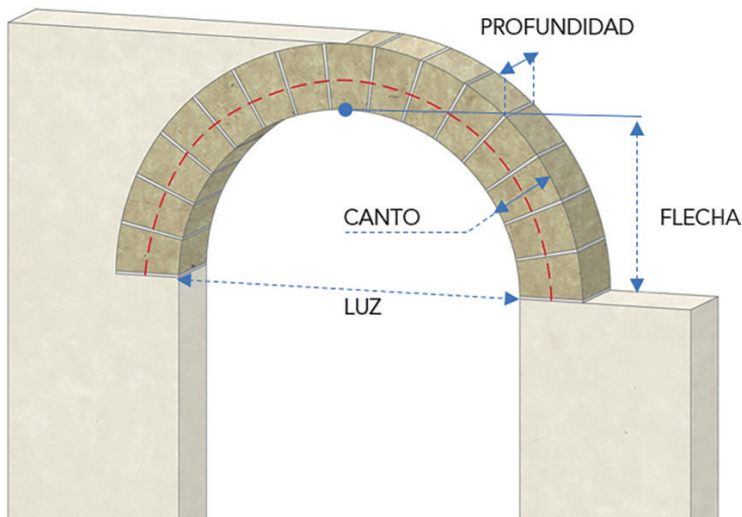


Fig. 2.10 Dimensioni dell'arco | Dimensiones del arco



Fig. 2.11 Archi e volte, Caixa Forum, Valencia | Arcos y bóvedas, Caixa Forum, Valencia

Giunto frontale: ciascuno dei giunti radiali tra i conci; equivale al giunto continuo, normalmente orizzontale, tra i corsi di una muratura. Questo tipo di giunto avrà una geometria differente a seconda del tipo di conci impiegati: sarà di spessore costante nel caso di conci trapezoidali, per esempio in pietra scolpita, mentre avrà uno spessore variabile, minore in prossimità dell'intradosso e via via più grande verso l'estradosso, nel caso di elementi a forma di parallelepipedo, come per esempio in un arco in mattoni.

Giunto interno: è il giunto tra i pezzi che compongono un arco. Può non esistere, come nel caso di conci formati da un unico pezzo, quando esiste, equivale al giunto, normalmente verticale, tra pezzi dello stesso corso di una muratura.

Tendel: cada una de las juntas radiales entre dovelas; equivale a la junta continua, normalmente horizontal, entre las hiladas de una obra de fábrica. Este tipo de junta tendrá una geometría diferente según el tipo de dovelas utilizadas: tendrá un espesor constante en el caso de sillares trapezoidales, por ejemplo, en piedra tallada, mientras que tendrá un espesor variable, menor cerca del intradós y gradualmente mayor hacia el extradós, en el caso de elementos con forma de paralelepípedo, como en un arco de ladrillo.

Llaga: es la junta entre las piezas que componen un arco. Puede no existir, como en el caso de dovelas formadas por una sola pieza, cuando existe, equivale a la junta, normalmente vertical, entre piezas de una misma hilada de obra de fábrica.

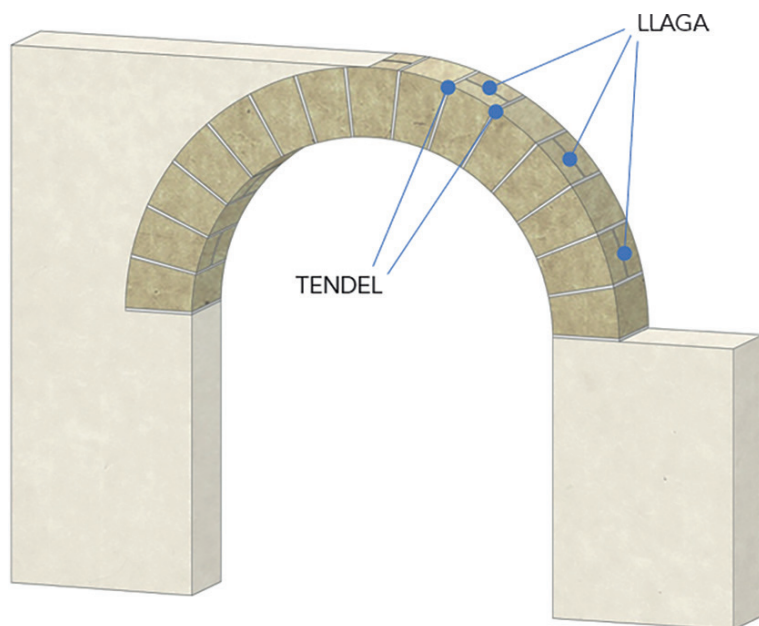


Fig. 2.12 Rappresentazione dei giunti dell'arco | Representación de las juntas del arco

modanature

Si tratta di elementi con funzione puramente decorativa e non strutturale.

Archivolto: è un elemento architettonico utilizzato per decorare la parte anteriori degli archi; è costituito da una fascia con una o più modanature, semplici o decorate, che coronano l'arco seguendone il perimetro. [Fig. 2.13]

Alfiz: elemento tipico dell'architettura araba, è costituito da un riquadro rettangolare che racchiude un arco a ferro di cavallo; può essere costituito da una cornice semplice, una modanatura, un rialzo della superficie murale o pannelli decorativi. [Fig. 2.14]



Fig. 2.13 Esempio di Archivolto, Valencia | Ejemplo de arquivoltas, Valencia

Son elementos con una función puramente decorativa y no estructural.

Arquivolta: es un elemento arquitectónico utilizado para adornar el frente de los arcos; consiste en una banda con una o varias molduras, simples o decoradas, que coronan el arco siguiendo su perímetro. [Fig. 2.13]

Alfiz o arrabá: elemento típico de la arquitectura árabe, consiste en una caja rectangular que encierra un arco de herradura; puede consistir en un simple marco, una moldura, un relieve la superficie de la pared o paneles decorativos. [Fig. 2.14]



Fig. 2.14 Esempio di Alfiz, Siviglia | Ejemplo de alfiz, Sevilla



Edificio con diverse tipologie di arco, Siviglia | Edificio con varias tipologías arcos, Sevilla



TIPOLOGIE DI ARCO

Tipologías de arcos



classificazione degli archi

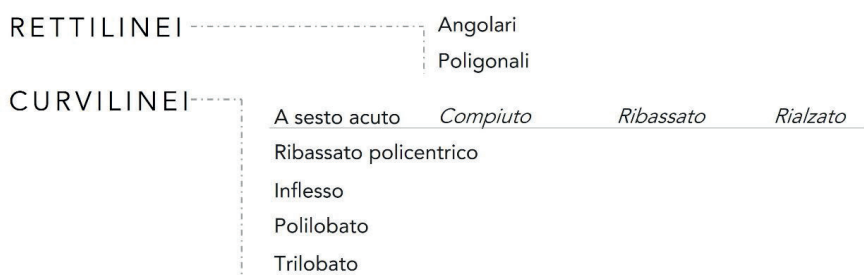
È possibile operare una classificazione degli archi secondo diversi criteri.

La principale di esse riguarda la forma geometrica del tracciato, in base alla quale è possibile individuare categorie e sottocategorie come indicato nello schema riportato di seguito.

SEMPLICI



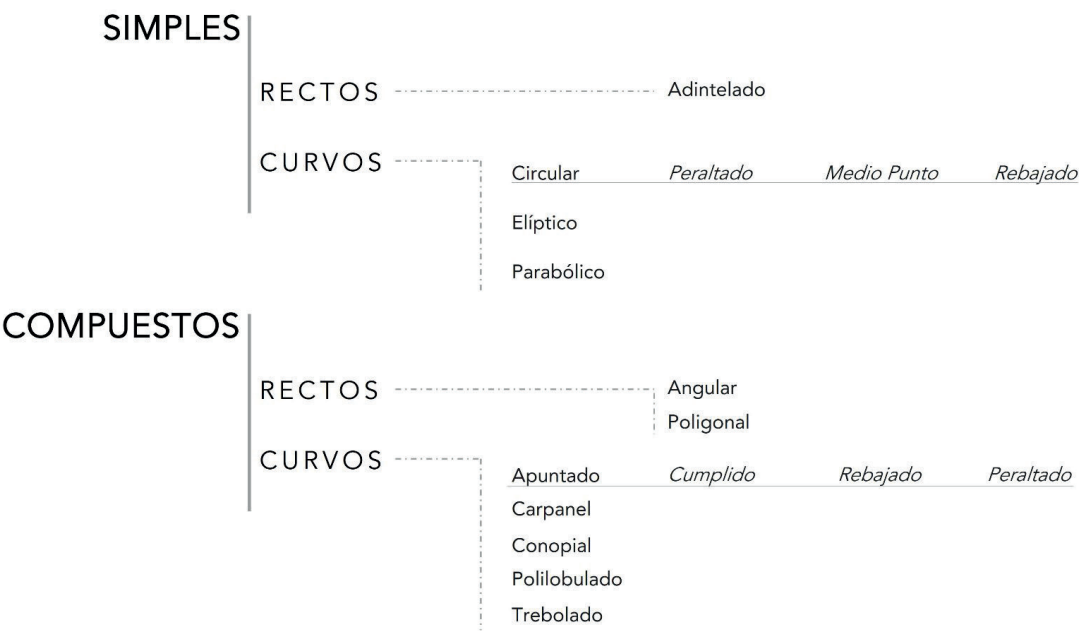
COMPOSTI



clasificación de los arcos

Es posible clasificar los arcos según diferentes criterios.

La clasificación principal se refiere a la forma geométrica de la directriz, según la cual es posible identificar varias categorías y subcategorías, como se muestra en el diagrama siguiente.



classificazione in base alla forma

ARCHI SEMPLICI

Appartengono a questo gruppo tutti quegli archi il cui tracciato segue una sola direttrice, che può essere una linea retta o curva.

Archi semplici rettilinei

Arco piano o architravato: ha l'intradosso orizzontale, cioè presenta una direttrice rettilinea. Non va confuso con l'architrave, formato da un unico pezzo. L'arco piano presenta giunti radiali tra i conci, la cui direzione converge in un punto collocato sull'asse di simmetria dell'arco; questo punto è solitamente situato ad una distanza pari a una volta e mezza la luce dell'arco a partire dalla linea di imposta. [Fig.3.1-3.2]

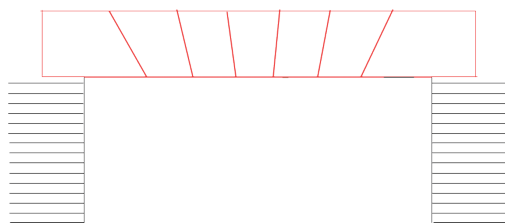


Fig. 3.1 Arco piano o architravato | Arco plano o adintelado

Archi semplici curvilinei

Circolari: questo gruppo comprende tutti gli archi la cui direttrice corrisponde ad un arco di circonferenza, tra i quali è possibile distinguere archi a tutto sesto [Fig.3.3], archi a sesto rialzato [Fig.3.5] ed archi a sesto ribassato [Fig.3.6].

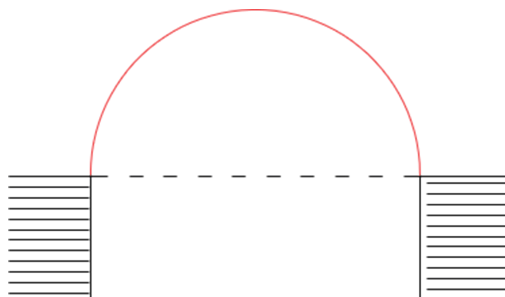


Fig. 3.3 Arco circolare a tutto sesto | Arco circular de medio punto

ARCOS SIMPLES

Corresponden a este grupo todos aquellos arcos cuyo trazado sigue una sola directriz, que puede ser una línea recta o curva.

Arcos simples rectos

Arco plano o adintelado: presenta su intradós horizontal, es decir que sigue una directriz recta. No debe confundirse con un dintel, hecho por una única pieza horizontal. El arco adintelado presenta entre las dovelas juntas radiales, cuya dirección concurre en un punto sobre el eje de simetría del arco; este punto suele estar situado a una distancia de una vez y media la luz del arco, desde la línea de arranques. [Fig. 3.1-3.2]



Fig. 3.2 Esempio di arco architravato | Ejemplo de arco adintelado

Arcos simples curvos

Circulares: dentro de este grupo se incluyen todos los arcos cuya directriz corresponda a una curva de circunferencia, pudiendo diferenciar entre ellos los que son de medio punto [Fig. 3.3], los peraltados [Fig. 3.5] y los rebajados [Fig 3.6].

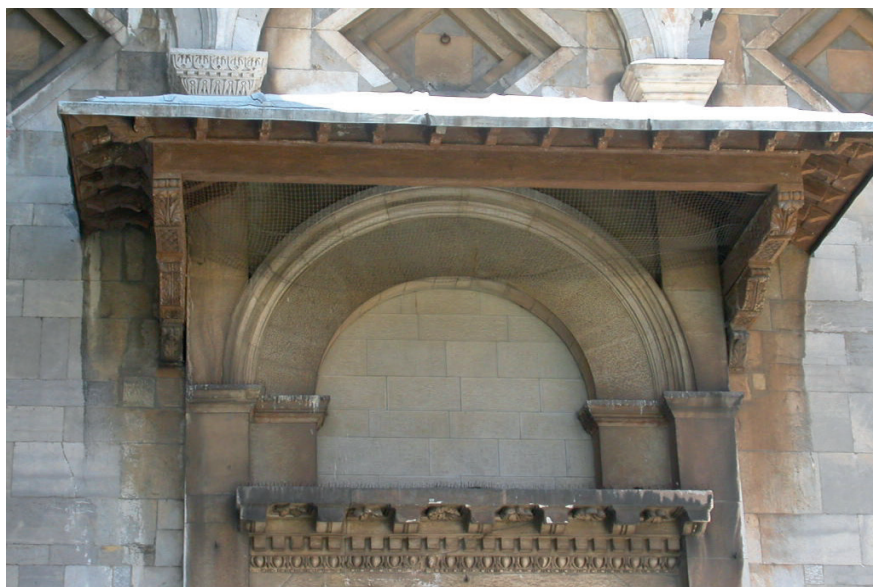


Fig. 3.4 Esempio di arco circolare | Ejemplo de arco circular

Tipologie di archi semplici circolari:

Arco a tutto sesto: la sua direttrice corrisponde ad un semicerchio, per cui la sua freccia, geometricamente parlando, coincide con la metà della campata e il centro del suo tracciato si trova sulla linea di imposta. È tipico delle costruzioni romane, romaniche e rinascimentali. [Fig. 3.3]

Arco a sesto rialzato: la sua direttrice è un arco di circonferenza il cui centro si trova al di sopra della linea di imposta, quindi la sua freccia è maggiore della sua semiluce. Il tipo più utilizzato, prima dai costruttori visigoti e poi dagli arabi, è stato l'arco a ferro di cavallo. [Fig. 3.5]

Arco a sesto ribassato: la sua direttrice è un arco di circonferenza il cui centro si trova al di sotto della linea di imposta, quindi la sua freccia è più piccola della semiluce. Tra i diversi archi ribassati tracciabili è possibile distinguere quello in cui i segmenti ottenuti unendo il centro del suo tracciato con i punti di imposta e la luce dell'arco formano un triangolo equilatero con angoli di 60° . [Fig. 3.6]

Arco de medio punto: su directriz corresponde a una semicircunferencia, por lo que su flecha, hablando en términos geométricos, coincide con la mitad de la luz y el centro de su trazado se encuentra sobre la línea de arranques. Este arco es típico de las construcciones romanas, románicas y renacentistas.

[Fig. 3.3-3.4]

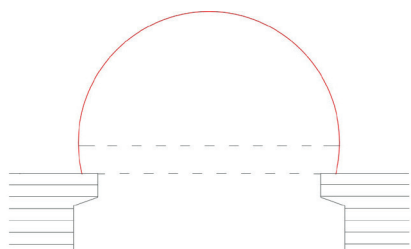


Fig. 3.5 Arco circolare a sesto rialzato
Arco circular peraltado

Arco peraltado: su directriz es un arco de circunferencia que tiene su centro por encima de la línea de arranque, así que su flecha es mayor que la semiluz. El tipo más utilizado, por los constructores visigodos primero y por los árabes después, ha sido el arco de herradura. [Fig. 3.5]

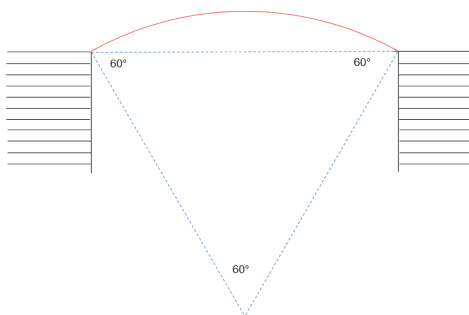


Fig. 3.6 Arco circolare a sesto ribassato
Arco circular rebajado

Arco rebajado: su directriz es un arco de circunferencia que tiene su centro por abajo de la línea de arranque, por lo que su flecha es menor que la semiluz. Entre los distintos arcos rebajados que se pueden trazar es posible distinguir al que se conoce como escarzano, y que corresponde al arco en el que los segmentos que se obtienen de unir el centro de su trazado con los arranques y la luz del arco forman un triángulo equilátero con ángulos de 60° . [Fig. 3.6]

Altri archi semplici curvilinei

Ellittico: corrisponde ad una semiellisse, dunque non ha un centro ma due fuochi. È conosciuto con il nome di arco di filo o arco di corda, per via del sistema di tracciatura più utilizzato nell'antichità. Questo arco viene solitamente sostituito dall'arco composto noto come arco ribassato policentrico che è molto più semplice da disegnare nella pratica costruttiva e non cambia sostanzialmente il suo funzionamento. [Fig. 3.7]

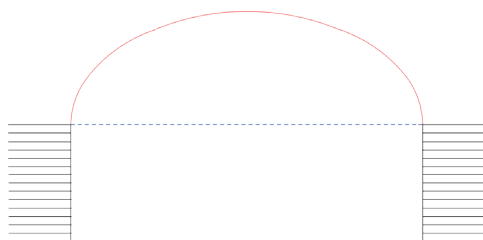


Fig. 3.7 Arco ellittico | Arco elíptico

Parabolico: la direttrice di questo arco segue il profilo di una parabola, ha un buon comportamento meccanico poiché che la linea delle pressioni segue praticamente la sua direttrice [Fig. 3.8-3.9]. È stato ampiamente utilizzato da A. Gaudí in molte delle sue opere, come ad esempio nella *Casa Milá*, conosciuta come *La Pedrera*. [Fig. 3.10]

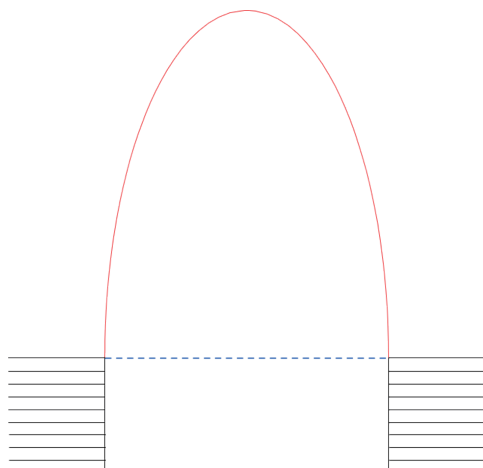


Fig. 3.8 Arco parabolico | Arco parabólico



Elíptico: corresponde a una semielipse, teniendo por ello no un solo centro, sino dos focos. Se le conoce por el nombre de arco del hilo o vuelta de cordel, debido al sistema de trazado más utilizado en la antigüedad. Este arco suele sustituirse por el arco compuesto denominado carpanel, que es mucho mas sencillo de trazar en la práctica constructiva y no modifica sustancialmente su forma de trabajo. [Fig. 3.7]

Parabólico: la directriz de este arco sigue el trazado de una parábola, habiéndose comprobado que tiene buen comportamiento mecánico, al seguir la línea de presiones prácticamente su directriz. [Fig. 3.8-3.9] Ha sido muy utilizado por Antonio Gaudí en muchas de sus obras, como por ejemplo en Casa Milá, también conocida como *La Pedrera* en Barcelona, donde el uso del ladrillo colocado de forma plana confiere un valor añadido a la ejecución y maestría del oficio de los maestros albañiles. [Fig. 3.10]

Fig. 3.9 Esemplio di arco parabolico, Tarragona | Ejemplo de arco parabólico, Tarragona



Fig. 3.10 Interno di Casa Milà, Barcellona | Interior de Casa Milà, Barcelona

ARCHI COMPOSTI

Questo gruppo comprende tutti quegli archi il cui tracciato è composto da più di una direttrice e quindi presenta più di un centro, ovvero quelli formati da due o più archi semplici.

Archi composti rettilinei

Angolari: hanno l'intradosso formato da due linee rette che si incontrano in vertice coincidente con la posizione della chiave di volta; generalmente i due lati inclinati formano un triangolo isoscele con la linea di imposta. [Fig. 3.11]

Poligonali: hanno l'intradosso che coincide con il perimetro di un poligono regolare. Possono essere considerati come i predecessori degli archi con direttrice curva; all'aumentare del numero di lati, infatti, l'intradosso tende a una forma curva. [Fig. 3.12]

ARCOS COMPUESTOS

Corresponden a este grupo todos aquellos arcos cuyo trazado está compuesto por más que una directriz y por lo tanto tiene más que un centro, es decir los que están formados por dos o más arcos simples.

Arcos compuestos rectos

Angulares: tienen el intradós formado por dos líneas rectas que concurren en un vértice coincidente con la posición de la clave; generalmente los dos lados inclinados forman con la línea de arranques un triángulo isósceles. [Fig. 3.11]

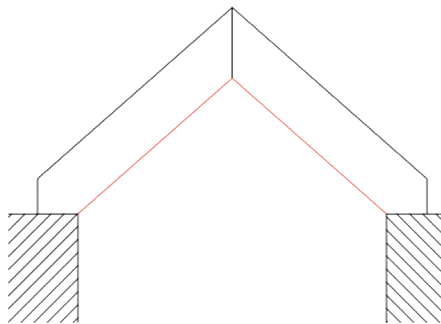


Fig. 3.11 Arco angolare | Arcco angular

Poligonales: tienen el intradós coincidente con el perímetro de un polígono regular. Pueden ser considerados como el antecedente de los arcos de directriz curva, ya que al aumentar del número de lados el intradós tiende a una forma curva. [Fig. 3.12]

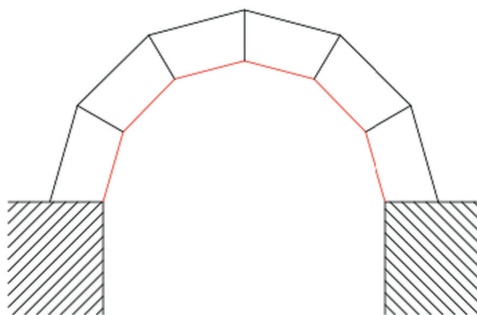


Fig. 3.12 Arco poligonale | Arco polygonal

Archi composti curvilinei

A sesto acuto: detto anche ogivale, è l'elemento architettonico più caratteristico degli edifici gotici [Fig. 3.13]. Il suo tracciato consiste in due archi di uguale circonferenza che si incontrano a formare un angolo acuto in corrispondenza della chiave di volta; il raggio utilizzato per il disegno è sempre maggiore della semiluce dell'arco ed in base alla sua lunghezza nonché alla corrispondente posizione dei centri è possibile distinguere diverse tipologie, come segue:

- **Compiuto:** i centri del suo tracciato sono situati in ciascuno dei punti di imposta dunque il raggio di ogni semiarco è uguale alla luce. Si può chiamare anche equilatero poiché unendo i punti di imposta laterali con il vertice si forma proprio un triangolo equilatero [Fig. 3.14].

- **Ribassato:** i centri del suo tracciato sono situati tra l'asse di simmetria e ciascuno dei punti imposta dell'arco, così che la lunghezza del raggio di ciascuno dei due archi di circonferenza risulta essere minore alla luce ma superiore alla semiluce dell'arco. [Fig. 3.15]

- **Rialzato:** i centri del suo tracciato sono situati esternamente rispetto all'arco stesso e giacciono sulla retta ottenuta dal prolungamento della linea di imposta; la lunghezza del raggio di ciascuno dei due archi di circonferenza risulta essere maggiore della luce dell'arco. [Fig. 3.16]



Fig. 3.13 Arco a sesto acuto, Firenze
Arco apuntado, Florencia

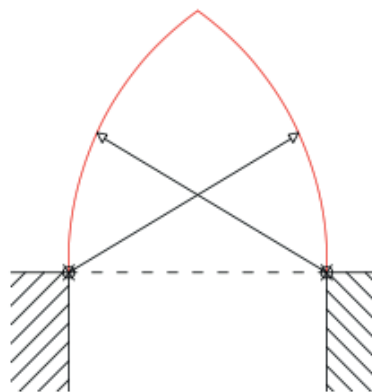


Fig. 3.14 Arco a sesto acuto compiuto
Arco apuntado cumplido

Arcos compuestos curvos

Apuntado: el arco apuntado es el elemento arquitectónico más característico de las construcciones góticas [Fig. 3.13]. Su trazado consiste en dos arcos de circunferencias iguales, que se juntan formando un ángulo en la clave; el radio que se utiliza para el diseño siempre es mayor que la semiluz del arco, y en función de su magnitud y la correspondiente posición de los centros es posible diferenciar varios tipos, como sigue:

- **Cumplido:** tiene sus centros de trazado situados en cada uno de los puntos de arranque, siendo, por lo tanto, el radio de cada semiarco igual a su luz. Se llama equilátero, porque uniendo los arranques con el vértice se origina un triángulo equilátero. [Fig. 3.14]

- **Rebajado:** tiene sus centros de trazado sobre la línea de arranques, situados en cualquier punto entre el eje de simetría y cada uno de los arranques, por lo que, la magnitud del radio de cada semiarco es menor que la luz, pero mayor que la semiluz del arco. [Fig. 3.15]

- **Peraltado:** los centros de trazados se encuentran a ambos lados en la prolongación exterior de la línea de arranque, el radio de trazado de cada semiarco es mayor que la luz del arco. [Fig. 3.16]

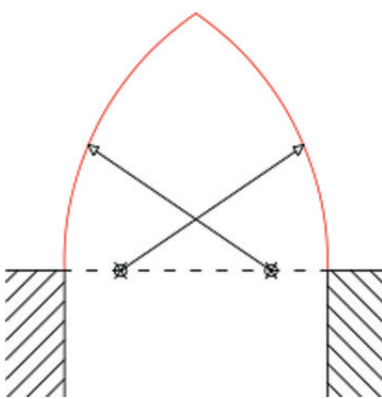


Fig. 3.15 Arco a sesto acuto ribassato
Arco apuntado rebajado

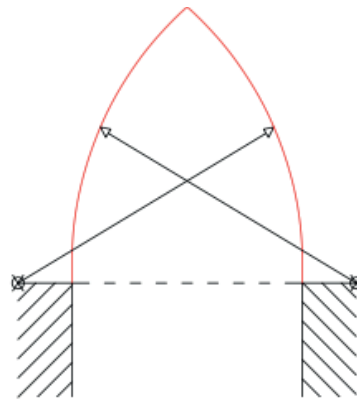


Fig. 3.16 Arco a sesto acuto rialzato
Arco apuntado peraltado

Ribassato policentrico:

il suo tracciato è composto da una porzione centrale di arco a sesto ribassato (quindi con il centro posto al di sotto della linea di imposta) raccordato ai piedritti tramite due archi di circonferenza ad esso tangenti, con centro appartenente alla linea di imposta; è geometricamente e meccanicamente molto simile all'arco ellittico, ma più facile da progettare e costruire. [Fig. 3.17]



Fig. 3.17 Arco aribassato policentrico
Arco carpanel, Barcelona

Inflesso: è formato da due quarti di cerchio concavi alla base e due quarti di cerchio convessi in sommità, ciascun lato presenta quindi una doppia curvatura. La direttrice può avere tre o quattro centri; se ha tre centri ed il raggio pari alla metà della luce si definisce fiammeggiante poiché imita la forma delle fiamme; se invece ha quattro centri ed il raggio sempre uguale e pari ad un quarto della luce dell'arco si definisce inflesso piatto.

Polilobato: è costituito da un numero dispari di archi di circonferenza tra loro secanti, per cui l'intradosso ha un profilo caratterizzato dalla successione di superfici concave; a seconda del numero di elementi che lo compongono può assumere nomi diversi, ad esempio quando le circonferenze che si intersecano sono tre si chiama *Trilobato*. Tali archi di circonferenza sono a loro volta disposti secondo il tracciato di un arco. [Fig. 3.18]

Carpanel: su trazado se compone de una porción central de un arco circular rebajado (es decir, con el centro por debajo de la línea de arranque) conectado a los estribos por dos arcos de circunferencia tangentes a él, con el centro puesto en la línea de arranque; es geométrica y mecánicamente muy similar al arco elíptico, pero más fácil de diseñar y construir. [Fig. 3.17]

Conopial: está formado por dos cuartos de circunferencia cóncavas en los arranques y dos cuartos de circunferencia convexos en la clave, así que cada uno de sus lados forma una doble curva. La directriz puede tener tres o cuatro centros de trazado; si tiene tres centros y el radio igual a su semiluz, se define flamígero por imitar la forma de las llamas (flamas); si tiene cuatro centros y el radio igual a la cuarta parte de la luz del arco, se define conopial cuadrado.

Polilobulado: está compuesto por un número impar de arcos de circunferencia secantes entre ellos, por lo que el intradós tiene un perfil caracterizado por la sucesión de superficies cóncavas; según el número de segmentos de que esté formado, el arco puede tener nombres diferentes, por ejemplo, cuando las circunferencias que se intersecan son tres, se denomina *Trebolado*. [Fig. 3.18]



Fig. 3.18 Loggiato con archi trilobato, Trento | Lonja con arcos trebolados

archi con funzioni specifiche

È possibile individuare tipologie di arco che hanno caratteristiche singolari, rivestendo una funzione ben precisa riguardo la ripartizione e la trasmissione dei carichi o l'origine delle volte; di seguito si riportano alcuni esempi.



Fig. 3.19 Modello di | Modelo de Gateway Arch, Eero Saarinen

Libero: è un arco che sostiene unicamente il carico derivante dal peso proprio, come ad esempio nel caso di arcate decorative o, in generale, quando l'elemento non ha una funzione portante. [Fig. 3.19]

Cieco: l'arco si definisce così quando lo spazio al di sotto del suo intradosso non è aperto bensì risulta chiuso da una parete. [Fig. 3.20]

Di scarico: è un arco costruito all'interno di un muro, al di sopra di un architrave o di un altro arco, allo scopo di deviare i carichi e le spinte derivanti dalla porzione di muro sovrastante a punti più resistenti.

arcos con funciones específicas

Es posible individuar arcos que tienen características singulares, cumpliendo una función determinada en cuanto al reparto y transmisión de cargas u origen de bóvedas; a continuación, se ofrecen algunos ejemplos.

Exento: es un arco que no soporta más carga que la derivada de su propio peso, como en el caso de las arcadas decorativas o, en general, cuando el arco no tiene una función resistente. [Fig. 3.19]

Ciego: se llama así al arco cuyo espacio situado por debajo de su intradós se encuentra cerrado por obra de fábrica. [Fig. 3.20]

De descarga: es un arco construido dentro de un muro, por encima de un dintel, o sobre otro arco, y sirve para aligerar el peso de la fábrica sobre ellos desviando las acciones de carga y empujes a puntos más resistentes en sus arranques.



Fig. 3.20 Esempio di arco cieco e di scarico | Ejemplo de arco ciego y de descarga

Nell'ambito delle volte, geometricamente generate proprio a partire dall'elemento semplice arco, è possibile individuare degli archi con collocazioni e funzioni specifiche. Risulta interessante riportare come la stesura di questo testo in doppia lingua ha messo in luce una maggiore ricchezza lessicale dello spagnolo rispetto all'italiano nella definizione di tali elementi, motivo per cui non sempre è stato possibile trovare una corrispondenza esatta di termini.

"Fascione": è l'arco che appare aggettante nell'intradosso di una volta a botte ed ha lo scopo di rinforzarla [Fig. 3.21].

"Formatore": è l'arco che si produce all'intersezione di una volta con un muro e che funge da supporto per l'inizio della volta stessa, conferendole la forma. Nelle cattedrali gotiche, è ciascuno degli archi che, sostenendo la volta di una navata, giace parallelo al suo asse maggiore; può anche essere inglobato nella muratura qualora l'edificio sia di una sola navata [Fig. 3.22].

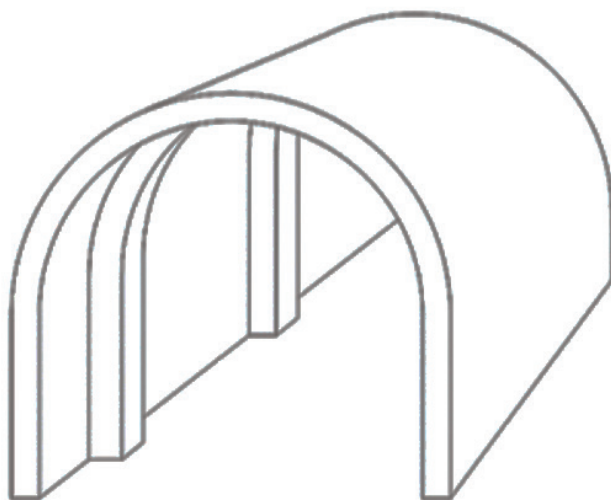


Fig. 3.21 Arco "Fascione" | Fajón

En el contexto de las bóvedas, generadas geométricamente a partir del elemento arco simple, es posible identificar arcos con colocaciones y funciones específicas. Se hace constar que se ha procurado buscar la mayor correspondencia semántica en la terminología, dado que debido a la riqueza de ambos idiomas a veces esto no es posible.

Fajón: es el arco que aparece resaltado en el intradós de una bóveda de cañón y sirve para reforzarla [Fig. 3.21].

Formero: es el arco que se produce en la intersección de una bóveda de crucería con un muro, sirviendo de apoyo al arranque de ésta, dándole forma. También es el arco transversal a una nave que sustenta a la bóveda o el arco que separa dos bóvedas situadas una a continuación de otra en una nave formada por bóvedas de arista o crucería, y perpendicular al eje de estas [Fig. 3.22].

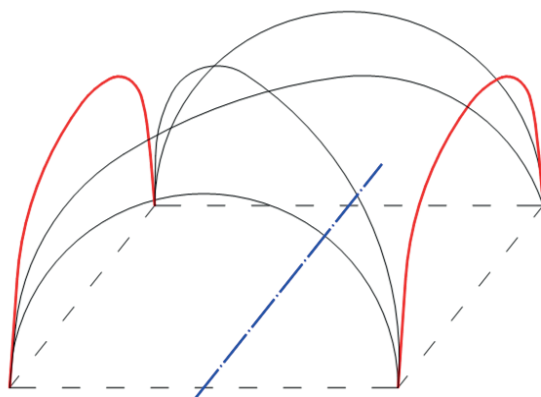


Fig. 3.22 Arco "Formatore" | Formero



"Torale": ciascuno dei quattro archi su cui poggia una cupola. Nelle cattedrali gotiche, un arco che sorregge una volta a crociera e giace perpendicolare all'asse maggiore della navata, in modo da separare due campate consecutive della stessa navata [Fig. 3.23].

Costolone: l'arco che unisce, in diagonale, due angoli opposti di una volta [Fig. 3.24 - 3.25].

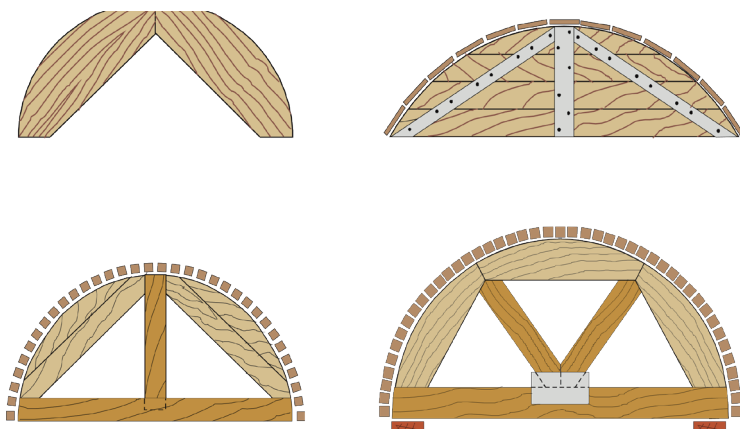


Fig. 3.23 Arco "Torale" | Toral

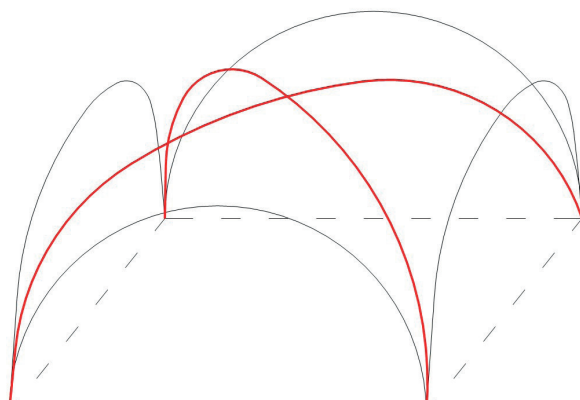


Fig. 3.24 Costolone | Crucero

Toral: es cada uno de los cuatro arcos sobre los que descansa una cúpula. En las construcciones góticas es cada uno de los arcos que sostiene una bóveda de crucería y están situados perpendiculares al eje mayor de la nave, de modo que separan dos tramos consecutivos de una misma nave [Fig. 3.23].

Crucero: es el arco que une, diagonalmente, dos ángulos opuestos de una bóveda [Fig. 3.24 - 3.25].



Fig. 3.25 Costolone, ETSA Madrid | Crucero, ETSA Madrid

l'arco rampante

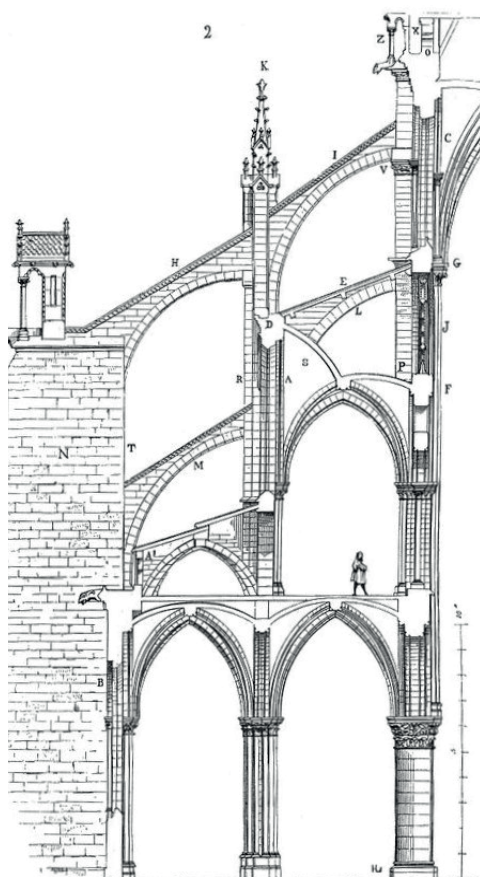


Fig. 3.26 "Dictionnaire Raisonné de l'Architecture", Viollet-le-Duc 1854 - 1868

Uno degli archi di cui ci occupiamo merita una spiegazione a parte: l'arco rampante (dal francese *arc-boutant*, letteralmente arco che trasmette). È proprio questa risorsa costruttiva che conferisce alle architetture gotiche, le cattedrali, quell'immagine peculiare e caratteristica: la serie di archi che attraversano e circondano le costruzioni sopra le navate laterali, uno scheletro di pietra aggiunto al corpo principale che, per mezzo di nervature (gli stessi contrafforti rampanti), "regge" l'edificio. Questo arco può essere trattato come un elemento strutturale esterno. Le volte principali della costruzione esercitano forti pressioni laterali sul muro che sostengono l'arco a contrafforte rampante che avrà il compito di assumere parte di queste pressioni e, quelle della sua area, di trasmetterle all'esterno, al contrafforte, o pilastro, attaccato al muro di una navata laterale. Il

contrafforte volante, come l'arco a sesto acuto o la volta costolonata, è un elemento costruttivo caratteristico dell'architettura gotica, anche se, come elementi di scarico e di trasmissione delle spinte, la sua origine si trova in alcuni esempi di architettura bizantina e romanica, anche se in entrambi i casi erano incastrati tra gli elementi della copertura dell'edificio. Tuttavia, furono gli architetti gotici francesi, a partire dalla metà del XII secolo (i costruttori di grandi cattedrali come quelle di Notre Dame a Parigi e di Reims), a decidere di lasciarle a vista, perché questo soddisfaceva la loro più grande

Una explicación aparte merece sin duda uno de los arcos que nos ocupa tratando: el arco arbotante, (del francés *arc-boutant*, literalmente arco que transmite). Este recurso constructivo es precisamente él que proporciona a las construcciones góticas, las catedrales, esa imagen tan peculiar y característica: la serie de arcos que cruzan y rodean las construcciones por encima de las naves laterales, un esqueleto pétreo añadido al cuerpo principal, el cual, mediante nervios, (los propios arbotantes), “sujeta” el edificio. Este arco lo podemos tratar como un elemento estructural exterior. Las bóvedas principales de la construcción ejercen unas fuertes presiones laterales sobre el muro que sostiene, el arco arbotante será el encargado de asumir parte de esas presiones y transmitirlas al exterior, al contrafuerte, o estribo, adosado al muro de una nave lateral. El arbotante, al igual que arco apuntado o la bóveda de crucería, es un elemento constructivo distintivo de la arquitectura gótica, aunque como elementos de descarga y transmisión de empujes su origen se sitúa en algunas muestras de la arquitectura bizantina y románica, aunque en ambos casos quedaban embutidos entre los elementos de la cubierta del edificio. Sin embargo, fueron los arquitectos góticos franceses, desde mediados del siglo XII (los constructores de grandes catedrales como París o Reims), quienes resolvieron dejarlos a la vista, porque así se cumplía su máxima ambición: atrapar la mayor cantidad de luz natural. Funcionalmente es un arco de descarga, ya que, traslada parte de los pesos transmitidos de la nave central hacia el exterior. Esta magnífica solución permite aliviar al muro del exceso de peso, ya que en caso contrario los muros tendrían espesores enormes para contener en su espesor la resultante de las cargas transmitidas. De esta forma, liberados de la función de resistencia total, pueden ser transformados añadiendo las vidrieras que proporcionaban con sus bellos colores la sensación de recogimiento y calidez que el monumento requería. El arbotante se presenta en posición inclinada, es por lo tanto un arco rampante o *por tranquil*, precisamente por esto, por tener los arranques a distinta altura. El arbotante forma parte de la estructura gótica, pero solo se aprecia desde el exterior. La parte inferior se apoya en un estribo, contrafuerte; y la parte superior sirve de sostén, generalmente, a una bóveda de crucería. El pináculo, (también denominado aguja cuando es muy elevado), corona



ambizione: far passare la luce divina all'interno. Funzionalmente è un arco di scarico, in quanto sposta parte dei pesi, trasmessi dalla navata centrale, verso l'esterno. Questa magnifica soluzione libera la parete dal peso in eccesso, poiché altrimenti le stesse sarebbero state troppo pesanti per contenere i carichi trasmessi derivanti dal loro spessore. In questo modo, liberati dalla funzione di resistenza totale, possono essere trasformati aggiungendo le vetrate che fornivano con i loro bei colori la sensazione di raccoglimento e calore che il monumento richiedeva. Il contrafforte volante si presenta in posizione inclinata, ed è quindi un arco rampante o un arco per tranquil, proprio per questo motivo, perché le sue estremità si trovano ad altezze diverse. Il contrafforte volante fa parte della struttura gotica, ma è visibile solo dall'esterno. La parte inferiore poggia su un pilastro, un contrafforte, mentre la parte superiore sostiene generalmente una volta a crociera. Il pinnacolo (chiamato anche guglia quando è molto alto) corona il pilastro o il contrafforte, decorandolo e contribuendo a stabilizzare la struttura con il suo peso. Questo arco, così identificabile nello stile architettonico gotico, capace di aggiungere una forte personalità all'edificio, come nel caso della costruzione della navata centrale di Notre Dame de Paris, dove fu utilizzato per la prima volta nel 1230, permise, in contrasto con lo stile precedente, il romanico, di elevare l'altezza dell'edificio con pareti alte e slanciate a limiti mai visti prima. Oltre alla funzione strutturale, questo tipo di archi aveva un'altra funzione, quella di incanalare e condurre l'acqua piovana dai tetti verso l'esterno, e questi sbocchi erano decorati con doccioni, figure dall'aspetto grottesco, reali o immaginarie, ma quasi sempre con profili e forme sporgenti per allontanare il più possibile l'acqua dalle pareti ed evitare la formazione di umidità sul paramento murario.

el estribo o contrafuerte decorándolo, y ayuda con su peso a la estabilidad de la estructura. Este arco tan identificativo en el estilo gótico, capaz de añadir una fuerte personalidad al edificio, como en el caso de la construcción de la nave central de Nuestra Señora de París donde se utilizó por primera vez en el año 1230, permitió en contrapartida al anterior estilo predecesor, el románico, elevar la altura de la construcción con muros altos y esbeltos hasta límites nunca antes vistos. Este tipo de arco además de la estructural tenían otra función, la de canalizar y conducir al exterior el agua de lluvia de las cubiertas adornándose estas salidas con las gárgolas, aquellas figuras de aspecto grotesco, reales o imaginarias, pero casi siempre con perfiles y formas salientes para poder alejar lo más posible el agua del paramento y evitar humedades sobre el paramento de los muros.



Fig. 3.27 Esempio di archi rampanti, Palma di Mallorca

organizzazione costruttiva: casi particolari

L'organizzazione costruttiva riguarda il modo in cui sono disposti i conci nella realizzazione di un arco. Facendo riferimento agli archi realizzati con conci regolari, siano essi in pietra o in mattoni, è possibile avere altre tipologie rispetto a quella che prevede un'unica fila di conci; le principali organizzazioni costruttive 'complesse' si illustrano a continuazione.

Organizzazione a ghiera: i conci seguono la direzione radiale formando corsi concentrici secondo la direttrice dell'arco. Questa organizzazione costruttiva permette di dare all'arco uno spessore maggiore senza la necessità di avere a disposizione pezzi più grandi. Si usa più frequentemente nel caso di archi di mattoni (parallelepipedi di dimensioni fisse) che nel caso di archi in muratura con conci in pietra scolpiti. Poiché la profondità di un arco è solitamente pari a quello della parete in cui è alloggiato, maggiore è il carico ricevuto, maggiore deve essere il suo spessore; in questo caso, tale aumento dimensionale si ottiene sovrapponendo una sorta di secondo arco a quello interno, come fosse un secondo corso di muratura indipendente, con un giunto continuo tra i due. Ogni corso deve essere uguale al precedente, dunque deve avere lo stesso numero di pezzi e, come conseguenza di ciò, il livello di imposta dei due corsi sarà diverso. [Fig. 3.28 - 3.32]

Organizzazione in fogli: è costituito da diversi corsi di mattoni posti in opera non di taglio bensì di piatto rispetto all'intradosso dell'arco, in modo tale da ottenere una stratificazione di lastre incurvate secondo la direzione dell'arco. Questa organizzazione costruttiva evita l'uso di centine per il sostegno dei pezzi, poiché il primo corso viene realizzato con pasta di gesso e necessita solo dell'aiuto di una sagoma o di una guida da seguire. [Fig. 3.29]

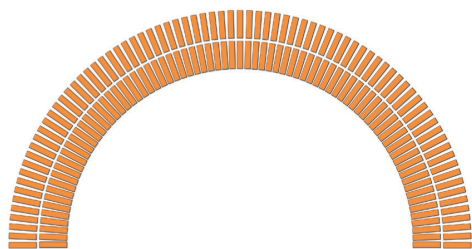


Fig. 3.28 Organizzazione a ghiera
Aparejo de roscas

organización constructiva: casos particulares

La organización constructiva se refiere a la forma en que se disponen las dovelas en la construcción de un arco. En cuanto a los arcos realizados con dovelas regulares, ya sean de piedra o de ladrillo, se pueden encontrar otros tipos, distintos al de una sola hilada de dovelas; a continuación, se ilustran las principales organizaciones constructivas 'complejas'.

Aparejo de roscas: las dovelas siguen la dirección radial, formando hiladas concéntricas según la directriz del arco. Esta organización constructiva permite dotar al arco de un mayor canto, sin necesidad de disponer de piezas de dimensiones más grandes. Se emplea con más frecuencia en el caso de arcos de fábrica de ladrillo (con paralelepípedos de dimensiones fijas), que en el caso de fábricas de sillería (dovelas ladradas). Como el espesor de un arco suele ser igual al del muro en el que se aloja, a mayor carga recibida mayor debe ser su canto; en este caso, este incremento dimensional se obtiene superponiendo una rosca a la interior a modo de hiladas independientes, definiendo una junta continua entre roscas. Cada una de las roscas debe ser igual a la anterior, por lo que deben de tener el mismo número de piezas y en consecuencia cada rosca presenta el arranque a distinto nivel. [Fig. 3.28 - 3.32]

Tabicado: está formado por varias correas de ladrillos que se colocan siguiendo la dirección plana con relación al intradós del arco, a modo de hojas curvadas siguiendo su directriz. Esta organización constructiva evita la utilización de cimbras para el apoyo de las piezas, ya que la primera correa se toma con pasta de yeso y sólo se necesita para seguir la ayuda de una plantilla o guía. [Fig. 3.29]

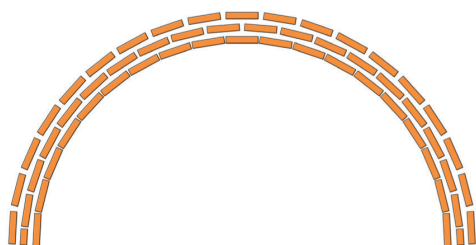


Fig. 3.29 Organizzazione in fogli
Aparejo tabicado



Fig. 3.30 Organizzazione con incastro | Arco de piedra aparejado "montacaballo"

Organizzazione con incastri: i pezzi si presentano incastrati in tutto o in parte, nello spessore o nella profondità dell'arco, dando vita ad un incastro mediante lo sfalsamento dei giunti, nel caso dei conci in mattoni, o stabilendo migliori condizioni di connessione per mezzo della sagomatura dei conci nel caso di elementi in pietra (elementi dentati, incastri maschio-femmina, conci ad L). [Fig. 3.30 - 3.31]

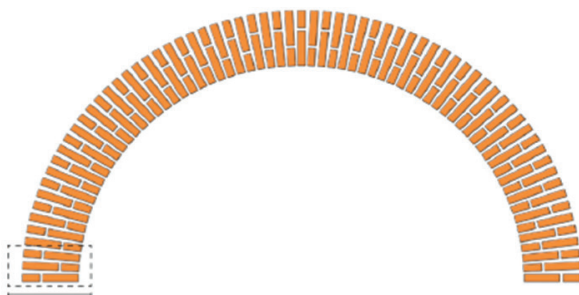
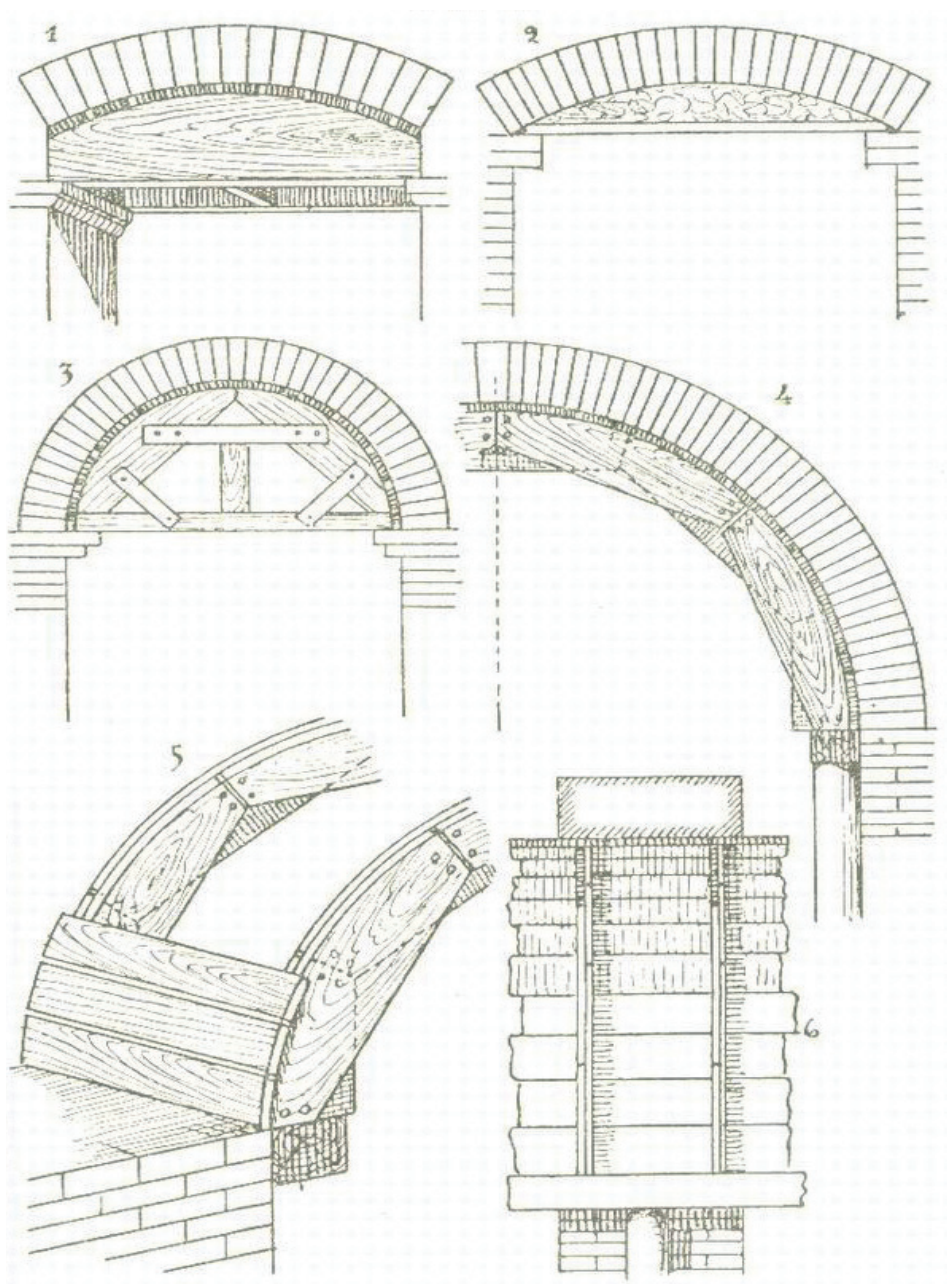


Fig. 3.31 Organizzazione in mattoni con incastri | Arco de ladrillo aparejado

Aparejado: las piezas se presentan trabadas en todo o parte del canto y espesor del arco, formando aparejo al contrapear las juntas, cuando se trata de dovelas-ladrillos, o bien estableciendo las mejores condiciones de unión, como redientes, falso corte o montacaballo, cuando se trata de dovelas-sillar. [Fig. 3.30 - 3.31]



Fig. 3.32 Esempio di arco in mattoni con organizzazioe costruttiva a ghiere, Roma
Ejemplo de arco de ladrillos con aparejo de roscas, Roma



G. Chevalley, *Elementi di tecnica dell'architettura*, Torino 1923



COSTRUZIONE DI UN ARCO

Construcción de un arco



costruzione di un arco

Centine

Ad eccezione degli archi e delle volte di laterizio in foglio, la costruzione degli archi in muratura è basata sull'utilizzo di elementi ausiliari chiamati centine, strutture autonome di uso provvisoria la cui funzione è proprio quella di sostenere, durante la fase costruttiva, gli elementi che compongono l'arco. Queste opere ausiliarie, realizzate principalmente in legno oppure in metallo, devono dunque essere resistenti, in grado cioè di sostenere il peso della struttura che gli viene montata sopra, ma risultare allo stesso tempo economiche e facili da realizzare, non essendo loro il vero oggetto dell'investimento costruttivo. Una centina può inoltre essere utilizzata più volte, per cui va pensata anche come facilmente smontabile e capace di sopportare il trasporto in cantiere e l'impiego ripetuto. Dal punto di vista funzionale, una centina è composta da due parti importanti: una è quella che dà forma all'arco e l'altra serve da puntellamento o supporto; tale dualità permette impiegare materiali differenti, realizzando, per esempio, la parte relativa alla forma in legno e la parte di supporto o puntellamento con elementi metallici. I tipi di centine, oltre ai materiali impiegati, alle forme ed alle dimensioni, possono essere classificati in due gruppi: centine fisse e centine mobili. Le centine fisse o statiche sono utilizzate per archi semplici o incroci di volte, mentre quelle mobili, montate su guide o binari, sono utilizzate per le volte la cui origine geometrica è data da un arco che trasla.

Disarmo

Terminato il processo costruttivo di un sistema voltato in muratura e trascorso il tempo necessario, si procede al ritiro degli elementi ausiliari provvisori usati per la sua costruzione: questa operazione prende il nome di 'disarmo'. Si tratta di un'operazione delicata alla quale bisogna prestare molta attenzione poiché con la rimozione della centina l'elemento strutturale costruito entra in carico e si verifica il serraggio dei giunti, causa di un abbassamento, anche se minimo, della chiave di volta. La messa in carico di un elemento di nuova

Cimbras

A excepción de los arcos y bóvedas tabicados de fábrica de ladrillo, la ejecución de arcos con obras de fábrica se basa en la utilización de elementos auxiliares llamados cimbras, estructuras autónomas de uso provisional cuya función es sostener, durante su construcción, las piezas con las que construir los arcos. Por tanto, estas obras auxiliares, principalmente de madera o metal, deben ser resistentes, es decir, capaces de soportar el peso de la estructura que se monta sobre ellas, pero al mismo tiempo ser económicas y fáciles de construir, ya que no son el verdadero objeto de la inversión en construcción. Además, una costilla puede utilizarse varias veces, por lo que también debe diseñarse para que sea fácil de desmontar y capaz para soportar el trasiego, en obra, de su utilización repetida. Atendiendo a su función, una cimbra consta de dos partes importantes: una es la que da forma al arco y la otra es la que sirve de apeo o apoyo. Esta dualidad permite que cada una de las partes se pueda realizar con materiales distintos, como, por ejemplo, la parte relativa a la forma con madera y todo el apoyo o apeo con puntales metálicos. Los tipos de cimbras, además de los materiales, formas y tamaños, se pueden clasificar en dos grupos: las cimbras fijas y las cimbras móviles. Las cimbras fijas o estáticas se utilizan para arcos y encuentros de bóvedas, mientras que las móviles, montadas sobre guías o railes, se utilizan para las bóvedas originadas por un arco que se desplaza.

Descimbrado

Terminado el proceso constructivo de un sistema abovedado con obra de fábrica, y transcurrido el tiempo necesario, se retiran los elementos auxiliares provisionales utilizados para la construcción: esta operación se llama 'descimbrado'. Es una operación delicada a la que hay que prestar atención, ya que retirar la cimbra supone que, el elemento construido sobre ella entrará en carga, produciéndose el apriete de sus juntas, causante de un descenso, aunque mínimo, de la clave. La entrada en carga de un elemento



costruzione non può essere eseguita in modo violento o asimmetrico, dunque il disarmo deve seguire una procedura ben precisa. Per prima cosa la cassaforma viene leggermente abbassata, operazione preparatoria o di prova che consiste in sostanza nell'abbassare leggermente la sottostruttura, separandola dall'elemento costruito; tale separazione deve essere minima, quel tanto che basta affinché un po' di luce passi nella fessura creata. Il processo viene eseguito lentamente ed in modo simmetrico e uniforme su entrambi i lati della centina, una volta trascorso un tempo sufficiente a partire dal termine della realizzazione della muratura, durante il quale è necessario che la malta abbia completato la fase di presa senza però aver ancora indurito, di durata dipendente dal tipo di malta utilizzata. Passato un certo periodo di tempo a partire dall'allentamento, di solito un giorno, è possibile eseguire il resto del disarmo; prima di completare la procedura bisogna osservare come l'arco o la volta ha risposto alla messa in carico, controllando l'abbassamento della chiave di volta e la comparsa di crepe dopo l'allentamento. Per un monitoraggio più accurato del comportamento di questi elementi può essere conveniente ricoprire l'intradosso della struttura con della malta che, oltre a consolidare l'opera, permetterà una lettura molto più agevole delle eventuali crepe; questa pratica si rivela molto più importante nel caso delle volte. Per gestire meglio l'operazione di disarmo, soprattutto nella fase di allentamento iniziale, al momento della messa in opera della centina è possibile predisporre degli elementi ausiliari come cunei, sacchi di terreno, bulloni, ecc. per mezzo dei quali effettuare movimenti molto controllati, lenti, precisi e simmetrici.



recién construido no puede hacerse de un modo violento, ni asimétrico, por ello el descimbrado tiene que seguir un procedimiento específico. Primero se realiza el aflojado del soporte de la cimbra, que es una operación de preparación o de tanteo, que consiste en realizar un leve descenso de la cimbra, separándola del elemento construido; dicha separación tiene que ser mínima, es suficiente que pase algo de luz a través de la cimbra y la obra. El proceso se realiza, una vez haya transcurrido el tiempo suficiente desde el cerrado de la fábrica, lentamente y a ambos lados de la cimbra por igual; dicho tiempo depende del tipo de mortero empleado, es necesario que se haya completado su fraguado sin terminar su endurecimiento. Transcurrido el tiempo necesario desde el aflojado, normalmente un día, se podrá realizar el resto del descimbrado; antes de completar el procedimiento, es necesario observar cómo ha respondido el arco o la bóveda a la entrada en carga, comprobando el descenso de la clave y la aparición de grietas tras el aflojamiento. Para un mejor seguimiento del comportamiento de estos elementos constructivos es muy conveniente colmar con mortero el trasdós del arco, que, además de consolidar la obra, permitirá una lectura mucho más fácil de las grietas que se puedan producir; dicha práctica es mucho más importante en el caso de las bóvedas. Para una mejor gestión de las operaciones del descimbrado, especialmente del aflojado, al colocar la cimbra es posible predisponer elementos auxiliares como cunas, sacos terreros, tornillos, etc. mediante el cual realizar movimientos muy controlados, lentos, precisos y simétricos.

costruzione di un arco

Indipendentemente dal tracciato dell'arco che si vuole realizzare, devono sempre essere tenute in considerazione alcune norme di carattere generale.

Prima della costruzione:

- La centina materializza il tracciato geometrico dell'arco da costruire, in modo che la sua parte esterna coincida con l'intradosso dell'arco. È consigliabile alzare leggermente la posizione della chiave di volta in previsione dell'abbassamento che si verificherà a seguito del disarmo; è possibile realizzare questo rialzo dopo la realizzazione ed il montaggio della centina, stendendo uno strato di sabbia umida o di malta povera in corrispondenza della zona della chiave di volta, prima di iniziare a posizionare i conci.
- La centina deve essere collocata nella sua posizione esatta, opportunamente puntellata; in molti casi è necessario rinforzare gli elementi di sostegno verticali mediante controventature; la puntellatura della centina deve essere dotata degli elementi ausiliari che consentono di procedere al disarmo in modo lento e uniforme.
- È necessario individuare e segnare la posizione del centro o dei centri del tracciato di ogni curva direttrice dell'arco, per fissare l'origine del cordoncino che regola il posizionamento radiale dei conci.

Durante la costruzione:

- La posizione di ogni concio sulla centina deve essere tracciata con l'aiuto del cordoncino, in modo che la distribuzione e lo spessore di tutti i giunti determinino l'esatta posizione della chiave di volta o del giunto centrale. Un arco può avere molti conci ed un errore nella loro esecuzione o disposizione, anche se minimo, qualora ripetuto si ripercuoterà in una posizione casuale della chiave di volta o del giunto centrale.
- La costruzione dell'arco inizia dall'imposta verso il centro, posizionando i conci alternativamente su ogni lato fino alla chiave di volta o al giunto centrale, elemento che chiude la muratura.

Con independencia del trazado del arco a construir, siempre se deberán tomar en cuenta unas normas de carácter general.

Antes de la ejecución:

- La cimbra materializa el trazado geométrico del arco a construir, de forma que su parte exterior coincide con el intradós del arco. Es conveniente elevar algo la posición de la clave en previsión del descenso que se producirá al descimbrar; dicha elevación se puede conseguir después de fabricar y montar la cimbra, colocando una capa de arena húmeda o mortero pobre en la zona de la llave, antes de iniciar la colocación de las dovelas.
- Se debe colocar la cimbra en su posición exacta, convenientemente apeada; en muchos casos es necesario afianzar los elementos verticales de apoyo, mediante arriostramiento; el apeo de la cimbra conta con los elementos auxiliares que permitan realizar el descimbrado de modo lento y uniforme.
- Es necesario localizar y marcar la posición del centro o de los centros de trazado de cada directriz del arco, para fijar el origen de los cintreles que regula la colocación radial de las dovelas.

Durante la ejecución:

- Se ebe replantear, con la ayuda del cintrel, la posición de cada dovela sobre la cimbra con la ayuda del cintrel, con el fin de que el reparto y el espesor de todas las juntas determinen la posición exacta de la clave o de la junta central. Un arco puede tener muchas dovelas y un error al ejecutarlas o replantearlas, aunque mínimo, si se repite se repercutirá en una posición aleatoria de la clave o de la junta central.
- La construcción del arco se inicia desde lo arranques hacia el centro, colocando las dovelas, alternativamente, en cada lado hasta cerrar la fábrica con la clave o con la junta central.

- Il posizionamento della chiave di volta richiede la massima precisione e in alcuni casi è necessario correggere il concio in loco per ottenere un adattamento migliore.

Dopo la costruzione:

- L'allentamento del supporto della centina deve essere effettuato quando la malta ha già fatto presa e il suo processo di indurimento è già iniziato; solo una volta verificato il buon comportamento dell'arco si può completare il disarmo. Come in tutti i casi in cui si utilizzano malte o calcestruzzi, non è possibile stabilire il tempo esatto necessario a poter far entrare in carica gli elementi costruiti impiegandoli; le condizioni di temperatura e umidità, che variano di caso in caso, sono decisive per la durata del processo.



Fig. 4.1 Esempio di centina | Ejemplo de cimbra

- La colocación de la clave requiere de la mayor precisión posible y en algunos casos es necesario rectificarla a pie de obra para obtener su mejor ajuste.

Después de la ejecución:

- El aflojado del soporte de la cimbra se tiene que realizar cuando el mortero ya esté fraguado y se encuentre avanzado su proceso de endurecimiento; solo una vez comprobado el buen comportamiento del arco se puede completar su descimbrado. Como en todos los casos en que se utilizan morteros u hormigones no se puede establecer el tiempo exacto para hacer entrar en carga a los elementos con ellos contruidos, las condiciones de temperatura y humedad son decisivas en la duración del proceso, siendo variables en cada caso.

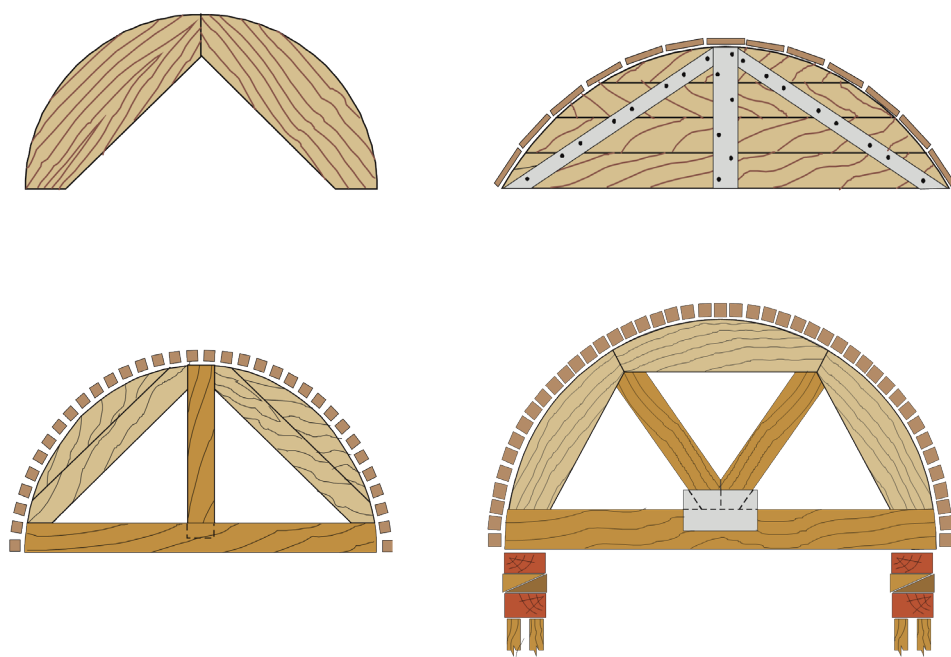
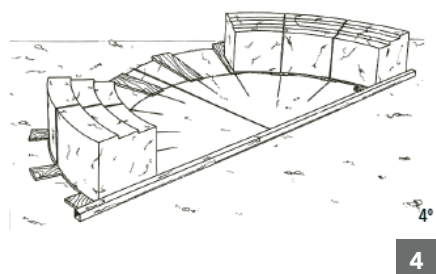
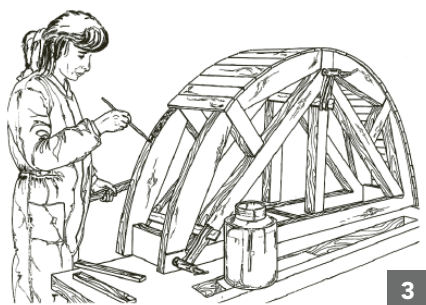
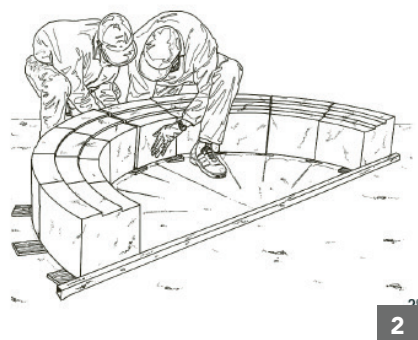
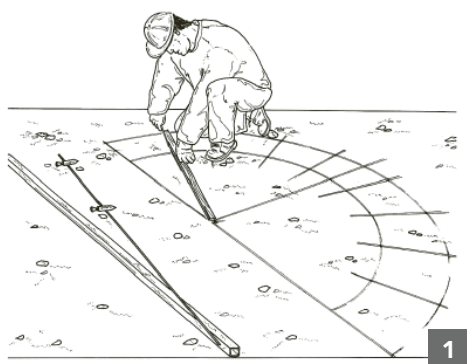


Fig. 4.2 Diverse tipologie di centine | Diferentes tipos de cimbras

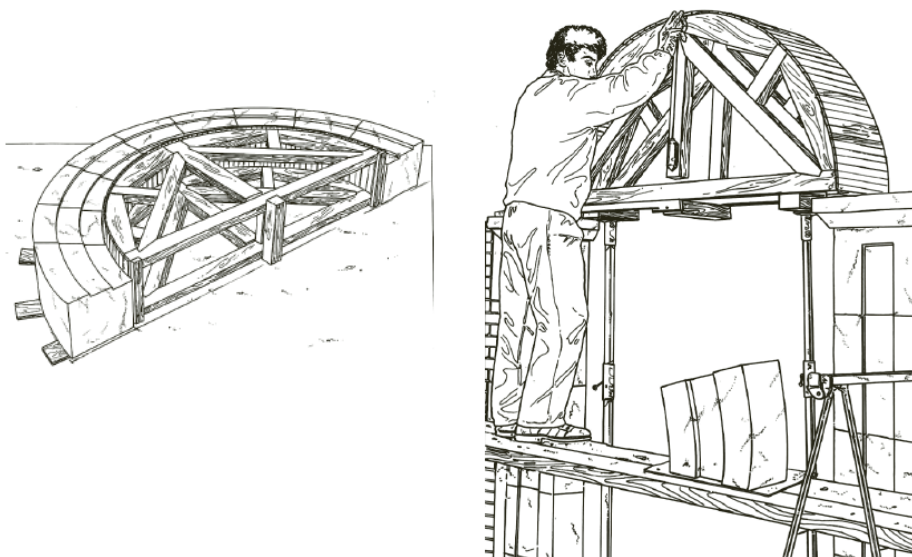
raccontare il processo di costruzione di un arco a tutto sesto in pietra



representación del proceso de construcción de un arco de medio punto en piedra

5

6



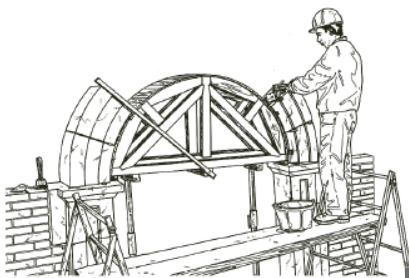
- 1** Disegno a terra dell'arco
Dibujo sobre el suelo del arco
- 2** Verifica in superficie della sezione dell'arco
Comprobación sobre el suelo del despiece del arco
- 3** Costruzione della centina
Construcción de la cimbra
- 4** Sistemazione dei conci sulla sagoma della centina
Montaje de las dovelas sobre el dibujo de la cimbra
- 5** Verifica a pie d'opera della collocazione dei conci sopra la centina
Comprobación sobre la cimbra de las dovelas, a pie de obra
- 6** Posizionamento del sistema di sostegno sugli appoggi
Colocación de la cimbra sobre los apeos



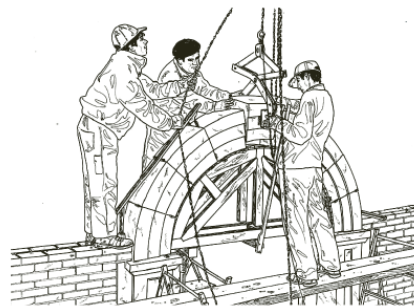
7



8

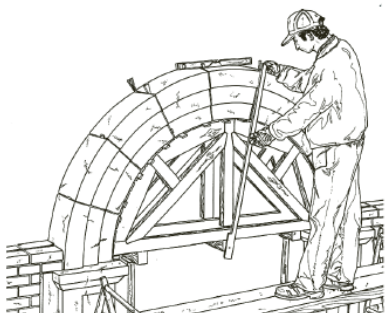


9

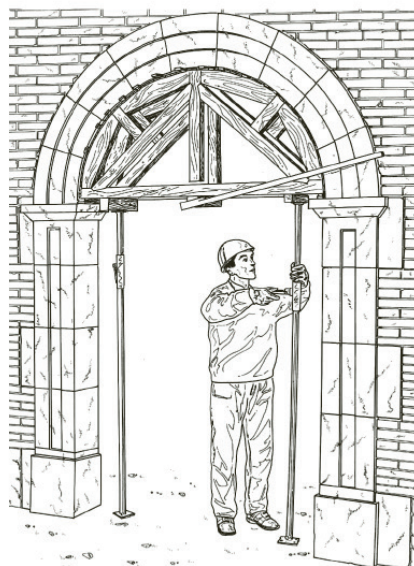


10

11



12



- 7** Si inizia il posizionamento dei conci con quelli di imposta
Se inicia la colocación de las dovelas con los sálmeres
- 8** Verifica della posizione dei conci con la cinta
Comprobación de las dovelas con el cintrel
- 9** Posa dei conci
Colocación de las dovelas
- 10** Chiusura dell'arco
Cierre del arco
- 11** Regolazione e montaggio di chiavi e controchiavi
Ajuste y colocación de clave y contraclaves
- 12** Disarmo dell'arco
Descimbrado del arco



Particolare di arco in muratura, Valencia | Detalle de un arco en obra de fábrica, Valencia



I MATERIALI DELL'ARCO IN MURATURA

Los materiales de los arcos en las obras de fábrica



i materiali dell'arco in muratura | pietra

Lo sviluppo delle costruzioni ha avuto luogo parallelamente alla scoperta e all'evoluzione dei materiali utilizzati, di modo che con la comparsa di ogni materiale veniva elaborata la tecnica necessaria per il suo impiego.

Inizialmente si utilizzavano i materiali così come si trovavano in natura, poi, attraverso trasformazioni più o meno complesse, si passò ad impiegare prodotti frutto dell'elaborazione dalla mano dell'uomo. L'uso della pietra è un buon esempio di ciò: si passa dall'utilizzo di pietre senza quasi alcuna modifica all'ottenimento di conci molto elaborati. Nella costruzione degli archi si utilizzavano pezzi di pietra scolpiti, dalla forma geometricamente definita, destinati ad occupare un posto preciso nell'opera muraria, motivo per cui, nella maggior parte dei casi, la loro posizione non era intercambiabile con quella di altri elementi.

La produzione di conci si basa sulla scalpellinatura e sulla stereotomia della pietra, che non è altro che l'arte di tagliare le pietre per il loro successivo utilizzo nell'ambito di un sistema costruttivo o decorativo. La stereotomia regola il modo in cui un sistema costruttivo deve essere scomposto, suddividendolo in pezzi elementari, mentre la scalpellinatura riguarda il processo di lavorazione della pietra per ottenere questi pezzi. La produzione dei conci iniziava con l'estrazione della pietra, che è la materia prima da essere trasformata in materiale da costruzione.

los materiales de los arcos en las obras de fábrica | piedra

El desarrollo de la construcción ha sido paralelo al descubrimiento y a la evolución de los materiales usados, de manera que con la aparición de cada material se ha desarrollado la técnica necesaria para su puesta en obra.

Inicialmente se usaron los materiales tal cual se ofrecían en la naturaleza, después, mediante transformaciones más o menos complejas, se pasó a obtener los materiales elaborados por la mano de los hombres. La utilización de la piedra es un buen ejemplo de ello, yendo desde usar las piedras sin apenas modificación, hasta obtener sillares muy elaborados. En la ejecución de arcos se empleaban piezas de piedra labradas, de una forma geoméricamente definida, destinadas a ocupar un lugar preciso en la obra de fábrica, por lo que, en la mayoría de los casos, su posición no es intercambiable con la de otros elementos.

La obtención de los sillares se apoya en la cantería y en la estereotomía de la piedra, que no es otra cosa que el arte de cortar las piedras para su posterior uso formando unidades de obra. La estereotomía rige el modo en el que se debe descomponer una unidad de obra, subdividiéndola en piezas, y la cantería el proceso que sigue en labra la piedra para obtener éstas. La obtención de los sillares comienza con la extracción de la piedra que es la materia prima para su transformación en material de construcción.



La pietra utilizzata per i conci deve avere alcune qualità specifiche, tra le quali si distinguono:

- *Aspetto e consistenza.* Le pietre non dovrebbero presentare difetti nella massa, come crepe, screpolature, resti organici, ecc. né altri danni inerenti al processo di estrazione dallacava, alla manipolazione o trasporto.
- *Omogeneità.* Per la realizzazione di un'opera unitaria, le pietre dovrebbero presentare una grana omogenea ed essere della stessa classe, cioè non dovrebbero esserci variazioni significative tra i conci utilizzati.
- *Assorbimento.* In generale, il normale coefficiente di assorbimento dell'acqua deve essere mantenuto al di sotto di determinati valori.
- *Gelività.* Questa caratteristica è strettamente legata a quella dell'assorbimento d'acqua e consiste nella capacità del materiale di resistere a cicli successivi di gelo e disgelo quando è completamente impregnato d'acqua; nel caso di murature che possono trovarsi sottoposte a basse temperature, con l'aumento di volume dovuto al congelamento dell'acqua contenuta nella muratura, i conci potrebbero arrivare a rompersi.
- *Adesione alle malte.* Le superfici che devono essere a contatto con le malte, anche se lavorate, devono avere una rugosità sufficiente a garantire un'adesione in grado di resistere alle sollecitazioni di trazione, nel giunto, tra malta e pietra.
- Le caratteristiche meccaniche, la durezza o la facilità di lavorazione della pietra devono essere stabilite in funzione dell'opera da realizzare e della situazione dei conci.

La prima operazione consiste nel disegnare i conci in disegni in scala 1:1 di tutte le facce; per conferire la forma ad un concio si parte da un pezzo di pietra più grande, in tutte le sue dimensioni. Una volta ottenuti tutti i pezzi si passa alla posa in opera, apportando le eventuali correzioni necessarie. Questa operazione è nota come "*plano de monteà*" dove, appoggiando i conci sul terreno, è possibile verificare la loro posizione finale *in situ*.



Merecen destacarse como cualidades muy estimables de la piedra usada en sillería:

- *Aspecto y textura.* Las piedras no deberían contener defectos en su masa, como grietas, coqueras, restos orgánicos, etc., ni presentar otros daños inherentes al proceso de extracción de la cantera, o de su manipulación y transporte.
- *Homogeneidad.* Para la realización de una misma unidad de obra, la piedra debería presentar grano homogéneo y ser de la misma clase, es decir, sin variaciones significativas entre los sillares utilizados.
- *Absorción.* En general, sería necesario que el coeficiente de absorción normal de agua se mantenga por debajo de valores específicos.
- *Heladicidad.* Esta característica está íntimamente ligada con la de absorción de agua y consiste en la capacidad del material para resistir ciclos sucesivos de congelación y descongelación cuando está completamente impregnado de agua; en el caso de fábricas que puedan verse afectadas por bajas temperaturas, con el aumento de volumen debido a la congelación del agua contenida en su interior, los sillares pueden acabar rompiéndose.
- *Adherencia a los morteros.* Las superficies que deban estar en contacto con los morteros, aunque labradas, deben tener la suficiente rugosidad para garantizar una adherencia capaz de resistir un esfuerzo de tracción, en la junta, entre mortero y piedra.
- Las características mecánicas, de dureza, o la facilidad de labra, son función de la unidad de obra a realizar, y de la situación de los sillares.

La primera operación es dibujar los sillares en planos en escala 1:1 de todas sus caras; para labrar, dándole forma a un sillar, se parte de una pieza mayor que éste, en todas sus dimensiones. Una vez obtenidas todas las piezas, se pasa a la puesta en obra, realizando las correcciones que posiblemente se van a necesitar. Esta operación se conoce con el nombre de “*planos de monte*” donde con la colocación de las dovelas en el suelo, se podía comprobar el estrado final de su colocación en obra.

i materiali dell'arco in muratura | laterizio

Si tratta di un materiale da costruzione che risale a più di cinquemila anni fa e da allora è sempre stato utilizzato. Come caratteristiche generali, i mattoni sono:

- *ottenuti dalla cottura di argille*
- *a forma di parallelepipedo*
- *di dimensioni adatte alla mano*
- *di carattere modulare*

Al di là di questi aspetti che tutti hanno in comune, si possono individuare numerose tipologie differenti di mattoni, che si differenziano in base alla forma, al metodo di fabbricazione, al grado di cottura o agli eventuali materiali aggiunti all'impasto di base. In termini di colore, prevalgono le tonalità rossastre, ma vi è anche una marcata presenza di toni bianchi e ocra ed una minoranza di toni che vanno dal grigio al nero.

La texture liscia predomina sulle altre, con una varietà che può andare dal ruvido al graffiato, includendo intagli, scanalature, buchi, sabbiature, ecc. Storicamente parlando, la forma del mattone non ha subito grandi modifiche dalla sua comparsa. Il motivo è che la sagoma a parallelepipedo ne facilita la fabbricazione, le dimensioni ridotte ed il peso contenuto si adattano ad essere maneggiati e posti in opera a mano e, soprattutto, la geometria è adatta alle condizioni di lavoro delle opere murarie.

Negli archi, l'impiego del mattone modifica l'apparecchiatura costruttiva del sistema rispetto all'uso della pietra. In primo luogo, la forma a cuneo, necessaria per colmare la differenza di lunghezza dell'arco di circonferenza tra intradosso ed estradosso, passa dai conci ai giunti; in secondo luogo, a parità di geometria dell'arco e profondità della parete, per aumentare la resistenza dell'elemento strutturale, non potendo cambiare la dimensione del singolo elemento componente, si deve lavorare per accoppiamento e/o disposizione stratificata, ad esempio per fogli o ghiera concentriche. Infine, per quanto riguarda la chiave di volta si deve in alcuni casi ricorrere ad una disposizione specifica, con eventuale uso di sotto moduli, oppure introdurre un elemento singolare in altro materiale; ad

los materiales de los arcos en las obras de fábrica | ladrillo

Se trata de un material constructivo cuyo origen se remonta a mas de cinco mil años y, desde entonces, se ha utilizado permanentemente. Como características generales, los ladrillos son:

- *obtenidos a partir de la cocción de arcillas*
- *con forma de paralelepípedo*
- *de tamaño adecuado a la mano*
- *de carácter modular*

Más allá de estos aspectos que todos tienen en común, se pueden identificar numerosos tipos deferentes de ladrillo, los cuales se diferencian en función de la forma, el método de fabricación, el grado de cocción o bien los materiales que se pueden añadir a la mezcla base. En cuanto al color, predominan los tonos rojizos, pero también es acusada la presencia de colores hacia el blanco y hacia los ocre, siendo minoría los colores que van del gris al negro.

La textura lisa predomina sobre las demás, con una variedad que va desde el tosco al rascado, pasando por el labrado, rugoso, picado, arenado, etc. Históricamente hablando la forma del ladrillo no ha sufrido grandes modificaciones desde su aparición. La razón es que el perfil de paralelepípedo permite una fácil fabricación, las dimensiones pequeñas y peso bajo lo hacen adecuado para su manipulación y puesto en obra a mano, con una manejabilidad óptima y, sobre todo, su geometría se adecua a las condiciones de trabajo de las obras de fábrica.

En los arcos, el uso del ladrillo modifica el aparejo constructivo del sistema, en comparación con el uso de la piedra. En primer lugar, la forma de cuña, necesaria para salvar la diferencia de longitud del arco de circunferencia entre el intradós y el extradós del arco, pasa de los sillares a las juntas; en segundo lugar, con la misma geometría del arco y la misma profundidad de la pared, para aumentar la resistencia del elemento estructural, ya que no es posible cambiar el tamaño del elemento individual, hay que trabajar por acoplamiento y/o disposición en capas, por ejemplo, mediante hojas o roscas concéntricas. Por último, en lo que respecta a la clave, en algunos casos es necesario recurrir a una disposición específica, con el posible uso de



esempio, nel caso della chiave di volta di un arco a sesto acuto si possono disporre mattoni via via più piccoli a *spina di pesce* o usare un unico elemento in pietra, soluzione che risulta essere buona anche dal punto di vista statico, considerando che gli archi a sesto acuto si stabilizzano all'aumento del carico in testa. L'uso massiccio dei mattoni nei sistemi costruttivi voltati si deve principalmente ai Romani, ma furono gli architetti modernisti della scuola catalana a cavallo tra XIX e XX secolo a spingere questo materiale alle sue massime espressioni costruttive e architettoniche.



submódulos, o introducir un elemento singular en otro material; por ejemplo, en el caso de la clave de un arco apuntado, es posible disponer ladrillos cada vez más pequeños en *espina de pez* o bien utilizar un único elemento de piedra, solución que también es buena desde el punto de vista estático, dado que los arcos apuntados se estabilizan al aumentar la carga en la clave. El uso masivo de ladrillos en sistemas constructivos abovedados se debe sobre todo a los Romanos, mientras que fueron los arquitectos modernistas de la escuela catalana los que llevaron este material a sus más altas expresiones constructivas y arquitectónicas.



Castello di Xàtiva, Valencia | Castillo de Xàtiva, Valencia



**COMPORTAMENTO MECCANICO
DELL'ARCO**
Comportamiento mecánico del arco



Comportamento meccanico e forme di rottura dell'arco

Criteri generali

Nell'ambito della scienza delle costruzioni l'arco identifica un solido generato dalla traslazione di una figura piana lungo una traiettoria perpendicolare ad essa e passante per il proprio baricentro, cioè la sua direttrice. Tale linea deve essere continua e piana, con raggio di curvatura definito in ogni punto, e la sezione deve mantenersi costante, oppure variare con continuità, lungo l'intero tracciato.

Come visto in precedenza, l'arco può assumere forme diverse seguendo traiettorie differenti, alle quali corrisponde anche un diverso comportamento statico: esse hanno perciò spesso, oltre al valore stilistico, una precisa funzione strutturale. Per quanto possibile, si dovrebbe cercare una mediazione tra esigenza estetica e strutturale e, se si ravvisa in quest'ultima l'essenza primaria dell'elemento, preferire in linea generale la direttrice più appropriata in base ai carichi che l'arco deve sostenere, per entità e distribuzione.

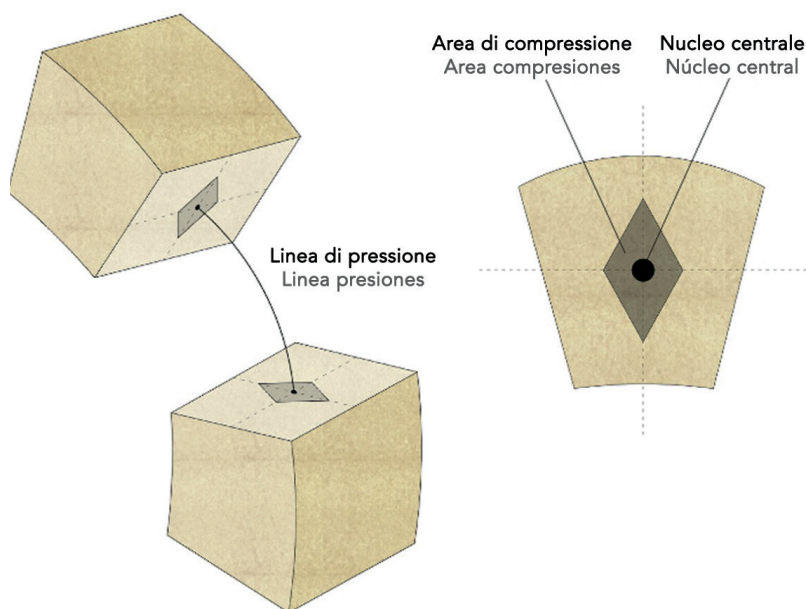


Fig. 6.1 Núcleo centrale, area di compressione e linea di pressione
Núcleo, área de compresión y línea de presión

Criterios generales

En la ciencia de la construcción, el arco identifica un sólido generado por la traslación de una figura plana a lo largo de una trayectoria perpendicular a ella y que pasa por su centro de gravedad, es decir, su directriz. Esta línea debe ser continua y plana, con radio de curvatura definido en cada punto, y la sección transversal debe permanecer constante, o variar con continuidad, a lo largo de toda la trayectoria.

Como se ha visto anteriormente, el arco puede asumir diferentes formas siguiendo diferentes trayectorias, a las que corresponde también un comportamiento estático diferente: por tanto, a menudo tienen, además de su valor estético y estilístico, una función estructural precisa. En la medida de lo posible, se debe buscar una mediación entre los requisitos estéticos y los estructurales y, reconociendo estos últimos como la esencia primaria del elemento, generalmente se prefiere la dirección más adecuada en función de las cargas que debe soportar el arco, por magnitud y distribución.

El comportamiento estático del arco se basa en que cada uno de sus segmentos está sometido a acciones de compresión, que mantienen la cohesión de los elementos. Existe, para cada sección, un lugar geométrico de puntos para los que, cuando se aplica una fuerza concentrada en ellos, sólo se generan fuerzas de compresión [Fig. 6.1]. Por lo tanto, siempre que las resultantes obtenidas en cada sección de un arco pasen por puntos situados dentro de su núcleo central, el arco estará trabajando a compresión, de lo contrario, se producirán tracciones que pueden ocasionar un fallo estructural. Las cargas soportadas por un arco van transmitiéndose por su interior de una dovela a la otra, hasta llegar a los apoyos que las reciben.

La forma de transmitir estas cargas está relacionada íntimamente con la curvatura del arco, de forma que, cuanto más próxima esté el punto de aplicación de la resultante de cada sección a su centro geométrico, más seguro y estable será su comportamiento. El fallo del arco puede producirse tanto por exceso de carga respecto a la sección o directriz adoptada, como por la rotura de tirantes o estribos bajo la acción del empuje.



Il comportamento statico dell'arco si basa sul fatto che ciascuno dei suoi conci è sottoposto ad azioni di compressione, che mantengono gli elementi coesi. Esiste, per ogni sezione, un luogo geometrico dei punti per i quali, applicando in essi una forza concentrata, si generano solo sforzi di compressione [Fig.6.1]. Dunque, qualora le risultanti ottenute in ciascuna delle sezioni successive di un arco risultino passare sempre per un punto appartenente a tale nucleo centrale, l'intero arco lavorerà in compressione; in caso contrario, si produrrà uno sforzo di trazione che potrà essere la causa di un cedimento strutturale del sistema. I carichi sostenuti da un arco si trasmettono al suo interno da un concio all'altro, fino a raggiungere i supporti verticali.

Il modo in cui questi carichi vengono trasmessi è strettamente legato alla curvatura dell'arco, per cui quanto più il punto di applicazione della risultante delle forze in ciascuna sezione è vicino al suo centro geometrico, tanto più sicuro e stabile sarà il comportamento globale. Il cedimento dell'arco può essere causato sia da un eccesso di carico rispetto alla sezione o alla direttrice adottata, sia dalla rottura di controventi o catene per effetto della componente spingente della risultante al livello dell'imposta.

Forme di rottura

La soluzione ideale, dal punto di vista della resistenza dell'arco, è quella in cui la linea delle pressioni e la direttrice dell'arco coincidono o comunque la funicolare delle pressioni approssimi quest'ultima il più possibile. Nel caso degli archi in muratura, non è sempre immediata la determinazione della linea di pressione, ma poiché in edilizia le campate e i carichi sono generalmente moderati e i coefficienti di sicurezza elevati, è generalmente sufficiente verificare il loro comportamento con un metodo grafico. Tale metodo grafico consiste nel risolvere il problema scomponendo l'arco e applicando i carichi che agiscono su di esso nel baricentro delle figure ottenute, ottenendo un poligono di vettori e la corrispondente funicolare. Successivamente, si arriva a definire la risultante del sistema in termini di grandezza, direzione e punto di applicazione.



Formas de rotura

La solución ideal, desde el punto de vista de la resistencia del arco, es aquella en que la línea de presiones coincida con la directriz del arco, o bien conseguir que el funicular de presiones se aproxime lo más posible a dicha línea directriz. En los casos de arcos de fábrica, no siempre es inmediato determinar su línea de presiones, pero como en edificación las luces y las cargas suelen ser moderados y los coeficientes de seguridad altos, generalmente resulta suficiente comprobar su comportamiento mediante un método gráfico. Dicho método gráfico consiste en resolver el problema descomponiendo del arco y aplicando las cargas que actúan, tanto de peso propio como otras, en el centro de gravedad de las figuras obtenidas, dando un polígono de vectores y su funicular correspondiente. A partir de ello se obtenía la resultante al sistema en cuanto a su magnitud, dirección y punto de aplicación. La forma general de rotura de los arcos puede establecerse, con las reservas oportunas, según se trate de un arco de medio punto, arco apuntado o arco escarzano.

Fig. 6.2 Arco puntellato in un edificio danneggiato dal terremoto, L'Aquila
Arco apuntalado en un edificio dañado por el terremoto, L'Aquila

La modalità generale di rottura di un arco può essere stabilita, con le dovute riserve, a seconda del fatto che si tratti di un arco a tutto sesto, a sesto acuto o a sesto ribassato.

Modalità di rottura dell'arco a tutto sesto

L'arco a tutto sesto si rompe a causa del carico eccessivo sulla chiave di volta, essendo allo stesso tempo alleggerito nelle porzioni laterali; lo si può stabilizzare aumentando il carico laterale e diminuendo quello in sommità [Fig. 6.3].

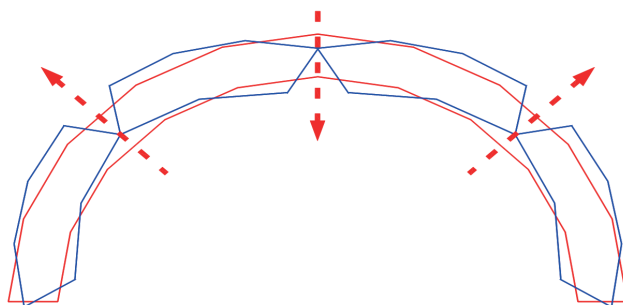


Fig. 6.3 Modalità di rottura dell'arco a tutto sesto
Forma de rottura del arco de medio punto

Modalità di rottura dell'arco a sesto acuto

L'arco a sesto acuto si rompe a causa di un eccesso di carico sui laterali e di una mancanza di carico sulla chiave di volta; aumentando il carico su quest'ultima e diminuendolo sui laterali la struttura si stabilizza [Fig.6.4].

Modalità di rottura dell'arco a sesto ribassato

Trattandosi di un arco ribassato, e prevalere l'entità della spinta esercitata sugli appoggi; in questa tipologia di archi è molto importante nei punti di imposta la presenza di elementi massicci pieni in muratura o a contrafforti per contrastare le spinte diagonali dirette verso l'esterno. [Fig. 6.5]

Forma de rotura del arco de medio punto

El arco de medio punto rompe por un exceso de carga en la clave, estando a la vez más aligerado en los riñones. Se puede estabilizar aumentando la carga en los riñones y disminuyéndola en la clave [Fig.6.3].

Forma de rotura del arco apuntado

El arco apuntado rompe por un exceso de carga en los riñones y falta de carga en la clave. Aumentar la carga en la clave y disminuirla en los riñones, lo estabiliza [Fig.6.4].

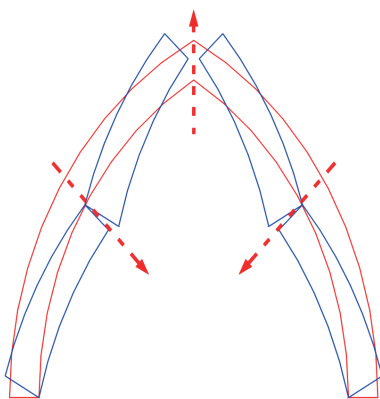


Fig. 6.4 Modalità di rottura dell'arco a sesto acuto
Forma de rotura del arco apuntado

Forma de rotura del arco escarzano

Al tratarse de un arco rebajado, predomina la magnitud del empuje ejercido en los apoyos. En estos arcos es muy importante la presencia de macizos de obra o contrafuertes en los arranques para contrarrestar los empujes [Fig.6.5].

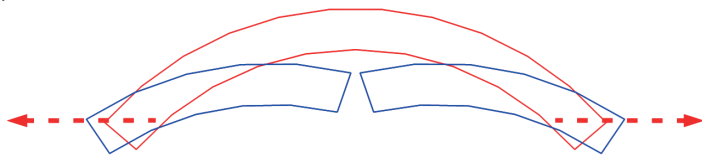


Fig. 6.5 Modalità di rottura dell'arco a sesto ribassato
Forma de rotura del arco rebajado

Esempio di metodo grafico per il calcolo dei piedritti

Il procedimento grafico utilizzato per determinare la grandezza del piedritto corrispondente a ciascun arco può essere utile per mettere in evidenza la relazione che sussiste tra la curvatura dell'arco e la spinta esercitata sugli appoggi: più un arco è ribassato, più inclinata sarà la sua risultante che genera e dunque maggiore la spinta che esercita sui piedritti. Il metodo consiste nel dividere l'arco in tre parti uguali, unendo i punti ottenuti con segmenti rettilinei (corde di ogni terza parte dell'arco).

Facendo centro in uno dei punti di imposta dell'arco (B) e con un raggio pari alla corda adiacente (A-B), si traccia un arco di circonferenza fino ad intersecare il prolungamento della corda presa come raggio (C).

La distanza orizzontale tra la verticale passante per il punto di imposta e la verticale passante per l'intersezione precedentemente individuata determina la dimensione minima del piedritto per quell'arco [Fig.6.6].

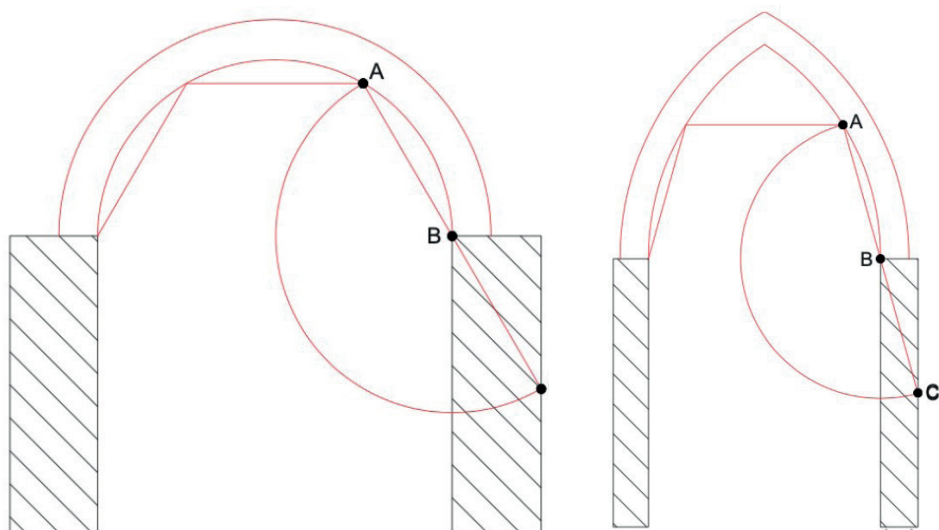


Fig. 6.6 Metodo grafico per il dimensionamento dei piedritti - casi differenti
Método gráfico para el dimensionamiento de los setribos - casos diferentes

Ejemplo de método grafico para el cálculo de los estribos

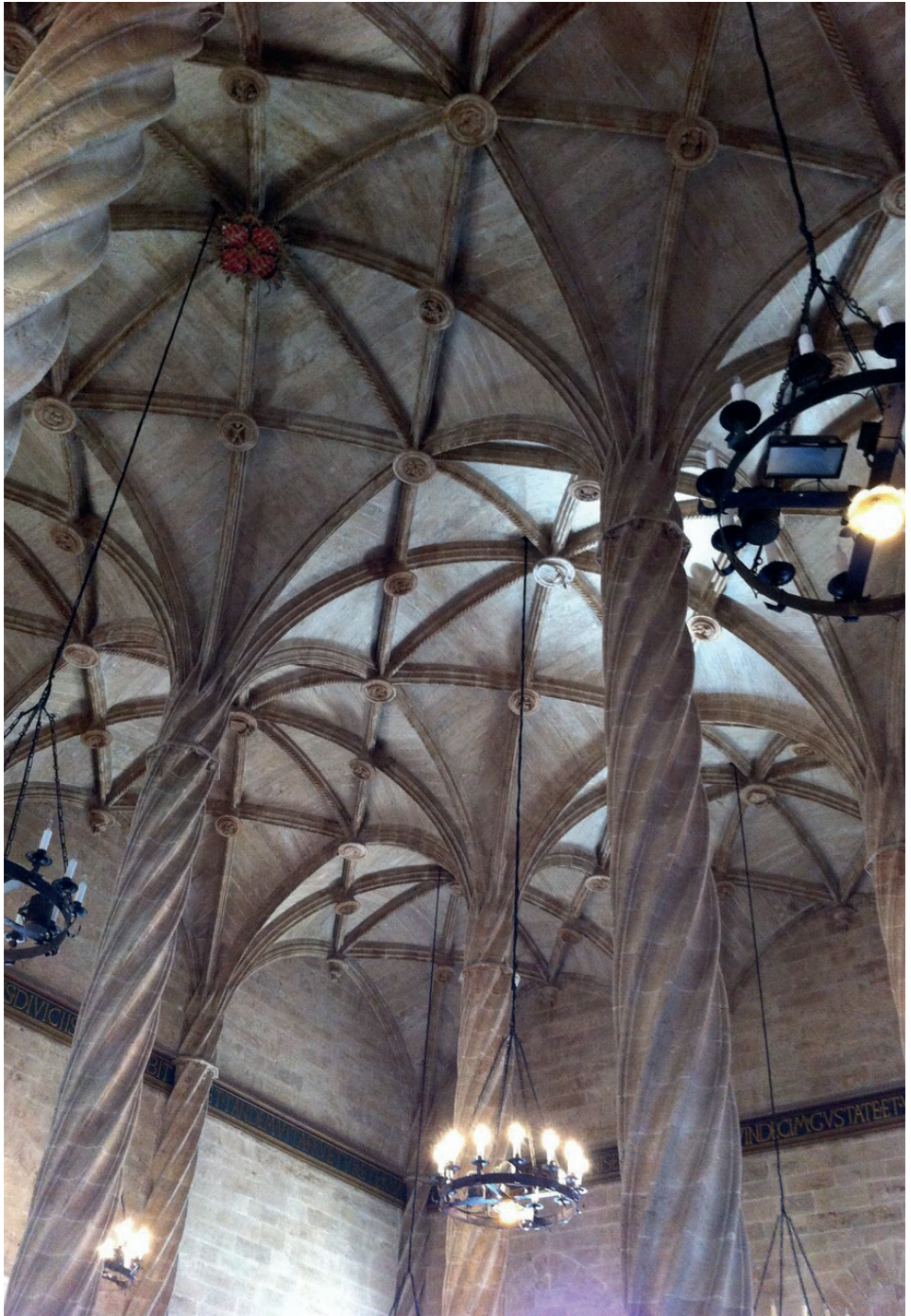
El procedimiento grafico que se utilizaba para determinar la magnitud del estribo que correspondía a cada arco puede servir para evidenciar la relación existente entre la curvatura del arco y el empuje que ejerce sobre los apoyos: cuanto más rebajado es un arco, más inclinada es su resultante y mayor el empuje que ejerce sobre los estribos. El método consiste en dividir el arco en tres partes iguales, uniéndose entre sí los puntos obtenidos con segmentos rectilíneos (cuerdas de cada tercera parte del arco).

Haciendo centro en uno de los arranques del arco (B), y con un radio igual a la cuerda anterior (A-B), se traza un arco de circunferencia hasta que corte a la prolongación de la cuerda tomada como radio (C).

La distancia horizontal entre la vertical que pasa en el arranque y la que pasa en la intersección anterior determina la dimensión mínima del estribo para ese arco [Fig.6.6].



Fig. 6.7 Patrimonio archeologico, Siria | Patrimonio archeologico, Siria



Loggia della Seta, Valencia | Lonja de la Seda, Valencia



VOLTA

INTRODUZIONE E CENNI STORICI

Introducción y antecedentes históricos

BÓVEDA



Definizione

In architettura il termine 'volta' indica qualsiasi struttura di copertura di uno spazio le cui caratteristiche principali siano la concavità della superficie interna e l'azione laterale di spinta esercitata dagli elementi che la costituiscono. La modalità di lavoro dei componenti di una volta è a compressione, essa trasmette il peso e le azioni che le gravitano sopra ai supporti e la risultante di tali forze, inclinata, esercita una spinta verso l'esterno. L'entità di tale spinta, o componente orizzontale della risultante, è direttamente correlata alla curvatura della volta: più quest'ultima sarà ribassata, più sarà inclinata la risultante e maggiore risulterà la spinta, al contrario, più la volta sarà ribassata, minori saranno inclinazione ed entità della spinta esercitata. I sostegni delle volte possono essere continui, come nel caso della chiusura di spazi tra pareti, o puntuali, come nel caso di volte su pilastri. Il comportamento meccanico della volta può essere assimilato a quello degli archi, anche se, nelle volte, sussiste una collaborazione tra archi adiacenti che migliora la stabilità del sistema globale. In generale, l'equilibrio è dovuto alla forma data ai conci, che si sostengono a vicenda, in parte anche grazie all'azione della gravità.

En arquitectura, el término bóveda identifica cualquier estructura que cubre un espacio cuyas características principales son la concavidad de su superficie interna y el empuje lateral ejercido por sus elementos constitutivos. El modo de trabajo de las piezas que la componen es a compresión, transmitiendo el peso y las acciones que sobre ellas gravitan a los apoyos. La resultante inclinada de la bóveda ejerce un empuje, hacia el exterior. La magnitud de este empuje, o componente horizontal de la resultante, está en relación directa con la curvatura de la bóveda. La resultante es mas inclinada, con empujes mayores, cuanto más rebajada es la bóveda, mientras que la resultante es más vertical con empujes menores, cuanto mas peraltada es la bóveda. Los apoyos de las bóvedas pueden ser continuos, como en el caso de cerrar espacios entre muros, o bien puntuales, como en el caso de realizarse sobre pilares. El comportamiento mecánico de la bóveda se puede asimilar al de los arcos, aunque, en las bóvedas, existe una colaboración entre arcos adyacentes que mejoran su estabilidad. En general, el equilibrio se debe a la forma dada a las dovelas que se sostienen entre sí, gracias también a la propia acción de gravedad.

Cenni storici

La comparsa di sistema costruttivi voltati nella storia dell'architettura è di difficile individuazione, alla pari di quella dell'arco, ma è possibile affermare che le sue prime testimonianze siano antichissime ed individuabili, in forme e modalità esecutive anche molto diverse tra loro, nelle costruzioni di varie popolazioni primitive. Sistemi statici primitivi di pseudovolte e pseudocupole, ovvero di coperture di ambienti per mezzo di superfici ricurve ottenute mediante sovrapposizione di cerchi concentrici, appaiono già nelle più antiche civiltà della protostoria asiatica e mediterranea; i primi rudimentali tentativi di costruire vere e proprie volte sembra debbano essere ricercati tra i Sumeri, nell'Antico Egitto e nella Persia. Nel mondo delle costruzioni greche risultano praticamente assenti volte e cupole, sistemi che vedono invece il loro massimo sviluppo nell'architettura dei Romani, i quali si riallacciarono ad una antica tradizione etrusco-italica e svilupparono il tema giungendo in epoca imperiale a sistemi di grande interesse, sia dal punto di vista tecnico che da quello spaziale. I Romani, impiegando pietra, laterizi o conglomerato cementizio, costruirono principalmente volte a botte e cupole semisferiche, strutture che permisero loro di ottenere grandi spazi coperti, come le terme o le basiliche. In una prima fase si trattava di elementi decisamente massivi, ai quali si collegavano due aspetti costruttivi complessi da controllare; in primo luogo, era necessario utilizzare centine o casseforme grandi e pesanti per sostenere i pezzi e soprattutto, una volta costruite le opere, era necessario contrastare o verticalizzare la spinta orizzontale che si produceva sui supporti.

A tale scopo, era possibile aggiungere altre volte di dimensioni minori addossate alla prima o muri di sostegno di dimensioni notevoli. La graduale padronanza nell'uso dei materiali portò i costruttori romani dalla tipologia quasi monolitica alla definizione del sistema statico costolonato, usato dal I° secolo a.C., adottato allo scopo di frazionare i pesi della calotta e scaricarli tramite la nervatura sui nodi puntuali contrastati dai contrafforti. Partendo dagli schemi costruttivi romani misti ad apporti di tradizioni tecniche ed artistiche provenienti dall'Oriente, i Bizantini elaborarono volte e cupole leggere e di grandi dimensioni, realizzate mediante l'uso di laterizi vuoti di

La aparición de los sistemas constructivos abovedados en la historia de la arquitectura es difícil de identificar con precisión, así como la del arco, pero es posible afirmar que sus primeros testimonios son muy antiguos y se pueden identificar, en las construcciones de diferentes poblaciones primitivas. Los primitivos sistemas estáticos de pseudobóvedas y pseudocúpulas, es decir de coberturas de espacios por superficies curvas obtenidas mediante superposición de círculos concéntricos, aparecen ya en las civilizaciones más antiguas de la protohistoria asiática y mediterránea; los primeros intentos rudimentarios de construir verdaderas bóvedas parecen encontrarse entre los Sumerios, en el antiguo Egipto y en Persia. Las bóvedas y las cúpulas prácticamente nunca se encuentran en el mundo de las construcciones griegas, se trata de sistemas que vieron su mayor desarrollo en la arquitectura de los Romanos, que se basaron en una antigua tradición etrusco-italica y desarrollaron el tema, llegando a sistemas de gran interés, tanto técnico como espacial, en la época imperial. Los romanos, utilizando piedra, ladrillos o conglomerado de hormigón, construyeron principalmente bóvedas de cañón y cúpulas esféricas, estructuras que les permitieron obtener grandes espacios cubiertos, como baños o basílicas. Al principio, se trataba de elementos muy masivos, a los que se unían dos complejos aspectos constructivos que había que controlar; en primer lugar, era necesario utilizar grandes y pesadas cimbras o encofrados provisionales en los que apoyar las piezas y luego, era necesario contrarrestar o verticalizar el empuje que se producía sobre los apoyos.

Para conseguirlo, se podían adosar otras naves menores abovedadas, o bien los apoyos tenían que ser de considerable tamaño. El dominio en el uso de los materiales llevó a los constructores romanos desde la tipología casi monolítica hasta la definición del sistema estático, usado desde el siglo I a.C., pensado para fraccionar los pesos de la cubierta y descargarlos a través de la nervadura sobre nudos puntuales contrastados por los contrafuertes. A partir de los esquemas constructivos romanos mezclados con aportaciones de tradiciones técnicas y artísticas procedentes de Oriente, los Bizantinos elaboraron bóvedas y cúpulas ligeras y grandes, realizadas mediante el uso



forma cilindrica incastrati l'un l'altro e affogati in un unico getto di malta; altri elementi innovativi e peculiari dell'architettura bizantina sono un notevole uso dei contrafforti e l'impiego della semicupola addossata a cupole di grandi dimensioni per contrastarne la spinta. Nel Medioevo, i costruttori lombardi e successivamente romanici partirono dalla struttura della volta a crociera per sviluppare il tipo di organismo architettonico della chiesa a navate e campate, in cui il sistema statico, che scarica il peso della copertura centrale attraverso le campate laterali su massicci muri perimetrali esterni, si avvale degli stessi accorgimenti costruttivi presenti negli edifici romani. Il sistema fu portato alle estreme conseguenze dagli architetti gotici, con l'aggiunta dell'uso dell'arco a sesto acuto. Il gotico ha apportato una concezione strutturale innovativa dell'edificio, fornendo una soluzione al problema della spinta delle volte sulle pareti con la trasmissione delle sollecitazioni in modo puntuale, attraverso le nervature, scaricate all'esterno per mezzo di archi rampanti e contrafforti. Una lettura critica di tali sistemi permette di ravvisare in questo approccio il punto di partenza per i sistemi strutturali di tipo scheletrico che si sarebbero sviluppati successivamente, con cemento armato ed acciaio. Il Rinascimento segnò un certo ritorno ai modelli più antichi, le grandi superfici ricurve delle coperture furono chiamate a chiudere involucri spaziali prospetticamente definiti e raccolti, con una certa preferenza nell'uso di volte a botte e cupole sferiche o a base poligonale. In questa epoca non mancarono esempi di straordinario ingegno costruttivo, come la cupola a doppia calotta di Santa Maria del Fiore a Firenze, di Brunelleschi.

Il '600 e il '700 apportarono invece novità dal punto di vista della elaborazione formale, con cupole dalle geometrie originali, per le quali furono elaborati sistemi tecnici di grande effetto estetico e spaziale. Successivamente, l'introduzione del ferro, dell'acciaio e del cemento armato ha sostanzialmente offerto nuove efficacissime soluzioni ai problemi architettonici fino ad allora risolti con volte o cupole in muratura, come, per esempio, nel caso della copertura di ambienti di notevoli dimensioni o nella costruzione di grandi infrastrutture, aprendo infinite nuove possibilità



de ladrillos huecos de forma cilíndrica, ahogados en una única colada de mortero; otros elementos innovadores y peculiares de la arquitectura bizantina son un notable uso de contrafuertes y el empleo de semicúpulas adosadas como forma de aguantar los empujes de las grandes cúpulas. En la Edad Media, los constructores lombardos y posteriormente los románicos, a partir de las estructuras de bóveda de crucería, desarrollaron el tipo de organismo arquitectónico de la iglesia con naves y tramos, en el que el sistema estático, que descarga el peso de la cubierta central a través de los tramos laterales sobre los macizos muros perimetrales exteriores, hace uso de los mismos dispositivos constructivos que se encontraban en los edificios romanos. El sistema fue llevado al extremo por los arquitectos góticos, con la adición del uso del arco apuntado. El gótico aporta una concepción estructural del edificio innovadora, da solución al problema de los empujes de las bóvedas sobre los muros, recogiendo y transmitiendo los esfuerzos de modo puntual, a través de los nervios, para trasladarlos al exterior mediante arcos arbotantes y contrafuertes. Una lectura crítica de dichos sistemas permite ver este planteamiento como el arranque de los sistemas estructurales esqueléticos que se desarrollaron posteriormente, con hormigón armado y acero. El Renacimiento marcó una vuelta a los modelos más antiguos; las grandes superficies curvas de las cubiertas se convirtieron en envolventes espaciales definidas y limitadas, con cierta preferencia por el uso de bóvedas de cañón y cúpulas esféricas o de base poligonal. En esa época no faltaron ejemplos de extraordinario ingenio constructivo, como la cúpula de doble hoja proyectada por Brunelleschi en Santa María del Fiore en Florencia.

Los siglos XVII y XVIII, en cambio, aportaron novedades desde el punto de vista de la elaboración formal con cúpulas de geometrías originales, para las cuales se elaboraron sistemas técnicos de gran efecto estético y espacial. Posteriormente, la introducción del hierro, del acero y del hormigón armado ofreció sustancialmente soluciones nuevas y muy eficaces a los problemas arquitectónicos que hasta entonces se habían resuelto con bóvedas o cúpulas de mampostería, como, por ejemplo, cubrir espacios

in campo tecnico e stilistico a discapito dei sistemi voltati. Questi ultimi, in ogni caso, continuarono ad esistere, sotto nuove sorprendenti vesti: si assiste alla realizzazione di cupole vetrate con sottostruttura in metallo o plasmate in cemento armato. Tra la fine dell'Ottocento e l'inizio del Novecento, impossibile non citare alcuni casi eccezionali ad opera dei maestri spagnoli Rafael Guastavino e Antoni Gaudí, i quali continuarono a costruire in muratura e impiegando la "rasilla", un mattone finissimo di piccole dimensioni, furono in grado di creare volte a copertura di spazi divenuti poi iconici. È chiaro che oggi i sistemi costruttivi tradizionali a volta, cioè in muratura, hanno perso la loro importanza nel mondo dell'architettura. Ciononostante, continuano ad affascinare gli architetti di tutto il mondo, che li utilizzano per realizzare opere uniche dall'estetica eccezionale.

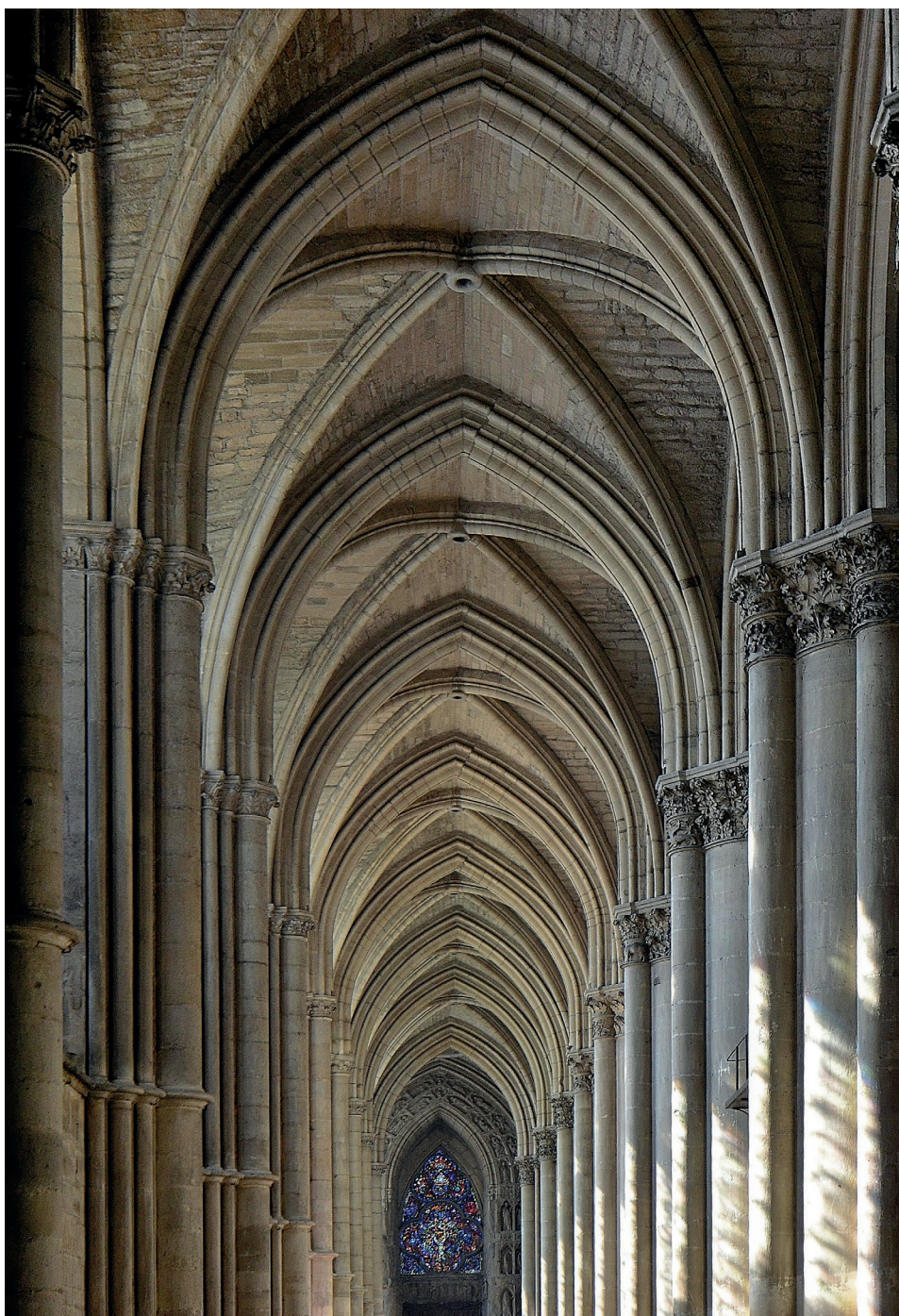


Fig. 7.1 Volta e cupola vetrata, Milano | Bóveda y cúpula acristalada, Milán

amplios o construir grandes infraestructuras abriendo un sinfín de nuevas posibilidades en el ámbito técnico y estilístico en lugar de los sistemas abovedados. Sin embargo, estos últimos siguieron existiendo en nuevas y sorprendentes formas: se proyectan bóvedas acristaladas y con piezas fundidas y forjadas o moldeadas en hormigón armado. Entre finales del siglo XIX y principios del XX, es justo destacar algunos casos excepcionales de los maestros españoles Rafael Guastavino y Antonio Gaudí, que siguieron construyendo en obra de fábrica y, utilizando la *rasilla*, un ladrillo de poco espesor y de reducidas dimensiones, fueron capaces de crear bóvedas para cubrir espacios que se convirtieron en icónicos. Es evidente que hoy en día los sistemas constructivos abovedados tradicionales, es decir en obra de fábrica, han perdido protagonismo en el mundo de la arquitectura. Sin embargo, siguen ejerciendo una gran fascinación sobre los arquitectos de todo el mundo, que los utilizan para obras singulares con una estética excepcional.



Fig. 7.2 Volta vetrata Museo d'Orsay, Parigi | Bóveda acristalada Museo d'Orsay, París



Volta a crociera della Cattedrale, Reims | Bóveda de crucería de la Catedral, Reims



PARTI E COMPONENTI DI UNA VOLTA

Partes y componentes de una bóveda



parti e componenti di una volta

La differenza tra arco e volta può essere stabilita, in primo luogo, sulla base della loro funzione, poiché l'uno il primo serve primariamente per individuare un varco mentre l'altra fornisce una soluzione alla necessità di coprire uno spazio; in secondo luogo, i due elementi differiscono per le dimensioni, essendo un arco considerabile come una figura bidimensionale, indipendentemente dalla sua profondità, mentre una volta è necessariamente tridimensionale. A parte queste sfumature, gli elementi e le parti della volta presentano un grande parallelismo con quelle dell'arco, avendo in comune molti pezzi con la stessa funzione e lo stesso nome [Fig.41-42]. Oltre agli elementi già citati per l'arco, ovvero: piedritti, imposte, estradosso, intradosso, conci, chiave di volta, freccia, luce, spessore, ecc. che fanno parte anche delle volte, è possibile distinguere altri elementi peculiari, di seguito descritti.

Linea direttrice: è l'arco che determina la forma della volta, generandola per traslazione o rotazione lungo un asse.

Generatrice: ciascuna delle linee, rette o curve, che determinano la superficie di una volta, unendo tutti le posizioni successive di ciascun punto della direttrice.

Superficie direttrice: o superficie media, è la superficie equidistante tra intradosso ed estradosso della volta e ne definisce la forma.

Asse: è la linea creata dalle successive posizioni dei centri della curva generatrice della volta; generalmente costituisce un asse di simmetria.

Navata: è uno degli spazi tra le pareti o le file di arcate che si estendono per tutta la lunghezza di un edificio, di solito religioso.

Campata: spazio compreso tra due appoggi o piedritti consecutivi di ponti, portici o altra struttura ad archi o volte; nello specifico, anche ognuno degli spazi in cui è divisa la navata di una chiesa dall'incontro degli archi longitudinali e trasversi.

partes y componentes de una bóveda

La diferencia entre arco y bóveda puede establecerse, en primer lugar, atendiendo a su función, ya que ésta da solución a la necesidad de cubrir un espacio y aquel a la necesidad de salvar un vano; en segundo lugar, atendiendo a sus dimensiones, al poder considera un arco como una figura bidimensional, prescindiendo de su espesor, y la bóveda como una figura tridimensional. Fuera de estos matices, los elementos y partes de una bóveda presentan un gran paralelismo con el arco, teniendo en común muchas piezas con la misma función y nombradas iguales [Fig.41-42]. Además de los elementos ya citados en el arco, es decir: apoyos, arranque, estrados, intradós, dovelas, clave, flecha, luz, canto, etc., que también forman parte de las bóvedas, es posible distinguir otros elementos peculiares, que se exponen a continuación.

Línea directriz: es el arco que determina la forma de la bóveda, generándola por traslación o rotación a lo largo de un eje.

Generatriz: cada una de las líneas, rectas o curvas, que determinan la superficie de una bóveda, uniendo todas las posiciones sucesivas de cada punto de la directriz.

Superficie directriz: o también superficie media, es la superficie que se encuentra equidistante entre el intradós y el extradós de la bóveda.

Eje: es la línea creada por las posiciones sucesivas de los centros de la curva generatriz de la bóveda; generalmente constituye un eje de simetría.

Nave: es cada uno de los espacios que entre muros o filas de arcadas se extienden a lo largo de un edificio, generalmente religioso.

Tramo: espacio entre dos soportes o pilares consecutivos de puentes, arcadas u otras estructuras arqueadas o abovedadas; también cada uno de los espacios en que se divide la nave de una iglesia, por el encuentro de los arcos longitudinales y transversales.

Nervatura o Costolone: elemento lineare che sporge in rilievo nell'intradosso di una volta; si trova generalmente all'intersezione tra due superfici diverse, nelle volte composte, ma può servire anche come rinforzo o decorazione; infatti, ha funzioni formali, strutturali e costruttive.

Vela: superfici di riempimento tra i costoloni di una volta; non hanno una funzione strutturale nell'insieme, ma servono solo come chiusura, resistendo solo al proprio peso.



Fig. 8.1 Modello in scala della costruzione di una volta costolonata
Modelo a escala de la construcción de una bóveda nervada

Nervio: elemento lineal que se destaca en el intradós de una bóveda; generalmente se encuentra cuando hay una intersección entre dos superficies diferentes en las bóvedas compuestas, pero también pueden servir de refuerzo o decoración; de hecho, tienen funciones formales, estructurales y constructivas.

Plementería: superficies de relleno entre los nervios de una bóveda; no tienen una función estructural en el conjunto, solo sirven de cierre, resistiendo únicamente su propio peso.

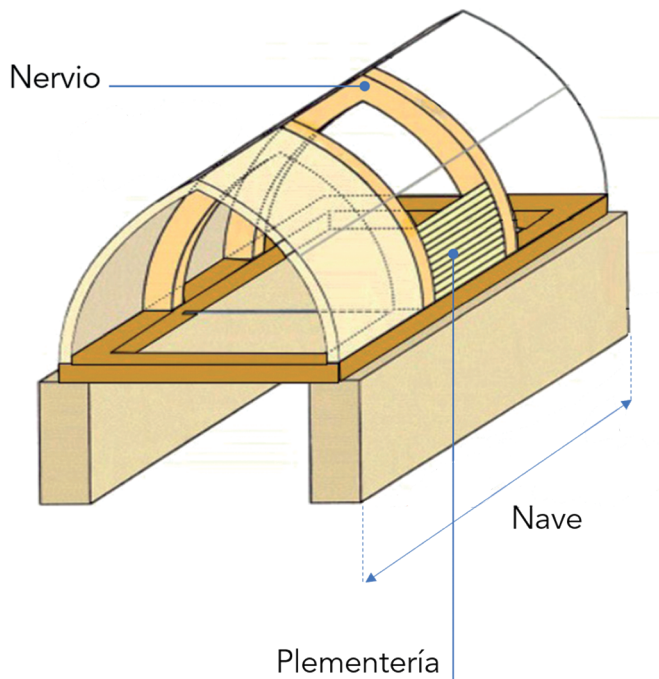


Fig. 8.2 Elementi costruttivi della volta
Elementos constructivos de la bóveda



Particolare interno del Pantheon, Roma | Detalle del interior del Pantheon, Roma



TIPOLOGIE DI VOLTE

Tipologías de bóvedas



classificazione in base all'origine

La classificazione delle volte, come quella degli archi, richiede necessariamente semplificazioni e generalizzazioni, trattandosi di un elemento costruttivo molto diffuso e sviluppato in un'enorme varietà di tipologie. Nella trattazione che segue si è cercato di mostrare i tipi più diffusi e caratteristici.

Tutte le numerose e variegata forme che possono assumere le volte sono riconducibili a due macro categorie fondamentali, la cilindrica e la sferica, relazionate alle due diversi modalità di generazione che possono avere da un punto di vista geometrico.

- **Originate per traslazione:** cilindriche, sono le volte propriamente dette; sono quelle generate da un arco piano che trasla lungo generatrici rettilinee tra loro parallele, cioè lungo un asse orizzontale o inclinato, che passa per il centro della sua linea di imposta. Questo tipo di volta è caratterizzato, dal punto di vista meccanico, da una distribuzione piana delle sollecitazioni.
- **Originate dalla rotazione:** sferiche, sono quelle chiamate cupole; sono generate dalla rotazione di un arco meridiano attorno ad un asse verticale. Dal punto di vista meccanico, producono una distribuzione spaziale delle sollecitazioni.

Il principale criterio di raggruppamento e classificazione delle volte riguarda la caratterizzazione formale delle superfici di intradosso; ogni tipologia formale trova poi identificazione anche nella struttura e nel sistema statico corrispondente.

Si distinguono due categorie principali:

- **Semplici:** sono quelle che presentano l'intradosso formato per una sola superficie geometrica.
- **Composte o complesse:** sono il risultato dell'intersezione o della composizione di due o più volte semplici, con superficie d'intradosso discontinua.

Abordar la clasificación de las bóvedas, igual de la de los arcos, obliga a hacer simplificaciones y generalizaciones, al tratarse de un elemento constructivo muy difundido y desarrollado en una enorme variedad de tipologías. En la siguiente exposición, se ha intentado enseñar los tipos más comunes y característicos.

Todas las numerosas y variadas formas que pueden adoptar las bóvedas derivan de dos macro categorías básicas, la cilíndrica y la esférica, relacionadas con dos orígenes diferentes que se pueden tener desde el punto de vista geométrico.

- **Originadas por traslación:** cilíndricas, llamadas en general bóvedas; son las generadas por un arco directriz que se desplaza según generatrices rectas y paralelas entre sí, es decir, según un eje horizontal o inclinado, que pasa por el centro de su línea de arranque. Este tipo de bóvedas se caracteriza, mecánicamente hablando, por producir una distribución plana de tensiones.
- **Originadas por rotación:** esféricas, son las que se llaman cúpulas; están engendradas por el giro de un arco meridiano alrededor de un eje vertical. Mecánicamente hablando, producen una distribución espacial de tensiones.

El principal criterio de agrupación y clasificación de las bóvedas se refiere a la caracterización formal de las superficies del intradós; cada tipo formal se identifica también en la estructura y el sistema estático correspondientes.

Se pueden distinguir dos categorías principales:

- **Simple:** son las que presentan su intradós formado por una sola superficie geométrica.
- **Compuestas o complejas:** son las que resultan de la intersección o composición de dos o más bóvedas simples con una superficie de intradós discontinua.

classificazione in base alla forma

Semplici

Cilindrica

Conosciuta come volta a botte, ha la forma di un semicilindro, creato dalla traslazione di un arco lungo un asse. Definisce superfici semicilindriche sia all'interno che all'esterno; è la più facile da costruire e allo stesso tempo la più antica.

Queste volte trovano appoggio lineare e continuo, lungo le pareti laterali alle quali trasmettono i carichi e le spinte. La curva direttrice, nel caso delle volte cilindriche, è generalmente un semicerchio, anche se potrebbe essere qualsiasi altro arco, semplice o composto.

È possibile identificare diverse tipologie con piccole variazioni geometriche; in particolare, la volta sarà detta a botte rettilinea quando l'asse è orizzontale e perpendicolare al piano della curva direttiva della superficie, a botte obliqua se l'asse, pur essendo orizzontale, non è perpendicolare a questo piano, e a botte discendente quando l'asse, pur essendo perpendicolare al piano di partenza, non è orizzontale [Fig.9.1 - 9.2].

- *Volta a botte rettilinea*
- *Volta a botte obliqua*
- *Volta a botte discendente*

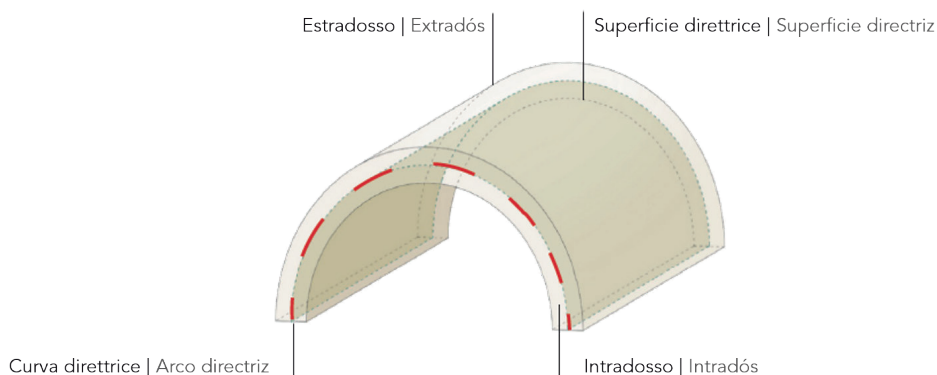


Fig. 9.1 Volta a botte
Bóveda de cañón

Simples

Cilíndrica

Conocida como bóveda de cañón, tiene la forma de un semicilindro, engendrado por el desplazamiento de un arco directriz a lo largo de un eje. Define, tanto en su intradós, como en su extradós, superficies semicilíndricas. Es la más fácil de construir, a la vez que la más antigua. Estas bóvedas descansan a lo largo de los muros a los que transmiten la cargas y los empujes. La curva directriz, cuando se trata de bóvedas cilíndricas, es generalmente una semicircunferencia, aunque podría ser cualquier otro arco, simple o compuesto.

Es posible identificar diferentes tipos con pequeñas variaciones geométricas; en particular, la bóveda se denomina "de cañón recto" cuando el eje es horizontal y perpendicular al plano de la curva directriz de la superficie, de cañón oblicuo si el eje, siendo horizontal, no es perpendicular a dicho plano, y de cañón en bajada cuando aun siendo el eje perpendicular al plano de arranque, no es horizontal [Fig.9.1 - 9.2].

- Cañón recto
- Cañón oblicuo
- Cañón en bajada

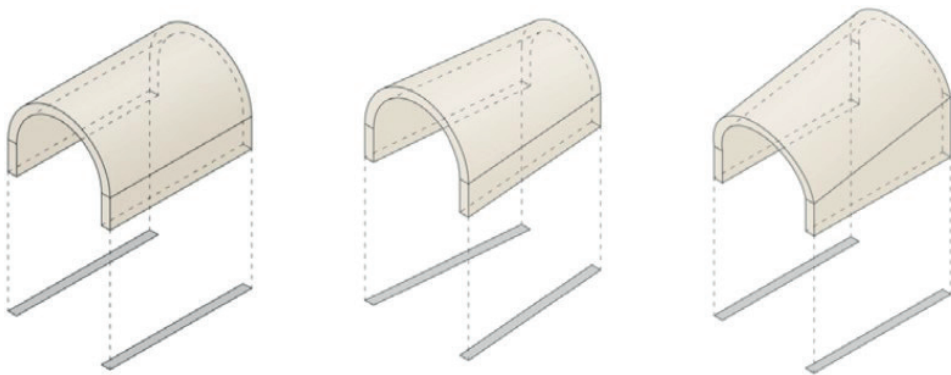


Fig. 9.2 Volta a botte rettilinea | obliqua | discendente
Bóveda de cañón recto | de cañón oblicuo | de cañón en bajada

Conica

È la volta la cui superficie è generata da una retta che passa per un punto fisso nello spazio e poggia sul contorno di una curva direttrice della superficie. Normalmente, questo tipo di volta è in realtà a forma di tronco di cono, poiché non arriva ad iniziare, o finire, nel vertice o punto fisso di cui sopra. Può avere un asse verticale o orizzontale.

- *di asse orizzontale* [Fig. 9.3]
- *di asse verticale* [Fig. 9.4]

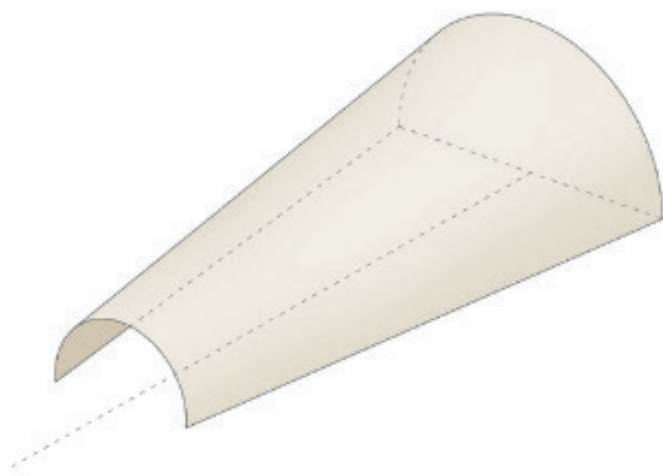


Fig. 9.3 Volta conica sull'asse orizzontale
Bóveda cónica de eje horizontal

Cónica

Es la bóveda cuya superficie está engendrada por una recta que pasando por un punto fijo del espacio se apoya en el contorno de una curva o directriz de la superficie. Normalmente, este tipo de bóveda en realidad es troncocónica ya que no llega a arrancar, u ocurrir, en el vértice o punto fijo antes citado. Puede tener eje vertical o horizontal.

- *de eje horizontal* [Fig. 9.3]
- *de eje vertical* [Fig. 9.4]



Fig. 9.4 Volta conica sull'asse verticale
Bóveda cónica de eje vertical



Di rivoluzione

Si tratta delle cupole, superfici create dalla rotazione di una linea curva attorno ad un asse. A seconda di ciò che le genera, è possibile ottenere diverse cupole, la più comune delle quali è quella sferica. Ne esistono anche altri tipi: la cupola ellittica corrisponde a un ellissoide a tre assi o a una cupola sferica.

Cupola sferica

Si tratta di una volta di rivoluzione creata da un arco di circonferenza il cui asse verticale di simmetria coincide con l'asse di rotazione. Spesso ha uno spessore variabile, cioè la superficie dell'intradosso e quella dell'estradosso non sono parallele e la cupola risulta avere uno spessore più piccolo nella parte sommitale e progressivamente più grande verso la base, accorgimento che ne migliora le condizioni di equilibrio e stabilità.

Queste cupole assumono il nome dell'arco che, ruotando, le genera: quando si parte da un arco semicircolare, si ottiene una cupola chiamata semicircolare; a partire da un arco ribassato, si ha una cupola ribassata; un arco a sesto acuto origina una cupola a sesto acuto; dall'arco ogivale si genera la cupola bulbiforme; ecc.

Se la cupola è aperta, cioè corrisponde a una mezza cupola, si chiama nicchia o volta a conchiglia.



De revolución

Se trata de las cúpulas, engendradas por el giro de una línea curva alrededor de un eje. Según sea que la engendre, es posible obtener diferentes cúpulas, siendo la más frecuente de todas ellas la cúpula esférica. Otras tipologías: la elíptica corresponde a un elipsoide de tres ejes; el paraboloide de revolución, la bóveda tórica, etc.

Bóveda esférica

Es aquella bóveda de revolución engendrada por un arco de circunferencia cuyo eje de simetría vertical coincide con el eje de giro. Es frecuente que tenga un canto variable, es decir que la superficie de su intradós y la de su extradós no son paralelas, de forma que la cúpula tiene un canto menor en la parte superior y progresivamente mayor hacia el arranque, mejorando sus condiciones de equilibrio y estabilidad.

Dichas cúpulas reciben el nombre del arco que, girando, las generan, así cuando se obtiene con un arco de medio punto, se llama cúpula de medio punto; si se origina de un arco rebajado, se llama cúpula rebajada; un arco apuntado da lugar a la cúpula apuntada; del arco conoidal se engendra la cúpula bulbiforme; etc.

Si la cúpula es abierta, es decir, corresponde a media cúpula, se llama bóveda de nicho o de concha.



Cupola a doppia calotta

Una varietà, che alleggerisce notevolmente il peso delle grandi cupole in muratura e allo stesso tempo non richiede l'uso di grandi sottostrutture lignee, è la cosiddetta cupola a doppia calotta, sviluppata, ad esempio, da Brunelleschi in Santa Maria del Fiore a Firenze.

Come suggerisce il nome, è costituito da due "calotte", una interna ed una esterna, che racchiudono uno spazio tra di loro. Ciascuna delle calotte ha una curvatura diversa. La calotta più interna è più ribassata mentre quella esterna è più rialzata; sono unite tra loro da pareti radiali a sviluppo elicoidale. La risultante della calotta esterna, essendo meno inclinata, tende a verticalizzare la risultante di quella interna, diminuendone la spinta. Il fatto che la calotta esterna sia più rialzata di quella interna permette anche, dal punto di vista estetico, di rendere la cupola più slanciata se vista dall'esterno.

Cupola a vela

Si ottiene dall'intersezione di una cupola sferica con i quattro piani verticali che delimitano una pianta quadrata o rettangolare. Se il quadrato o il rettangolo è inscritto nella circonferenza esterna della cupola sferica, si ottiene una calotta sferica sostenuta da quattro pennacchi.



Cúpula de doble hoja

Una variedad, que permite aligerar considerablemente el peso de las grandes cupulas de obra de fábrica, a la vez que no necesita utilizar grandes cimbras, es la llamada cúpula de doble hoja, desarrollada entre otros por Brunelleschi en Santa María del Fiore en Florencia.

Como su nombre indica, está formada por dos 'hojas', una interior y una exterior, dejando un espacio entre ellas. Cada una de las hojas tiene una curvatura distinta. La hoja interior es más rebajada y la exterior más peraltada, estando unidas por muros radiales con desarrollo helicoidal. La resultante de la hoja exterior, al ser menos inclinada, tiende a verticalizar la resultante de la hoja interior, disminuyendo su empuje. El hecho que la hoja exterior sea más peraltada que la interior, también permite, estéticamente hablando, que la cúpula resulte más esbelta desde el exterior.

Bóveda vaida

Se obtiene por la intersección de una cúpula esférica por los cuatro planos verticales que delimitan una planta cuadrada o rectangular.

Si el cuadrado o el rectángulo están inscritos en la circunferencia exterior de la cúpula esférica, se obtiene un casquete esférico sustentado por cuatro pechinas.



Composte

- Intersezione di volte a botte
- Intersezione di cupole
- Nervate

Intersezione di volta a botte

A partire dagli archi diagonali prodotti dall'intersezione di due volte a botte aventi lo stesso piano di imposta e la stessa freccia, è possibile ottenere, a seconda della superficie considerata, quattro unghie o quattro fusi.

Volta a crociera

È il risultato dell'unione di quattro unghie, dunque presenta quattro archi frontali; quando la pianta è quadrata, le curve direttrici sono le stesse e, quindi, i quattro archi frontali sono uguali [Fig. 9.5].

A differenza della volta a botte, che è sostenuta per tutta la sua lunghezza, la volta a crociera appoggia solo in quattro punti. Gli spigoli sono gli elementi maggiormente sollecitati, poiché le risultanti parziali dei carichi vengono trasmesse attraverso di essi, ed è molto importante che la disposizione dei conci utilizzata nella fase di costruzione tenga conto di questa circostanza.



Compuestas

- Intersezione di volte a botte
- Intersezione di cupole
- Nervate

Intersección de cañones

A partir de los arcos diagonales que se producen en la intersección de dos cañones que tengan el mismo plano de arranque e igual monte, es posible obtener, según la zona que se considere, o cuatro lunetos o cuatro tímpanos.

Bóveda por arista

Se produce por la agrupación de cuatro lunetos, por lo tanto, presenta cuatro arcos frontales; cuando la planta es cuadrada, las directrices son iguales y, por lo tanto, los cuatro arcos frontales también [Fig. 9.5].

A diferencia de la bóveda de cañón, que apoya a lo largo de toda su longitud, la bóveda por arista se apoya en cuatro puntos. Las aristas constituyen la zona de máximo trabajo, al transmitirse por ellas las resultantes parciales de las cargas, siendo muy importante que, el aparejo utilizado en su construcción tenga presente esta circunstancia.

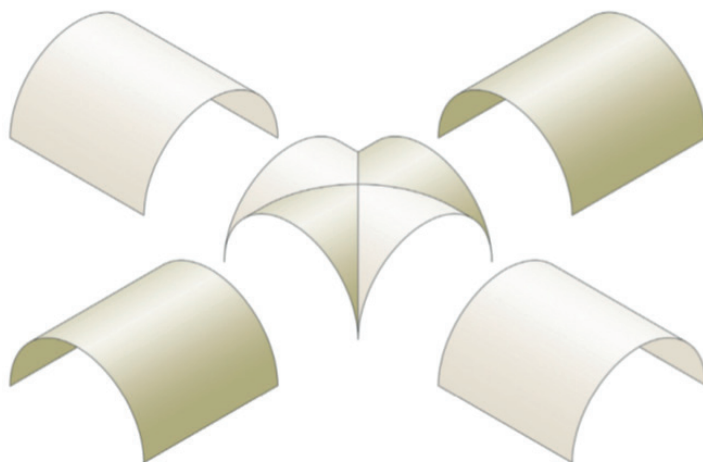


Fig. 9.5 Volta a crociera
Bóveda por arista

Esistono le seguenti varianti della volta a crociera:

Romana:

Si ha quando le due volte a botte semicircolari intersecanti hanno la stessa luce e sono ortogonali tra loro. I quattro archi di testa sono semicircolari e gli archi diagonali sono semiellissi, tutti con la chiave di volta allo stesso livello.

Rialzata:

Sia gli archi di testa che quelli diagonali sono a tutto sesto; i diagonali, avendo una luce maggiore, hanno la chiave di volta più alta.

Gotica:

Le volte che si intersecano sono a sesto acuto, con lo stesso piano di imposta e la stessa freccia; di conseguenza, gli archi di testa e gli archi diagonali sono a sesto acuto. In questo caso, le chiavi di volta sono tutte allo stesso livello. [Fig. 9.6]

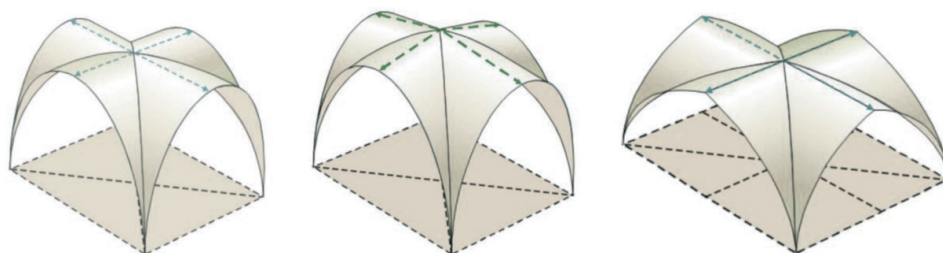


Fig. 9.6 Volta a crociera romana | rialzata | gotica
Bóveda por arista romana | realzada| gótica

La bóveda por arista presenta las siguientes variantes:

- **Romana:**

Se obtiene cuando las dos bóvedas cilíndricas de medio punto que se intersecan tienen la misma luz, y son ortogonales entre sí. Los cuatro arcos de cabeza son de medio punto y los arcos diagonales son semielipses, teniendo, todos ellos, la clave al mismo nivel.

- **Realzada:**

Los arcos de cabeza y también los arcos diagonales son de medio punto; los diagonales, al tener una luz mayor, tienen la clave más alta.

- **Gótica:**

Las bóvedas que se intersecan son apuntadas, con el mismo plano de arranque e igual montea, consecuentemente los arcos de cabeza y los diagonales son apuntados. En este caso, las claves están todas al mismo nivel. [Fig. 9.6]

Volta a padiglione

Ha origine dal raggruppamento di quattro fusi.

A differenza della volta a crociera, ha un appoggio continuo lineare lungo tutto il suo perimetro, presentando quattro linee di imposta ed un unico punto di vertice; gli spigoli sono aree di lavoro minimo. Se le volte a botte che si intersecano hanno campate diverse, la pianta della volta sarà un rettangolo, se invece hanno la stessa campata, la pianta sarà quadrata [Fig. 9.7].

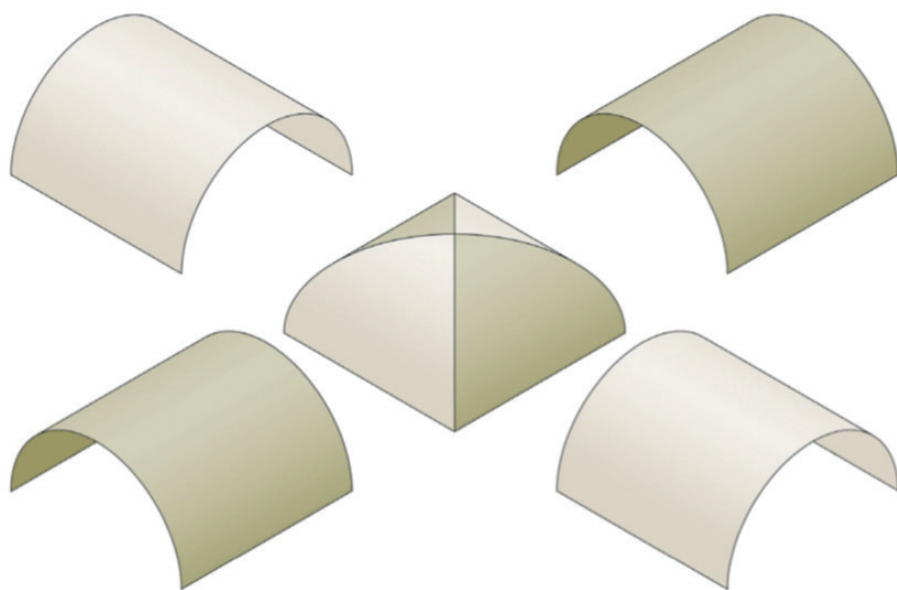


Fig. 9.7 Volta a padiglione
Bóveda en rincón de claustro



Bóveda en rincón de claustro

Se origina por la agrupación de cuatro tímpanos.

A diferencia de la bóveda por arista, tiene apoyo lineal en todo su perímetro, presentando cuatro líneas de arranque y un único punto de vértice; las aristas constituyen zonas de mínimo trabajo. Si los cañones que se intersecan son de luz diferente, la planta de la bóveda será un rectángulo mientras que, si tienen la misma luz, la planta será cuadrada [Fig. 9.7].



Volta angolata

Nasce dall'incontro di due volte a botte che terminano nel punto di incontro, senza proseguire, formando un angolo o un gomito. Si può considerare formata da due fusi e due unghie [Fig. 9.8].

Volta a schifo

Volta a botte di pianta rettangolare con le facciate, cioè i lati corti, chiusi da due fusi. Invece di avere un vertice comune, presenta una linea di chiave di volta, che la fa assomigliare a una volta a padiglione.

Volta a specchio

Si tratta di una volta a schifo tagliata nella parte alta da un piano orizzontale [Fig. 9.9].

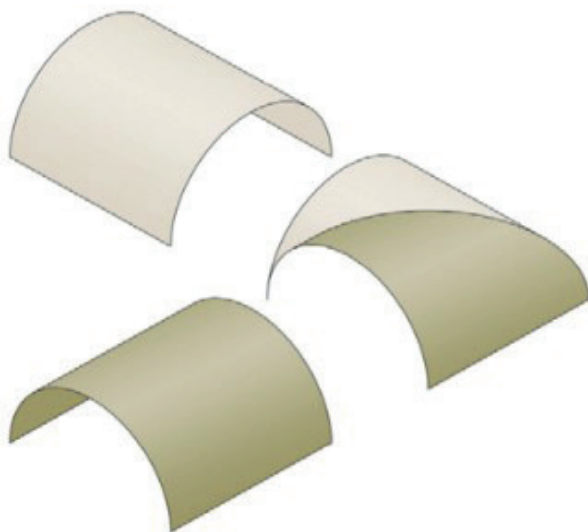


Fig. 9.8 Volta angolata
Bóveda acodillada

Bóveda acodillada

Se origina por el encuentro de dos bóvedas de cañón que acaban en el punto de encuentro, sin prosecución, formando ángulo o codo. Se puede considerar formada por dos tímpanos y dos lunetos [Fig.50].

Bóveda esquifada

Bóveda de cañón de planta rectangular con los frentes, es decir los lados menores, están cerrados por dos tímpanos. En lugar de presentar un vértice común tiene una línea de clave, lo que hace que parezca a una bóveda en rincón de claustro de planta rectangular.

Bóveda de espejo

Se trata de una bóveda esquifada cortada en la parte superior por un plano horizontal [Fig. 9.9].

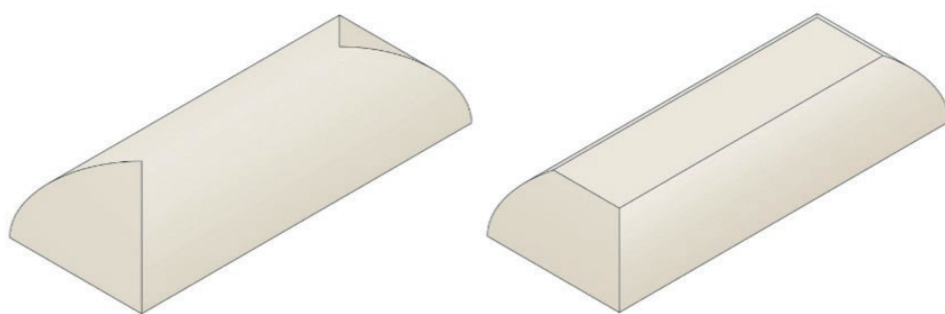


Fig. 9.9 Volta a schifo | specchio
Bóveda esquifada | de espejo

Intersezione di cupole

Cupola bizantina

Un esempio è la cupola bizantina, una variante della volta a vela, che si ottiene se invece di inscrivere un quadrato nella circonferenza in pianta della cupola, è la circonferenza ad essere inscritta nella pianta quadrata del vano. Ciò che si ottiene è una cupola emisferica sopra pennacchi, detta anche bizantina. Spesso tra i pennacchi e la calotta viene inserito un tamburo che permette l'apertura di finestre per l'illuminazione naturale. Il processo costruttivo si semplifica considerando, da una parte, quello dei triangoli sferici e, dall'altra, quello della calotta. I pennacchi sono costruiti all'imposta con file orizzontali e la calotta è spesso ottenuta tramite un assetto ad anello che utilizza archi concentrici, il cui diametro diminuisce secondo i paralleli della sfera [Fig. 9.10].

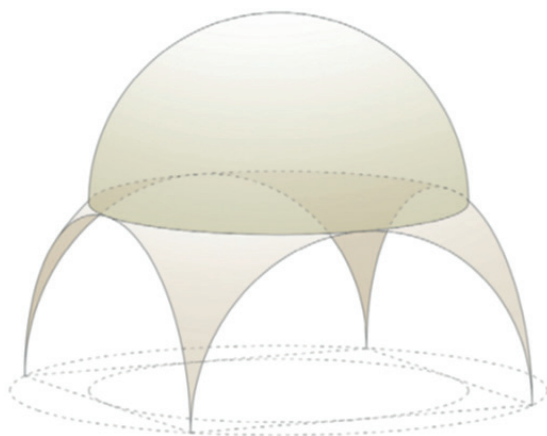


Fig. 9.10 Cupola bizantina
Cúpula bizantina



Intersección de cúpulas

Cúpula bizantina

Un ejemplo es la cúpula Bizantina, una variación de la bóveda vaída que se obtiene si en lugar de inscribir un cuadrado en la circunferencia en planta de una cúpula esférica, es dicha circunferencia la que está inscrita en planta cuadrada del vano. Lo que se obtiene es una cúpula esférica sobre pechinas, o cúpula bizantina. A menudo, entre las pechinas y la cúpula se intercala un tambor que permite la abertura de una corona de ventanas para tener iluminación natural. La construcción se simplifica al considerar, por un lado, la de los triángulos esféricos y, por otro, la del casquete. Las pechinas se aparejan en sus arranques con hiladas horizontales y el casquete como una bóveda esférica, siendo frecuente un aparejo anular mediante arcos concéntricos, cuyo diámetro decrece según los paralelos de la esfera [Fig. 9.10].

Volta nervata

Le volte a crociera sono formate dal raggruppamento di quattro unghie che formano spigoli all'incrocio delle loro superfici di intradosso. Per semplificarne la costruzione, tali spigoli sono sostituiti da archi e la superficie tra di essi diventa di riempimento; vengono costruiti i quattro archi frontali e i due archi diagonali per poi tamponare ogni spazio tra gli archi con superfici murarie curve. Si passa in questo modo da una superficie al tempo stesso resistente e di chiusura, l'unghia, alla sua scomposizione in archi resistenti, le nervature, e superfici di semplice chiusura. Da questa scomposizione iniziale sono derivate altre forme di suddivisioni delle volte, di natura strutturale ed estetica (volta divisa in sei, ottopartita, cassettonata, stellata, ecc.). Le nervature sporgono nell'intradosso delle volte e ne sono l'elemento caratteristico, per cui la tipologia è detta "nervata".



Fig. 9.11 Volta costolonata, Como | Bóveda nervada, Como

Bóveda nervada

Las bóvedas por arista están formadas por la agrupación de cuatro lunetos, que forman aristas en la unión de sus superficies. Para simplificar la construcción de las bóvedas, se sustituyen las aristas de los lunetos por arcos y se rellena la superficie entre ellos. Se construyen los cuatros arcos frontales y los dos arcos diagonales, cerrando con superficies curvas de obra de fábrica, cada uno de los espacios entre arcos construidos. Se ha pasado de una superficie resistente y de cierre, el luneto, a su descomposición en arcos resistentes, los nervios, y en superficies de cierre.

Esta descomposición inicial, fue derivado en otras subdivisiones, de carácter estructural y estético (bóveda sexpartita, octopartita, encasetonada, estrellada, etc.). Los nervios sobresalen por el intradós de la bóveda y son su elemento característico, así que la tipología se llama "nervada".



Fig. 9.12 Volta a botte, Siviglia | Bóveda de cañón nervada, Sevilla



Particolare di volte ribassate, Teatro dell'Opera, Parigi
Detalle de bóvedas rebajadas, Teatro de la Ópera, París



MATERIALI UTILIZZATI NELLE VOLTE

Materiales utilizados en las bóvedas





Pensare a queste incredibili costruzioni, soprattutto per quanto riguarda l'architettura gotica, riporta alla mente l'utilizzo della muratura con conci, nervature e murature in pietra scolpita, ma la realtà, tuttavia, era molto diversa, infatti la scelta dei materiali era dovuta, come ad oggi, alla ricerca e all'utilizzo di soluzioni che consentissero l'impiego di risorse naturali, alla persistenza di tradizioni costruttive locali, alle condizioni economiche e anche, se in misura minore, alle mode dell'epoca. Tra le tante versioni locali nell'utilizzo della muratura in pietra, risulta considerevole la variante che prevede la costruzione della muratura con mattoni posati a vite che permette di mantenere le nervature della pietra. Dal punto di vista geografico l'architettura medievale è molto significativa nel nord Italia, in Linguadoca francese dove quest'arte risponde con le architetture in mattoni, e anche in Spagna è successa la stessa cosa, con casi molto significativi in termini di specificità locale e di uso temporaneo, come a Valencia. Questo sistema costruttivo è stato utilizzato nella città citata in molte costruzioni di prestigio per chiese, cappelle e conventi. Il caso più importante è quello della costruzione della Cattedrale di Valencia, che fu interamente realizzata con questo sistema, sia per quanto riguarda l'opera originale del XIII secolo in termini di navate, transetto e deambulatorio, sia per le costruzioni successive. Il loro impiego era universalmente diffuso in questa parte della regione nei secoli XIII e XIV, e nel XV secolo vennero utilizzati per il completamento dello stesso tipo di opera muraria. Si tratta in molti casi di mattoni filiformi (presentano giunti sciatti con viticci ampiamente separati), probabilmente il risultato di un utilizzo di casse di contenimento che, appoggiate sulle centine, servivano a versare la miscela di malta e cemento e a procedere rapidamente nella sequenza costruttiva. La realizzazione del rivestimento finale renderebbe la rifinitura a tratti irregolare, senza alcuna importanza per il risultato finale. Il sistema di utilizzo dei mattoni ha indubbiamente consentito una maggiore facilità di lavorazione per quanto riguarda la messa in opera dei pezzi e delle nervature. D'altra parte, i suddetti giunti, scarsamente curati e di notevole spessore, avevano la capacità di assorbire le sollecitazioni, fattore molto interessante



Cuando pensamos en estas sorprendentes construcciones y en especial en la arquitectura gótica, esta nos remite al uso de las fábricas con sillares, nervios y plementerías de piedra labrada, pero sin embargo la realidad fue muy diferente. La elección de los materiales, se debía, igual que en la actualidad a la búsqueda y empleo de unas soluciones que permitiesen aprovechar los recursos provenientes de la naturaleza, a la persistencia de las tradiciones constructivas locales, igualmente a las condiciones económicas y también, en menor medida a las modas del momento, cuestiones todas de actualidad. Una de las muchas versiones locales diferentes a las plementerías construidas con piedra son la variante de construir la plementería con ladrillos dispuestos a rosca, manteniendo los nervios de piedra. Geográficamente hay una arquitectura medieval muy significativa en el norte de Italia, el Languedoc francés donde este arte responde a las arquitecturas de ladrillo, incluso en España ocurrió lo mismo con casos muy significativos en cuanto a la especificidad local y uso temporal ocurre en Valencia. Este sistema constructivo se utilizó en la mencionada ciudad en muchas construcciones de prestigio destinadas a iglesias, a capillas o conventos. El más importante es el caso de la construcción de la catedral de Valencia, toda ella resuelta con este sistema, tanto la obra original del siglo XIII por lo que respecta a las naves, al crucero y girola, como a las construcciones posteriores. Su utilización tuvo un carácter universal en esta parte tanto en los siglos XIII y XIV, ya en el siglo XV el uso fue para completar fábricas del mismo tipo. Estas roscas de ladrillo en muchos casos (presentaban juntas descuidadas tendeles muy separados), posiblemente fruto del uso de tableros contenedores, los cuales apoyados en los nervios servían para verter el mortero o argamasa y avanzar rápidamente en la secuencia constructiva. El posterior revestimiento final haría que este irregular acabado no fuera importante en la ejecución. Este sistema de utilización de ladrillos permitía sin duda una mayor facilidad en la mano de obra a la hora del ajuste entre las piezas y los nervios. Por otra parte, las mencionadas juntas citadas las cuales eran poco cuidadas y de gran espesor tenían la capacidad de poder absorber esfuerzos, algo muy



viste le sollecitazioni esistenti e la “fragilità” del sistema dovuta alla mancanza di forti spessori. Grazie a tali vantaggi è stato possibile progettare geometrie complesse, che hanno indubbiamente dato vita a vere e proprie prodezze costruttive. Tuttavia, a Valencia si trova un sottosuolo di natura argillosa di notevole rilevanza, in grado di offrire un materiale immediatamente fruibile e di ottima qualità, favorito dalla facile disponibilità di una manodopera di origine moresca presente in città.

I materiali della volta si sono adattati nel tempo alla sapiente costruzione dei nostri antenati che, comprendendo la geometria dell'elemento, hanno sempre cercato pezzi dal formato manuale che potessero essere facilmente adattati alla forma dell'elemento, tuttavia nel corso della storia troviamo evoluzioni tra le successive tecniche che riguardano non solo la morfologia della costruzione stessa ma anche i principi della meccanica e della trasmissione dei carichi. Rispetto all'uso del mattone primitivo nelle sue varianti materiche (adobe o ceramica), le volte gotiche, ad esempio, sperimentano un cambiamento significativo, adattandosi alla sfida spaziale e di trasmissione dei carichi richiesta. L'opposto avviene con la trasparenza e la leggerezza dei materiali utilizzati nelle volte della rivoluzione industriale, dove l'acciaio costituiva solo un'intelaiatura leggera o uno scheletro che sosteneva le grandi superfici vetrate che puntavano verso un cielo immenso. Il calcestruzzo, attraverso i suoi numerosi architetti, da Le Corbusier a Félix Candela, ha offerto una nuova interpretazione, lasciando il materiale come protagonista ed elemento significativo della nuova architettura. Dunque, sarà il materiale a riportarci direttamente all'epoca: il mattone per il Modernismo, l'acciaio e il vetro per l'Art Nouveau e il cemento per l'architettura razionalista. Una visione certamente romantica per il nostro attuale modo di progettare, dove altri criteri di scelta devono essere valutati e presi in considerazione, tra gli altri la sostenibilità, la manutenibilità e la resilienza dei materiali da utilizzare.



interesante dada las tensiones existentes y la “fragilidad” del sistema al no contar con espesores potentes. Asimismo, estas ventajas permitían diseñar geometrías complejas que sin duda llevaban a otros alardes constructivos. No obstante, la ciudad de Valencia presenta un subsuelo de naturaleza arcillosa muy importante, ofreciendo por lo tanto un material inmediato y de una calidad excelente aumentada por la fácil mano de obra morisca existente en la época.

Los materiales de la bóveda han sido a lo largo del tiempo adaptados gracias a la sabia construcción de nuestros antepasados que, entendiendo la geometría del elemento, han buscado siempre piezas con un formato manual que pudiese ser fácilmente adaptado a la forma del elemento. No obstante, a lo largo de la historia, encontramos pasos secuenciales que atienden no solo a la morfología propia de la construcción, sino también a los principios de la mecánica y la transmisión de cargas. Del ladrillo primitivo en sus variantes en cuanto al material (adobe o cerámica), las bóvedas del gótico, por ejemplo, experimentan un cambio significativo del uso de las piezas constituyentes, asumiendo un particular desafío espacial y de transmisión de cargas. Esta cuestión que se contrapone a la transparencia y ligereza de los materiales que mostraban las bóvedas de la revolución industrial, donde el acero era solo una armazón o esqueleto liviano que soportaba aquellas grandes superficies acristaladas que apuntaban a un cielo inmenso. El hormigón, a través de muchos exponentes del mismo como Le Corbusier y Félix Candela, daría una nueva interpretación dejando al material como protagonista principal y elemento significativo de la nueva arquitectura. En la actualidad, será el material quien nos remita directamente a la época: el ladrillo al Modernismo, el acero y el vidrio al Art Noveau y el hormigón a la arquitectura racionalista. Una visión ciertamente romántica para nuestra actual forma de proyectar, donde otros criterios de reflexión deben de ser considerados y tenidos en cuenta como, entre otros, la sostenibilidad, el mantenimiento y la resiliencia de los materiales a emplear.

la volta di mattoni

Le volte in mattoni si distinguono per la posa in piano dei mattoni, composte da due foglie di giunzione alternate e unite con malta. Si differenziano dalle altre in quanto possono essere costruite senza la cassaforma e quindi senza ulteriori elementi ausiliari. Auguste Choisy, ingegnere francese vissuto nella seconda metà dell'800, parlando delle volte romane in malta, intendeva individuare eventuali riscontri in merito alla necessità di ricorrere a sottostrutture lignee per la loro costruzione, un'ipotesi che non è stata dimostrata: si può affermare che le prime volte conosciute furono costruite a Valencia prima dell'anno 1383 come volte a crociera costolonate. È molto probabile che le volte a crociera con nervature in pietra e mattoni filettati siano state il motivo precursore di tale struttura. Questo tipo di volta ebbe una notevole diffusione in epoca successiva, ma la sua maggiore affermazione si ebbe quando, all'inizio del secolo successivo, assunse delle forme sferiche, cosicché non ebbe più bisogno degli spigoli o dei costoloni in pietra su cui doveva poggiare, diventando in questo modo completamente indipendente dalle volte a crociera.



Fig. 10.1 Volte in mattoni, Scuola d'Arte, Cuba
Bóvedas de ladrillo, Escuela de Arte, Cuba

la bóveda tabicada de ladrillos

Las bóvedas tabicadas son aquellas en las que los ladrillos se disponen “de plano”, están compuestas por dos hojas conjuntas alternadas y unión mediante mortero. Se distinguen de las anteriores en que en su construcción se puede prescindir de la cimbra por lo tanto de otros elementos auxiliares. Auguste Choisy, ingeniero francés que vivió en la segunda mitad del siglo XIX, al hablar de las bóvedas de argamasa romanas quiso ver algunos precedentes en cuanto a la necesidad de cimbras para la construcción de éstas, una hipótesis no demostrada: Podríamos decir que las primeras bóvedas tabicadas conocidas se construyeron en Valencia antes del año 1383 como plementerías de bóvedas de crucería. Es muy probable que las bóvedas de crucería con nervios de piedra y plementerías de ladrillo a rosca fueran el motivo precursor de estas. Este tipo de bóvedas gozaron de una notable fama en época posterior, pero su mayor fortuna llegó cuando adoptó formas esféricas a comienzos del siguiente siglo, con este resultado dejó de necesitar las aristas o nervios de piedra en los que se sustentaba, independizándose pues de las bóvedas de crucería.

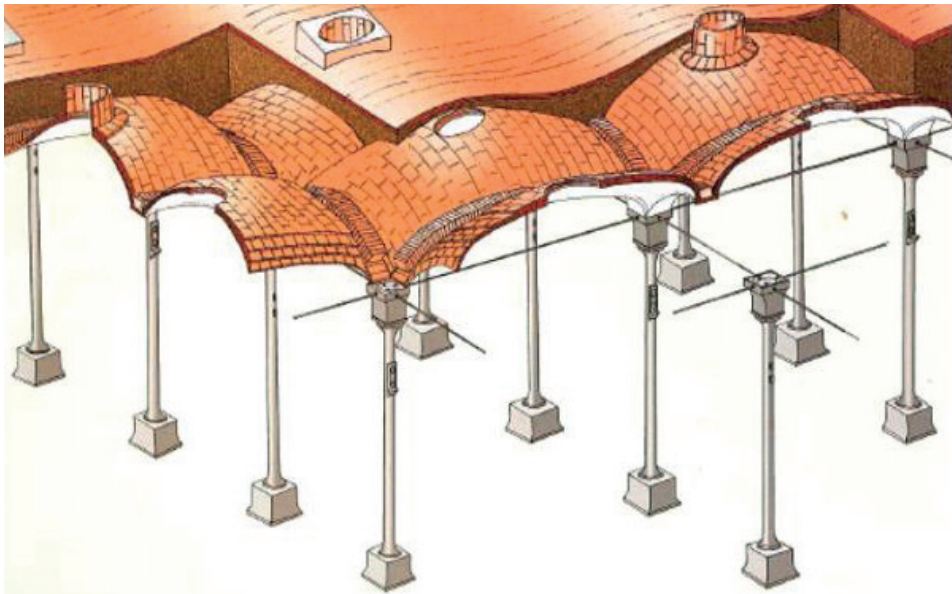


Fig. 10.2 Dettaglio di volte in mattoni, Fábrika Batlló, Barcellona
Detalle de bóvedas tabicadas, Fábrika Batlló, Barcelona

volte di malta alleggerite

In epoca imperiale e bizantina, le volte romane erano in calcestruzzo, talvolta alleggerite con pietra pomice o includendo nella massa anfore di ceramica. Questi pezzi di ceramica combinavano due proprietà: da un lato, alleggerire il peso e, dall'altro, migliorare le prestazioni meccaniche della struttura. Ognuno di essi, grazie alla sua geometria sferica, formava una piccola volta che fungeva da arco di scarico che consentiva di realizzare una soluzione articolata in termini di possibilità di collegamento tra i massicci di malta cementizia organizzati in più strati consecutivi. Uno degli esempi più importanti e significativi di questa procedura è il caldarium delle Terme di Caracalla, che presenta una rotonda di 34 metri di diametro costruita nel 212-217. I Bizantini continuarono a utilizzare questo sistema costruttivo attraverso numerosi esempi, come il mausoleo di Galla Placidia nella città italiana di Ravenna. In questo tipo di volte, che potremmo definire in calcestruzzo alleggerito, il materiale non è solo riempitivo, ma anche resistente. La consistenza del calcestruzzo alleggerito può consentire, in molti casi, la verticalizzazione dei carichi, riducendo le spinte verso l'alto e alleggerendo il lavoro degli archi a contrafforte o addirittura dei contrafforti. Con il vantaggio della leggerezza e l'aiuto delle intelaiature in legno e del tetto in tegole o in pietra, era possibile realizzare grandi imprese costruttive per quanto riguarda l'architettura gotica mediterranea. La documentazione d'archivio indica che il capomastro interveniva spesso per sostituire la calce presente nelle strutture nei giorni di pioggia, il che lascia intendere che queste frequenti visite erano motivate dal fatto che il materiale non era di sostituzione, ma aveva o presentava un problema di natura strutturale. Il riempimento in ceramica non si limita solo alle sponde del Mediterraneo e non si esaurisce nel Medioevo, ma si diffonde in altre province spagnole, in Portogallo e in America nel XVI secolo.

bóvedas de argamasa aligerada

En época imperial y bizantina, las bóvedas de hormigón romano iban vertido en ocasiones aligeradas con piedra pómez o mediante la inclusión de ánforas de cerámica en la masa. Estas piezas de cerámica unían dos propiedades, por una parte, la de aligerar peso y por otra la de mejorar el rendimiento mecánico del conjunto. Cada una de ellas por su geometría esférica formaba una pequeña bóveda que servía como arco de descarga que además permitían cubrir una solución solidaria en cuanto a la posibilidad de conectar los macizos de argamasa de cal dispuestos en sucesivas tongadas. Uno de los ejemplos más importantes y significativos de este procedimiento es el caldarium de las termas de Caracalla, que muestran una rotonda de 34 metros de diámetro construida en los años 212_217. Los bizantinos persistieron en la utilización de este sistema constructivo con muchos ejemplos como el caso del mausoleo de Gala Placidia en la ciudad italiana de Ravenna. En este tipo de bóvedas que podíamos englobar con el nombre de hormigón aligerado, este material no es un simple material de relleno, sino que es también un material resistente. La consistencia del hormigón aligerado puede permitir en muchos casos que las cargas sean verticales, reduciendo los empujes verticales y aligerando el trabajo de los contrafuertes o incluso de los arcos arbotantes. Con la ventaja del poco peso la ayuda de las armaduras de madera y la cubierta de teja o piedra ha podido poder llevar adelante grandes alardes constructivos en la arquitectura del gótico mediterráneo. Es justo decir al caso que la documentación de archivo señala que el maestro mayor de obras acudía con frecuencia a la reposición de la cal de las estructuras los días de lluvia, lo que se puede entender que estas asiduas visitas se justificaban en tanto en cuanto el material no era de reposición, sino que tenía o podía presentar un problema estructural. Los rellenos de cerámica no se limitaron a las costas del Mediterráneo no terminaron en la Edad Media, sino que se extendieron a otras provincias españolas, Portugal y América en el siglo XVI.



Particolare di volta in ristrutturazione | Detalle de la rehabilitación de bóveda



COSTRUZIONE DELLA VOLTA

Construcción de la bóveda





Una volta che il capomastro ebbe definito la geometria della volta, inizia il disegno dei montanti che la compongono. Questo termine, molto utilizzato nel XVI secolo, si riferisce a disegni a grandezza naturale di una parte dell'opera o del suo insieme, nel caso specifico, le volte. Gli strumenti indispensabili per trasferire i dati da questi disegni alla pietra erano le sagome delle facce dei conci: con uno strumento chiamato *baibel* si poteva tracciare la curvatura necessaria per poter scolpire le facce intradossali della chiave di volta. Il tracciato delle sagome era ottenuto da montanti a grandezza naturale che, nonostante la scomodità, aveva l'indubbio vantaggio della precisione, poiché nel XVI secolo un cambio di scala era un'operazione rischiosa che poteva portare a gravi errori. Il tracciato veniva effettuato sulla pavimentazione dell'edificio da costruire o in spazi appositi, come la "sala del tracciamento". È lecito pensare che tali schemi occupino molto spazio, quindi sono stati costruiti così come sono stati progettati. Seguendo questi criteri, le curvature degli archi sono state tracciate utilizzando lo stesso raggio di circonferenza per tutti.

La costruzione formale delle volte a crociera nel XVI secolo iniziava con l'intaglio dei conci, i pezzi che uniscono le crociere tra loro. Il processo consisteva quindi nel partire dai montanti, si confezionavano i *baibeles*⁽¹⁾ con la curvatura dell'intradosso delle nervature e successivamente venivano realizzate le sagome delle sezioni. Poi, con l'aiuto del *baibel*, si tagliava un blocco di pietra secondo l'esatta curvatura dell'intradosso. Infine, ogni concio veniva modellato rimuovendo il materiale in eccesso.

Crociere

Le crociere sono le parti più importanti della volta e anche i più complessi. Nelle volte gotiche, i complicati incroci degli archi venivano risolti con un pezzo cilindrico verticale: la chiave di volta. Tuttavia, nelle volte rinascimentali, gli incontri sono stati risolti con l'intersezione netta degli archi: la crociera. Le crociere sono i pezzi più importanti della volta, anche i più complessi.

(1) Termine spagnolo derivato dal francese *biveau*, per il quale non esiste un corrispettivo in italiano, con cui si indica una "squadra" composta da due bracci non articolati, uno dei quali tagliato con la curvatura dell'intradosso e l'altro (retto) orientato verso il centro geometrico dell'arco (Palacios Gonzalo 2015, p. 32).



Una vez que el maestro cantero definía la geometría de la bóveda, se daba paso al dibujo de sus monteas. Este término muy utilizado en el siglo XVI hace referencia a los dibujos realizados a tamaño natural bien del conjunto o parte de la obra, en este caso las bóvedas. Las herramientas indispensables para transportar los datos de estos dibujos a la piedra eran las plantillas de las caras de las dovelas, con un instrumento llamado baibel se podía trazar la curvatura necesaria para poder tallar las caras del intradós de las dovelas. La traza de las plantillas se obtenía de las monteas realizadas a tamaño natural, lo que a pesar de su incomodidad tiene la indudable ventaja de la exactitud ya que en el siglo XVI un cambio de escala era una operación arriesgada que podía traer serios errores. La traza se hacía sobre el propio pavimento del edificio a construir o sobre espacios para este fin como podía ser la “sala de trazas”. Es justo pensar que semejantes trazados ocuparían mucho espacio por lo que se iba ejecutando su construcción conforme se replanteaba. Siguiendo estos criterios se trazaban las curvaturas de los arcos utilizando para todos ellos el mismo radio de circunferencia.

La construcción formal de las bóvedas de crucero en el siglo XVI se comenzaba con la labra de las dovelas, las piezas que unen a los cruceros entre sí. El proceso por tanto consistía en a partir de las monteas, se confeccionaban los baibeles con la curvatura del intradós de los nervios, posteriormente se hacen las plantillas de las secciones. A continuación, con la ayuda del baibel se corta un bloque de piedra logrando exactamente la curvatura del intradós. Por último se da forma a cada dovela quitando el material sobrante.

Cruceros

Los cruceros son las piezas más importantes de la bóveda, también las más complejas. En las bóvedas góticas los complicados cruces de arcos se resolvían con una pieza cilíndrica vertical: la clave. Sin embargo, en las bóvedas renacentistas, los encuentros se resuelven mediante la intersección limpia de los arcos: el crucero.

componenti costruttivi della volta

Nervature

Le nervature di una volta a crociera partono dai suoi quattro vertici; questo punto di partenza o gruppo iniziale di nervature è chiamato *jarja* ed era una delle parti fondamentali della volta. Nel caso delle volte a crociera, le nervature sono posizionate lateralmente rispetto agli archi perimetrali e, di conseguenza, le spinte orizzontali da esse generate si scaricano perpendicolarmente su di essi. Questo tipo di volte richiede che queste spinte vengano contrastate lateralmente, posizionando una volta accanto all'altra. Questo è il motivo costruttivo e di stabilità per cui, nella maggior parte dei casi, i templi coperti da volte a crociera hanno la stessa altezza in tutte le navate. Per la costruzione della volta si utilizzano anche una serie di sagome, di cui quella inferiore viene tracciata sul piano inferiore del concio, mentre quella superiore viene tracciata sulla faccia del concio. Successivamente, l'intaglio viene eseguito collegando una faccia all'altra. Poiché l'ultimo segmento riceve gli archi precedenti, è scolpito con l'inclinazione necessaria per entrare in contatto con il primo concio.

Puntellamento

Una volta che gli scalpellini avevano terminato il lavoro di taglio e intaglio dei conci, delle traverse e dei fusti, si realizzava la pianta della volta collocando i fusti nel loro posto preciso, cioè sulle colonne; da questo momento iniziava la parte costruttiva del legno, cioè il puntellamento, creando una piattaforma orizzontale posta all'altezza dei fusti. Su questa piattaforma di legno è stata ridisegnata la pianta della volta, individuando così i punti di incrocio, sui quali sono stati eretti elementi di legno come pilastri con l'altezza esatta di ogni incrocio; in seguito questi piccoli pilastri o piedi destri sono stati uniti tra loro per mezzo del cassero curvo degli archi, creando la griglia spaziale della volta. Il vantaggio della cassaforma è che sostiene ogni arco in modo indipendente durante la costruzione della volta e, una volta terminata e sottoposta a carico, è l'arco stesso a funzionare come sostegno, ricevendo il peso che gli corrisponde.

Jarjas

Los nervios en una bóveda de crucería parten de sus cuatro vértices; este punto de partida o racimo de arranque de las nervaduras recibe el nombre de jarja y era una de las partes fundamentales de la bóveda. En el caso de las bóvedas por cruceros, los nervios acometen lateralmente contra los arcos perimetrales y, en consecuencia, los empujes horizontales que estos generan, descargan perpendiculares sobre ellos. Este tipo de bóvedas requieren que estos empujes se contrarresten lateralmente colocando una bóveda junto a otra. Esta es la razón constructiva y de estabilidad por la cual, en la mayoría de los casos, los templos que se cubren con bóvedas por cruceros tienen la misma altura en todas sus naves. Para la construcción de la jarja se recurre igualmente a la monteá, en la que aparecen una serie de plantillas, la inferior se calca en el plano inferior del sillar, y la plantilla superior se calca sobre la cara de recibida de la dovela. Posteriormente se procede a la labra enlazando una cara con la otra. Como la última jarja recibe los arcos formeros, se talla con la inclinación necesaria para entrar en contacto con la primera dovela.

Cimbra

Una vez que los canteros terminaban la labor de corte y labra de las dovelas, cruceros y jarjas se producía el trazado de la bóveda colocando las jarjas en su lugar preciso es decir, sobre las columnas, a partir de este momento se iniciaba la parte constructiva de la madera, es decir, de la cimbra, creando una plataforma horizontal situada a la altura de las jarjas. Sobre esta plataforma de madera se volvía a dibujar la planta de la bóveda localizando de esta forma los puntos de cruce, sobre estos se levantaban elementos de madera a modo de pilares con la altura exacta de cada cruce, posteriormente estos pequeños pilares o pies derechos se unían entre sí mediante las cimbras curvas de los arcos creando la retícula espacial de la bóveda. La ventaja de la cimbra es que sujeta cada arco de forma independiente mientras se construye la bóveda, y una vez que está acabado y entra en carga es este mismo que actúa de cimbra recibiendo el peso que le corresponde.

Messa in opera e smontaggio

Una volta terminato il fissaggio, si procedeva a costruire gli archi perimetrali, poi le travi e le crociere nelle direzioni principali, completando il reticolo nella direzione secondaria. I giunti erano riempiti con malta di calce.

Terminato il processo costruttivo, e trascorso il tempo necessario, venivano rimossi gli elementi provvisori utilizzati per la costruzione dell'arco.

Quest'operazione risulta essere molto delicata, in quanto rimuovere la centina implica la messa in carico dell'elemento costruito su di essa, generando la compressione nei giunti, da cui deriva una discesa minima della chiave. Le volte non erano terminate fino a quando non si procedeva alla discesa, una volta rimossa la guglia la volta faceva vedere tutta la bellezza della sua geometria.



Fig. 11.1 Rimozione della centina di un arco
Operación de descimbrado de un arco

Puesta en obra y descimbrado

Una vez terminada la cimbra se procedía a construir los arcos perimetrales, a continuación, las dovelas y cruceros en las direcciones principales, completando la retícula en la dirección secundaria. Las juntas eran rellenadas con un mortero de cal.

Terminado el proceso constructivo, y transcurrido el tiempo necesario, se retiran los elementos provisionales utilizados para la construcción de arcos. A esta operación se le llama descimbrado.

Es una operación delicada a la que hay que prestar atención, ya que retirar la cimbra supone que el elemento construido sobre ella entrará en carga, produciéndose el apriete de sus juntas, causando un mínimo descenso de la clave. Las bóvedas no estaban terminadas hasta que no se procedía al descimbrado, una vez retirada la cimbra la bóveda hacía ver toda la belleza de su geometría.

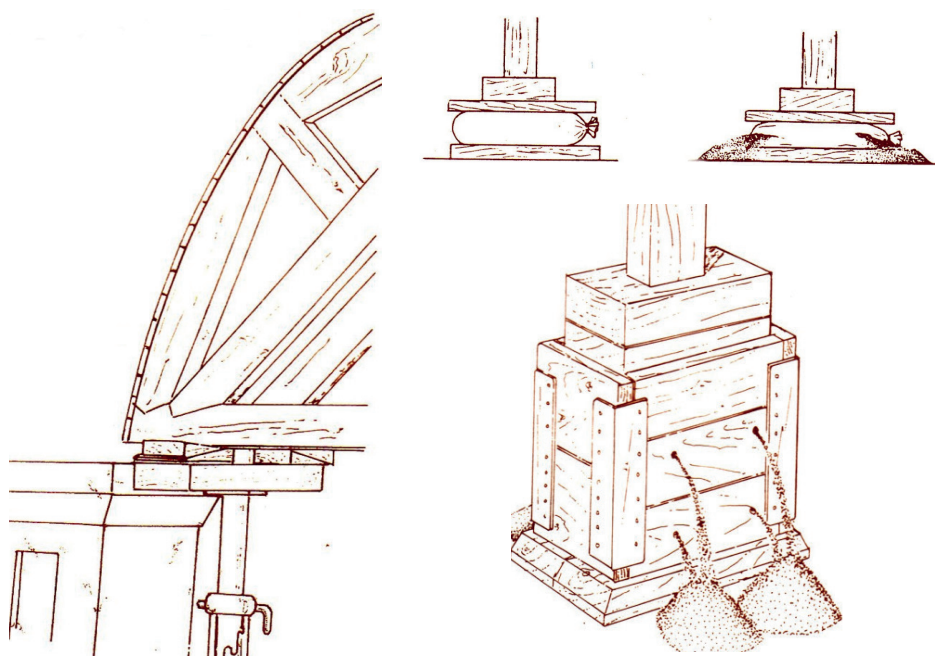
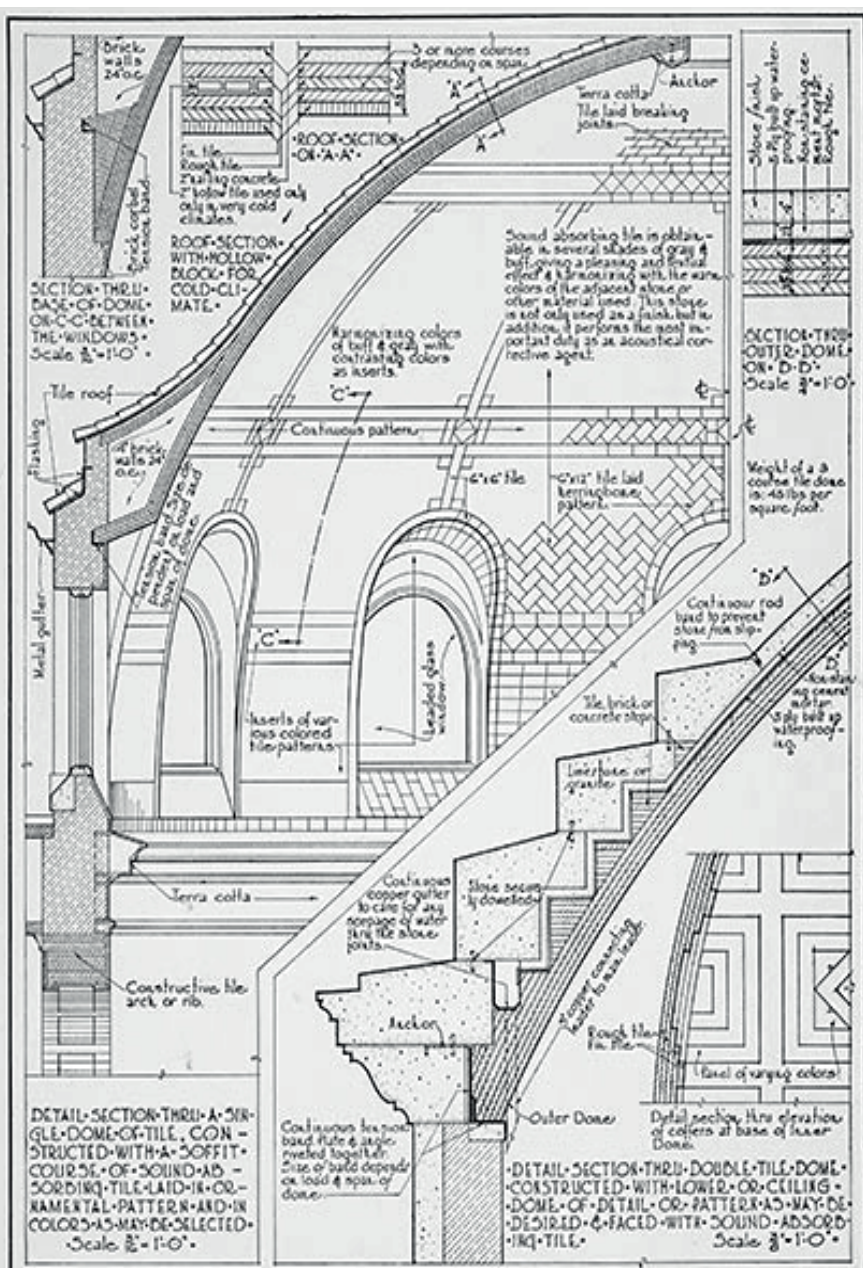


Fig. 11.2 Differenti sistemi di ausilio per lo smontaggio delle cinte
Diversos sistemas de ayuda al descimbrado



R. Guastavino & Company
 FACTORY: Woburn, Mass. - NEW YORK - BOSTON - DETAIL SHEET

Dettagli costruttivi della Compagnia Guastavino, Archivio Guastavino, Università della Columbia, USA

Detalles constructivos de la Compañía Guastavino, Archivo Guastavino, Universidad de Columbia, USA

**RAFAEL GUASTAVINO.
LA VOLTA IN FOLIO "ALLA CATALANA"**

**Rafael Guastavino.
Las bóvedas tabicadas "*a la catalana*"**



Rafael Guastavino Moreno nacque a Valencia nel 1842. Come tanti giovani che vedevano nell'architettura un futuro promettente, si trasferì a Barcellona per iniziare gli studi (a Valencia non esisteva ancora una scuola vera e propria) e nel 1861 si iscrisse alla Scuola speciale per capomastri e architetti. La Scuola di Barcellona, una delle più importanti in Europa, seguiva come nessun'altra la tradizione e l'uso del mattone.

Pochi anni dopo aver terminato gli studi, nel 1968, realizza uno dei suoi primi grandi progetti, la costruzione della Fabbrica Tessile Batlló a Barcellona [Fig.12.1], dove la spettacolare sala dei telai con le sue volte divise, o volte catalane, rappresenta uno spettacolo costruttivo, basato su un procedimento vernacolare ampiamente utilizzato nell'architettura popolare della Catalogna.

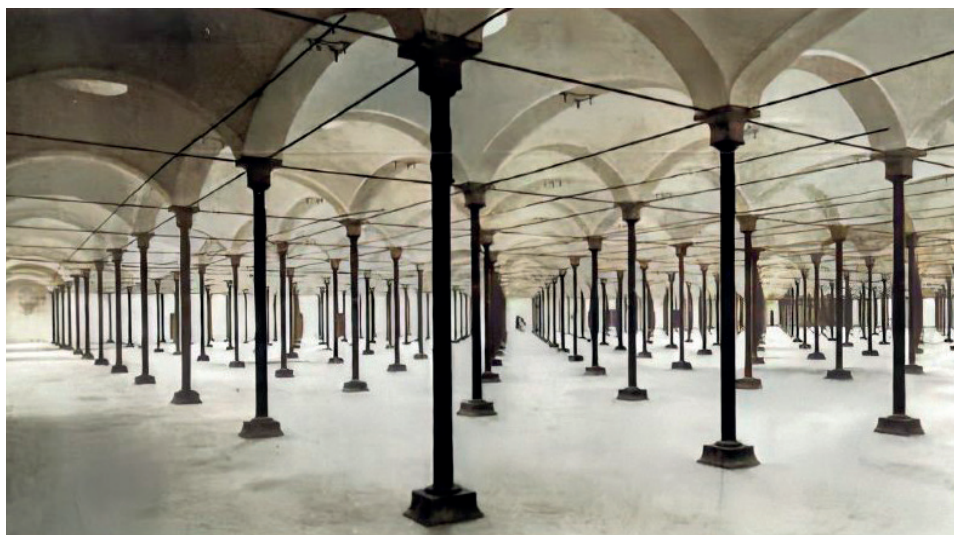


Fig. 12.1 Interno della Fabbrica Tessile Batlló, Barcellona, Spagna
Interior de la Fàbrica Textil Batlló, Barcelona, España

In quel periodo Barcellona, centro propulsore della provincia, stava vivendo un importante sviluppo industriale con numerose commesse e progetti per la costruzione di fabbriche e stabilimenti, per cui il sistema



Rafael Guastavino Moreno nació en Valencia en el año 1842. Como tantos jóvenes que veían en la arquitectura un futuro prometedor se traslada a Barcelona para comenzar sus estudios, (en Valencia aún no había escuela como tal), era el año 1861 cuando se inscribe en la Escuela Especial de Maestro de Obras y Arquitecto. La Escuela de Barcelona una de las más importantes de Europa seguía como ninguna otra la tradición y el uso del ladrillo.

Pocos años después de finalizar sus estudios en 1868, realiza uno de sus primeros grandes proyectos, la construcción de la Fábrica Textil Batlló en Barcelona [Fig.12.1], donde destacó la espectacularidad de la sala de telares con sus bóvedas vaídas tabicadas, o catalanas, que supondrían un alarde constructivo, basado en un procedimiento vernáculo muy utilizado en la arquitectura popular de Cataluña.

Barcelona por aquellos años como motor de la provincia experimentaba un desarrollo industrial muy importante con muchos encargos y proyectos para la construcción de fábricas y establecimientos, por lo que Guastavino con su sistema constructivo ofrecía un tipo de construcción donde se empleaba menos material, ausencia de medios auxiliares como son los andamios, la incorporación de nuevos materiales - el empleo del cemento portland, en sustitución de los morteros de cal - y algo revelador y decisivo: su resistencia al fuego. Así pues, después de la fábrica Batlló le llegaron muchos encargos y una cierta fama local hizo que, no solo los constructores requiriesen sus servicios, sino que esta circunstancia, (la difusión y puesta en obra de su sistema), originó un cambio de mentalidad de los profesionales, ya que, este procedimiento resumido en la experiencia y en el instinto de los maestros de obra, sin una base de cálculo ni parámetros establecidos, debía ser abordado por profesores y profesionales con una aproximación más científica al hecho; los primeros acercamientos solo se preocuparon por la resistencia en cuanto al peso y sus posibilidades de uso [Fig.12.2].

No obstante, las ventajas estructurales y formales de las bóvedas tabicadas eran constatables, una idea además reforzada por la defensa



costruttivo di Guastavino offriva un tipo di edificio in cui si utilizzava meno materiale, l'assenza di mezzi ausiliari come le impalcature, l'incorporazione di nuovi materiali - l'uso del cemento Portland in sostituzione della malta di calce - e un elemento rivelatore e decisivo: la resistenza al fuoco. Così, dopo la fabbrica di Batlló, ricevette molti incarichi e una certa fama locale fece sì che non solo i costruttori richiedessero i suoi servizi, ma questa circostanza (la diffusione e l'implementazione del suo sistema), provocò un cambiamento nella mentalità dei professionisti, poiché questa procedura, basata sull'esperienza e sull'istinto dei capomastri, senza una base di calcolo o parametri stabiliti, doveva essere affrontata da professori e professionisti con un approccio più scientifico alla realtà. I primi approcci riguardavano solo la resistenza in termini di peso e fruibilità [Fig.12.2].

Tuttavia, i vantaggi strutturali e formali delle volte erano evidenti, un'idea rafforzata dalla difesa nazionalista di un metodo d'altri tempi e della sua tradizione costruttiva nel tempo. Allo stesso modo, poiché i suoi servizi erano sempre più richiesti, era necessario approfondire il futuro della sua produzione e soprattutto la resistenza al fuoco per l'espansione dei grandi centri urbani e la ricerca della salubrità delle città, per cui fu decisivo il suo studio *"Improving the Healthfulness of Industrial Towns"* presentato a Philadelphia nel 1876, in occasione dell'Esposizione del Centenario della fondazione di Philadelphia, dove, attraverso vari esempi, mostrò i vantaggi del suo sistema costruttivo di fronte al fuoco.

Questo studio gli procurò un riconoscimento inaspettato e gli fu conferita la Medaglia al Merito. Il successo ottenuto in questa mostra, insieme alle possibilità di accedere a materiali di qualità superiore che potessero contribuire al miglioramento della sua tecnica, nonché l'immediata convinzione personale che gli Stati Uniti sarebbero stati il luogo del suo sviluppo professionale, dato che in quel Paese si stava sviluppando una crescita di elevate risorse umane e materiali, fece sì che cinque anni dopo questo evento partisse insieme al solo figlio.



Fig. 12.2 Prova di resistenza di una volta in folio
Prueba de resistencia de una bóveda tabicada

nacionalista de un método propio de antaño y su tradición constructiva a lo largo del tiempo. Asimismo, conforme sus servicios eran más requeridos, había que ahondar sobre el futuro de su producción y sobre todo, la resistencia al fuego en la expansión de los grandes núcleos urbanos y la búsqueda de salubridad en las ciudades, por ese motivo su estudio "*Improving the Healthfulness of Industrial Towns*" presentado en Filadelfia en el año 1876, a la Exposición del Centenario de la fundación de Filadelfia fue decisivo ya que, a través de diversos ejemplos, hizo ver las ventajas de su sistema de construcción frente al fuego. Este estudio le supuso un reconocimiento inesperado recibiendo la Medalla al Mérito. El éxito que obtuvo en esta exposición, unido a las posibilidades de acceder a materiales de mayor calidad que podrían contribuir al perfeccionamiento de su técnica, así como su inmediata convicción personal que sería en Estados Unidos el lugar

Così, nel 1881 Guastavino arrivò a New York, dove si confrontò subito con i nuovi materiali da costruzione - cemento Portland, acciaio laminato e calcestruzzo - che avrebbero sostituito le tradizionali strutture in legno combustibile, e dove sentì che il futuro in America gli avrebbe riservato opportunità imbattibili. Al suo arrivo, la precaria situazione economica e la scarsa conoscenza della lingua non gli permisero di continuare il lavoro che aveva sviluppato con successo in Spagna, ma si sforzò di creare una serie di brevetti per i suoi sistemi e la loro resistenza al fuoco basati su mattoni e volte catalane. Fu un processo continuo in cui diede spazio alla sperimentazione, creando e brevettando nuovi pezzi, rinforzi, malte e sistemi costruttivi per pavimenti e scale, che si riassumono nel cosiddetto *Sistema Guastavino*; un' "invenzione" che, in realtà - a parte gli evidenti vantaggi delle nuove malte cementizie - attingeva direttamente alle fonti della tradizione vernacolare che aveva conosciuto in Spagna, ma che, a poco a poco, con continue aggiunte e miglioramenti, divenne un sistema caratteristico a sé stante.



Fig. 12.3 Guastavino durante la costruzione della Biblioteca di Boston, USA
Guastavino durante la construcción de la Biblioteca de Boston, USA



de su quimera profesional, dado que aquel país estaba desarrollando un crecimiento de elevados recursos humanos y materiales, hizo que cinco años después de este acontecimiento emigrase con la sola compañía de su hijo.

Así pues, en el año 1881 Guastavino llega a Nueva York, donde inmediatamente toma presencia frente a los nuevos materiales constructivos, - el cemento portland, el acero laminado, el hormigón, que irían sustituyendo las tradicionales y combustibles estructuras de madera - le hacen sentir que el futuro en América le deparaba inmejorables oportunidades. A su llegada, su precaria situación económica y la falta del conocimiento del idioma, no le permitieron continuar el trabajo desarrollado con éxito en España, pero se esforzó por crear una serie de patentes propias acerca de sus sistemas y su resistencia al fuego basados en los ladrillos y bóvedas catalanas. Fue un proceso continuado donde da paso a la experimentación creando y patentando nuevas piezas, refuerzos, morteros, así como sistemas constructivos para forjados y escaleras, los cuales se resumen en el llamado *Guastavino System*; «invento» que, en realidad - salvo las evidentes ventajas que comportaban los nuevos morteros de cemento -, bebía directamente en las fuentes de la tradición vernácula que había conocido en España, pero que, poco a poco, con continuos aditamentos y mejoras fue constituyendo un sistema propio y característico.

Con la la Biblioteca Pública de Boston en el año 1889, su gran primera obra, experimentó *“in situ”* todas las virtudes de su sistema [Fig.12.3], *dando a conocer públicamente las ventajas que sus bóvedas tabicadas ofrecían respecto de otros procedimientos al uso, así como desvelar unas novedosas y atractivas posibilidades formales (muy acordes, por lo demás, con las líneas estéticas del momento); con esta obra, realizada en colaboración con la prestigiosa firma de arquitectos McKim, Mead and White, obtuvo amplia resonancia y publicidad, siendo decisiva para su definitiva orientación profesional.*

En el año 1889, ya una vez aceptado su sistema avalado por un número importante de patentes registradas constituyó la Guastavino Fireproof



Con la Boston Public Library del 1889, la sua prima opera di rilievo, sperimenta "*in situ*" tutte le virtù del suo sistema [Fig.12.3], facendo conoscere pubblicamente i vantaggi che le sue volte a crociera offrivano rispetto ad altri procedimenti in uso, oltre a rivelare possibilità formali inedite e attraenti (molto in linea, peraltro, con le linee estetiche dell'epoca); con quest'opera, realizzata in collaborazione con il prestigioso studio di architetti McKim, Mead e White, ottiene un'ampia risonanza e pubblicità, determinante per il suo definitivo orientamento professionale.

Nel 1889, una volta che il suo sistema era stato accettato e avallato da un gran numero di brevetti depositati, fondò la Società di Costruzioni Antincendio Guastavino, lasciando, salvo poche eccezioni, il libero esercizio della professione di architetto, dando per molti anni un forte carattere imprenditoriale a tutte le sue attività. L'attività è stata proseguita dal figlio fino alla liquidazione dell'azienda nel 1962.

Per quanto riguarda la costruzione, c'è un aspetto di grande importanza: per tutte le commesse che gli arrivavano, queste dovevano essere eseguite da personale specializzato (il suo staff), sulla base di una padronanza delle conoscenze trasmesse nell'azienda stessa, il che significava avere la quasi esclusività di tutti le *volte* che venivano costruiti in tutto il Paese. Questa tattica commerciale "aggressiva" fu rafforzata dalla divulgazione scientifica e tecnica in congressi e pubblicazioni, tra cui spicca nel 1892 il *Saggio sulla teoria e la storia delle costruzioni coesive*, un trattato che difende il suo sistema di volte nel tentativo di mostrarne i vantaggi rispetto alle costruzioni in calcestruzzo e alle tradizionali volte con conci. Questo è una forte campagna pubblicitaria con la pubblicazione di cataloghi e brochure dei suoi prodotti, nonché la dimostrazione dei vantaggi dei suoi manufatti, gli fecero acquisire una posizione commerciale di grande rilevanza.

Per quanto riguarda Rafael Gustavino Expósito, emigrato con l'architetto all'età di 17 anni, va segnalato che fu un fedele assistente osservatore che, partendo da sistemi brevettati e sperimentati e consolidati all'epoca, introdusse importanti miglioramenti strutturali come



Construction Company, dejando salvo contadas excepciones, el ejercicio libre de la profesión de arquitecto, dando un fuerte carácter empresarial durante muchos años a toda su actividad. Las actividades empresariales fueron manteniéndose con su hijo hasta que la sociedad fue liquidada en el año 1962.

En cuanto a la construcción hay un hecho de gran importancia: para todos los encargos que le llegaban, estos debían ser ejecutados por personal especializado, (su personal), en base a una maestría de conocimientos transmitidos en la propia empresa, esta cuestión hizo que tuviese la casi exclusividad de todas las bóvedas que se construyesen a lo largo del país. Esta "agresiva" táctica empresarial, venía reforzada con una divulgación científica y técnica difundida en congresos y publicaciones, destacando en 1892, *Essay on the Theory and History Cohesive Construction*, un tratado que defiende su sistema de bóvedas tabicadas tratando de mostrar las ventajas frente a la construcción en hormigón y frente a las tradicionales bóvedas adoveladas. Esto y una fuerte campaña de divulgación publicitaria con la edición de catálogos y folletos de sus productos, así como la demostración de las ventajas de sus productos le hizo alcanzar una situación empresarial de gran relevancia.

En cuanto a Rafael Gustavino Expósito, quien emigró junto al arquitecto a la edad de 17 años cabe resaltar que fue un fiel ayudante observador, quien partiendo de unos sistemas patentados y experimentados en la época consolidados, introdujo importantes mejoras estructurales como la incorporación de armaduras metálicas en el tendido de las hojas de ladrillos también hacia aspectos complementarios, como la cerámica vidriada, los acabados polícromos y, sobre todo, los materiales de acondicionamiento acústico, que resultarían de gran interés arquitectónico y comercial [Fig.12.5].

Sus intervenciones en grandes iglesias y auditorios reclamaba un nuevo producto eficaz a los efectos acústicos para el intradós de las bóvedas tabicadas, esto hizo que estableciese contacto, en 1911, con el célebre ingeniero Wallace Clement Sabine, profesor de la Universidad de Harvard

l'incorporazione di rinforzi metallici nella posa delle lastre di mattoni, nonché aspetti complementari come la ceramica smaltata, le finiture policrome e, soprattutto, i materiali per il condizionamento acustico, che si riveleranno di grande interesse architettonico e commerciale [Fig.12.5]

Il suo intervento su grandi chiese e auditorium richiedeva un nuovo prodotto efficace in termini di effetti acustici per gli intradossi delle volte, il che lo portò a stabilire un contatto nel 1911 con il famoso ingegnere Wallace Clement Sabine, professore all'Università di Harvard e massima autorità in materia di acustica negli Stati Uniti; collaborò con lui per sviluppare un nuovo materiale che migliorasse le qualità assorbenti del mattone, una collaborazione che si sarebbe cristallizzata in una serie di brevetti: tra cui il mattone noto come Rumford Ti/e (1914)²⁵ e il successivo Akoustolith (1915) [Fig.12.4].

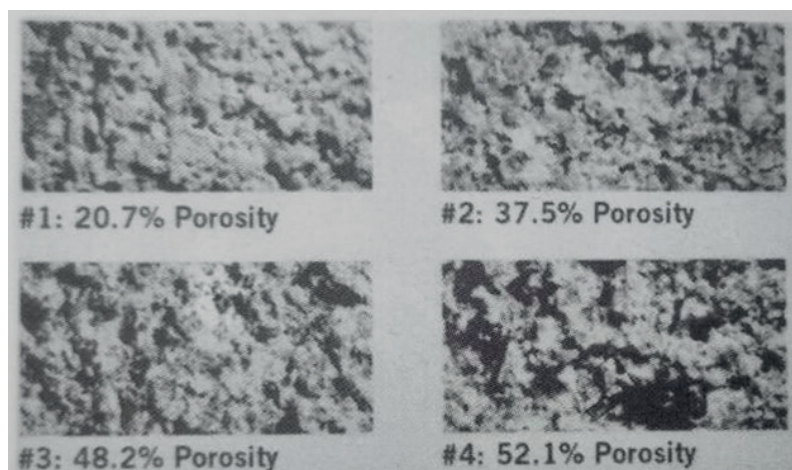


Fig. 12.4 Dettagli al microscopio di ceramiche di Rumford, ingrandite 7,5 volte.
Detalle al microscopio de cerámicas Rumford, ampliadas 7,5 veces.

y máxima autoridad en EEUU en materia de acústica; con él llegaría a una colaboración para desarrollar un nuevo material que mejorara las cualidades absorbentes del ladrillo; colaboración que quedaría cristalizada en buen número de patentes: entre ellas, el ladrillo denominado Rumford Ti/e (1914)²⁵ y el posterior Akoustolith (1915) [Fig.12.4].



Fig. 12.5 Interno del Bar dell'Ostrica, New York, USA
Interior del Bar de Ostras, New York, USA



Filippo Brunelleschi, spaccato della Cupola di Santa Maria del Fiore, Firenze
Filippo Brunelleschi, sección transversal de la cúpula de Santa Maria del Fiore, Florencia



FILIPPO BRUNELLESCHI. LA CUPOLA A DOPPIA CALOTTA

Filippo Brunelleschi. La cúpula de doble hoja

ipotesi costruttiva | hipótesis constructiva prof. Massimo Ricci



Video della costruzione della cupola di Santa Maria del Fiore
progettata da Filippo Brunelleschi, Firenze, Italia
Fonte: National Geographic
Vídeo de la construcción de la cúpula de Santa María del Fiore
diseñada por Filippo Brunelleschi, Florencia, Italia
Fuente: <https://www.massimoricciarchitetto.it/wp-content/uploads/2020/09/Darmstad-per-massimo-LQ.mp4>



introduzione

La costruzione della cattedrale di Santa Maria del Fiore iniziò nel 1290, ma fu solo quasi due secoli dopo che fu costruita la spettacolare cupola, precisamente tra il 1420 e il 1436. Il nome della cattedrale, Santa Maria del Fiore, unisce quella della Vergine Maria con il simbolo della città di Firenze, il fiore del Giglio, ed è attualmente la quarta al mondo per grandezza dopo San Pietro a Roma, San Paolo a Londra e il Duomo di Milano. Segnò il passaggio dallo stile gotico a quello rinascimentale, testimoniando in tutti quegli anni il mutamento della forma costruttiva.

Nel 1418 fu aperto il concorso per idee per la costruzione della cupola, problema che sembrava non avere soluzione. È qui che compare un rinnovato Filippo Brunelleschi, ambizioso orafo di 41 anni, con una soluzione a cupola autoportante. Nonostante il Comitato fosse molto scettico, Brunelleschi riuscì a convincerli. Nell'aprile del 1420 l'opera fu assegnata a lui e ad altri due candidati, uno dei quali era un vecchio rivale, Lorenzo Ghiberti, anche se Brunelleschi prese subito la guida ed è passato alla storia come costruttore della cupola del Duomo di Firenze. Morì il 15 aprile 1446 e vi è sepolto, senza lasciare progetti o scritti su questo grande progetto. Tuttavia, molto è stato studiato e teorizzato su come sia riuscito a costruirla, e anche un professore italiano ha dedicato la sua vita a replicare la cupola.

Le città di Firenze, Pisa e Siena si contendevano la costruzione della cattedrale più grande, simbolo di ricchezza e potere. Ciò fece crescere i transetti, lo spazio dove si incontrano i bracci della croce che forma il pavimento, e con essi il diametro delle cupole che servivano a ricoprirli. Pertanto, la cupola del Brunelleschi ha un diametro interno di 44 m, la base è a 52 m dal suolo e a sua volta ha un'altezza di 32 m (questo è come una casa di 10 piani in cima a una casa di 17 piani). È costruito con, si dice, 40.000 tonnellate di mattoni, su una base di circa 4 m di muratura (blocchi di pietra). Inoltre, la lanterna posta sopra l'oculo centrale è alta 16 m.

La cupola poggia su una parete verticale chiamata tamburo, che in questo caso è ottagonale e presenta un oculo (finestra) su ciascun lato. Questo poligono determina la costituzione della cupola attraverso otto

La construcción de la catedral de Santa Maria del Fiore se inició en el año 1290, pero no fue hasta casi dos siglos más tarde cuando se construyó la espectacular cúpula, concretamente entre 1420 y 1436. El nombre de la catedral, Santa Maria del Fiore, conjuga el de la virgen María con el símbolo de la ciudad de Florencia, la flor de Lis, y es actualmente la cuarta en el mundo por tamaño después de San Pedro en Roma, San Pablo en Londres y el Duomo de Milán. Supuso el paso del estilo Gótico al Renacimiento, al presenciar a lo largo de todos esos años el cambio en la forma de construcción.

En 1418 se abre el concurso de ideas para construir la cúpula, problema que parecía no tenía solución. Aquí es cuando aparece un renovado Filippo Brunelleschi, orfebre ambicioso de 41 años, con una solución mediante cúpula auto-sustentada. A pesar de que el Comité era muy escéptico, Brunelleschi consiguió convencerles. En abril de 1420, se le concede la obra a él y otros dos candidatos, uno de los cuales era un antiguo rival, Lorenzo Ghiberti, aunque Brunelleschi se hizo rápidamente con el liderazgo y ha pasado a la Historia como el constructor de la cúpula de la catedral de Florencia. Murió el 15 de abril de 1446 y está enterrado en ella, sin dejar planos ni escritos sobre este gran proyecto. Sin embargo, mucho se ha estudiado y teorizado sobre cómo consiguió construirla, y hasta un profesor italiano ha dedicado su vida a replicar la cúpula.

Las ciudades de Florencia, Pisa y Siena competían por construir la mayor catedral, símbolo de riqueza y poder. Esto hizo que los cruceros, el espacio donde se juntan los brazos de la cruz que forma la planta, crecieran, y con ellos el diámetro de las cúpulas que se utilizaban para cubrirlos. Así, la cúpula de Brunelleschi tiene un diámetro interior de 44 m, la base está a 52 m de altura sobre el suelo, y ella misma tiene una altura de 32 m. Está construida con, dicen, 40 000 toneladas de ladrillos, sobre una base de unos 4 m de sillería (bloques de piedra). Además, la linterna situada encima del óculo central mide 16 m de altura.

La cúpula se asienta sobre un muro vertical denominado tambor, que en este caso es octogonal y tiene un óculo o hueco cenital en cada uno de los

geometria

settori o "pannelli", uniti da spigoli che hanno la forma di un arco. Questo arco è generato con la formula di quinta acuta come segue: il diametro è diviso in cinque parti uguali, dando origine a sei punti di divisione. L'arco di circonferenza di raggio $\frac{4}{5}$ del diametro (in questo caso 35 m) viene disegnato centrando nel punto 2, dando origine ad uno spigolo, e poi nel punto 5, dando origine allo spigolo opposto. Gli archi terminano ad un'altezza di 60° con l'orizzontale. Il lato intradosso dell'ottagono è di circa 17 m.

L'inizio della cupola è una fabbrica in muratura (blocchi di arenaria uniti a malta) e, ad un'altezza di 7 metri (un'inclinazione di circa 10° con l'orizzontale), dal 1422 diventa una fabbrica di mattoni, che è ciò che compongono il resto della struttura.

La cupola è costituita da due gusci separati da uno spazio di 1,20 m tra loro, che inizia quando inizia la posa dei mattoni. Il guscio principale, l'interno, ha uno spessore alla base di 2,25 m, mentre l'esterno rimane a 0,80 m [Fig.13.1-13.2]. All'aumentare dell'altezza, gli spessori diminuiscono, in quanto devono sopportare meno sollecitazioni. La calotta interna termina nella parte superiore con un anello di compressione. Sopra c'è la torcia. Entrambi i gusci sono collegati, non solo dai bordi, ma da altri due elementi verticali in ciascun pannello, simili a loro.

Lo spessore degli elementi intermedi varia da 2,40 m a 0,40 m, mentre nel caso dei bordi queste dimensioni sono dell'ordine del doppio. Inoltre, sono presenti tre corridoi a diverse altezze attraverso i quali è possibile circolare tra le conchiglie, e uno aggiuntivo, quello superiore, che si sviluppa all'interno della chiave di volta. Gli interni sono illuminati da aperture esistenti nel guscio esterno.

Sono presenti diversi elementi orizzontali, che non si sa se fossero disposti con lo scopo di resistere agli sforzi come una "fascia", come tre catene perimetrali in pietra e una di legno, disposte lungo l'altezza della cupola, ma con la conoscenza di oggi non si ritiene contribuisca alla resistenza, in particolare quelli in pietra in caso di fessurazione. Ci sono anche 9 archi orizzontali nel guscio esterno, nei $\frac{2}{3}$ superiori della cupola, separati da

lados. Este polígono determina la constitución de la cúpula mediante ocho sectores o "paños", unidos por aristas que tienen forma de arco. Este arco se genera con la fórmula del quinto agudo de la siguiente manera: se divide el diámetro en cinco partes iguales, dando lugar a seis puntos de división. Se traza el arco de circunferencia de radio $4/5$ del diámetro (35 m en este caso) haciendo centro en el punto 2, dando lugar a una arista, y a continuación en el punto 5, dando lugar a la arista opuesta. Los arcos terminan a una altura de 60 m con la horizontal. El lado del intradós del octógono es de unos 17 m.

El arranque de la cúpula es fábrica de sillería (sillares de arenisca unidos con mortero) y, a 7 metros de altura (una inclinación de unos 10° con la horizontal), a partir de 1422 se pasa a fábrica de ladrillos, que son los que forman todo el resto de la estructura.

La cúpula está formada por dos cáscaras separadas por un espacio de 1,20 m entre ambas, que comienzan cuando se inicia la disposición de ladrillos. La cáscara principal, la interior, tiene un espesor en la base de 2,25 m, mientras que el exterior se queda en 0,80 m [Fig.13.1-13.2]. A medida que aumenta la altura, los espesores disminuyen, al tener que soportar menores tensiones. La cáscara interior finaliza en su parte superior en un anillo de compresión. Por encima se dispone la linterna. Ambas cáscaras se conectan, no solo mediante las aristas, sino por dos elementos verticales más en cada paño, similares a ellas.

Los espesores de los elementos intermedios van desde los 2,40 m hasta los 0,40 m, mientras que en el caso de las aristas, estas dimensiones son del orden del doble. Además, hay tres pasillos a distintas alturas por los que se puede circular entre cáscaras, y uno adicional, el superior, que se desarrolla en el interior de la clave. Los interiores se iluminan con las aberturas existentes en la cáscara exterior. Existen varios elementos horizontales, que se desconoce si se dispusieron con el objetivo de resistir esfuerzos a modo de "zuncho", como tres cadenas perimetrales de piedra y una de madera, dispuestas a lo largo de la altura de la cúpula, pero que con los conocimientos de hoy en día no se consideran contribuyentes a

circa 2,5 m di altezza, il cui spessore praticamente svanisce al centro di ogni pannello, che si ritiene rafforzi questo guscio.

Questi archi sono una variante del programma del 1420, che prevedeva l'unione delle due conchiglie mediante la costruzione di piccole volte.

All'esterno, su uno strato di malta e con ganci metallici, sono fissate circa 30.000 piastrelle di argilla rossa, come il resto degli edifici della città, mentre i bordi risaltano per l'uso del marmo bianco.

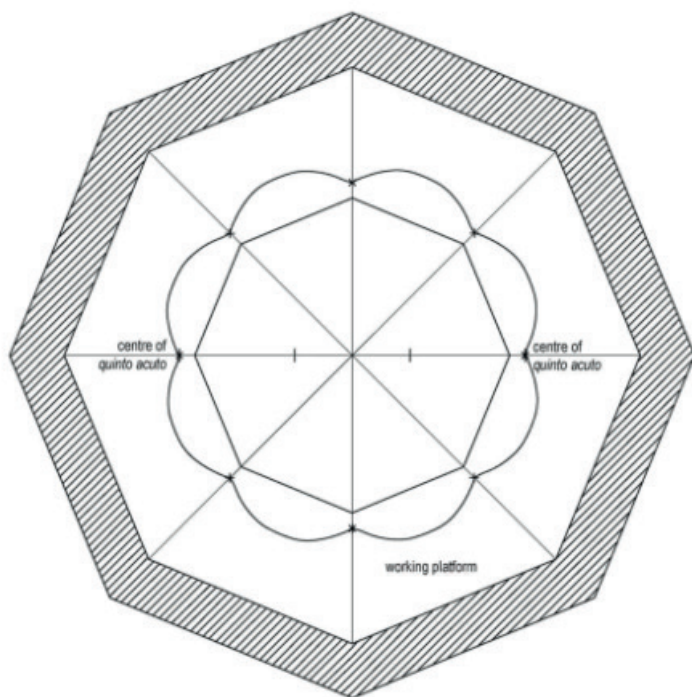


Fig. 13.1 Teoria della pianta costruttiva della Cupola di Santa Maria del Fiore, Firenze [Italia] ad opera dell'arch. Massimo Ricci
Teoría del plan de construcción de la Cúpula de Santa María del Fiore, Firenze [Italia] por el arch. Massimo Ricci

la resistencia, especialmente las de piedra en caso de estar fisuradas. Hay además 9 arcos horizontales en la cáscara exterior, en los 2/3 superiores de la cúpula, separados unos 2,5 m en altura cuyo espesor prácticamente se anula en el centro de cada paño, que se cree refuerzan esta cáscara. Estos arcos son una variación al programa de 1420, que preveía unir entre sí las dos bóvedas mediante la construcción de elementos de relleno independiente.

Exteriormente, sobre una capa de mortero y con ganchos metálicos se sujetan alrededor de 30.000 tejas de arcilla cocida de color rojizo, al igual que el resto de construcciones de la ciudad, mientras que las aristas destacan por el uso de mármol blanco.



Fig. 13.2 Applicazione pratica del processo costruttivo teorizzato dall'arch. Massimo Ricci
Aplicación práctica del proceso de construcción teorizado por el arch. Massimo Ricci

La Firenze del Quattrocento era una città che si stava consolidando attorno allo spazio occupato dal Duomo, ancora privo della sua cupola. Ciò ha reso difficile la costruzione di impalcature esterne e una grande trave interna in grado di sostenere l'intero peso della cupola alla sua altezza avrebbe reso la costruzione troppo costosa e lenta. Per questo, tra le soluzioni proposte, quella del Brunelleschi è stata quella che ha finalmente trionfato: una cupola autoportante, cioè che si regge da sola durante la costruzione, e ovviamente alla fine. Per raggiungere questo obiettivo, era essenziale il sartiame a parete della cupola. All'aumentare dell'altezza, la forma della cupola fa sì che i mattoni inizino a inclinarsi verso l'interno, consentendo loro di scivolare. Le due tecniche che sono state utilizzate e che generano un sartiame a parete singola, contribuendo entrambe alla resistenza complessiva della cupola, sono il cosiddetto sartiame a spina di pesce e il sartiame teso ("a corda suave") [Fig.13.3-13.4].

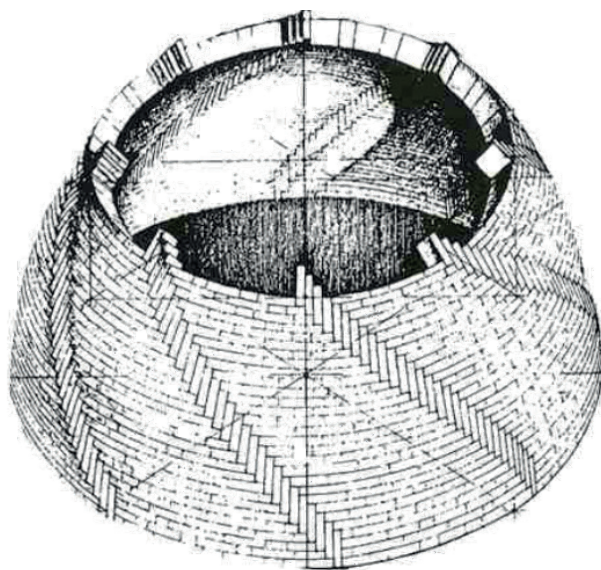


Fig. 13.3 Rappresentazione della cupola circolare a spina di pesce
Representación de la cúpula circular en forma de espina de pez

La Florencia del siglo XV era una ciudad que se había ido consolidando entorno al espacio que ocupaba la catedral, todavía sin su cúpula. Esto dificultaba la posibilidad de construir andamios exteriores, y una gran cimbra interior que pudiese soportar todo el peso de la cúpula a la altura que se encontraba, haría que la construcción fuese demasiado cara y lenta. Por ello, de las soluciones que se propusieron, la de Brunelleschi fue la que finalmente triunfó: una cúpula auto-sustentada, es decir, que se soporta así misma durante la construcción, y por supuesto al terminar. Para conseguirlo, el aparejo mural de la cúpula era fundamental. A medida que se gana altura, la forma de la cúpula hace que los ladrillos empiecen a inclinarse hacia el interior, pudiendo deslizar. Las dos técnicas que se emplearon y que generan un aparejo mural único, contribuyendo ambas a la resistencia global de la cúpula son las denominadas espina de pez, y el aparejo en cuerda floja ("*a corda blanda*") [Fig.13.3-13.4].

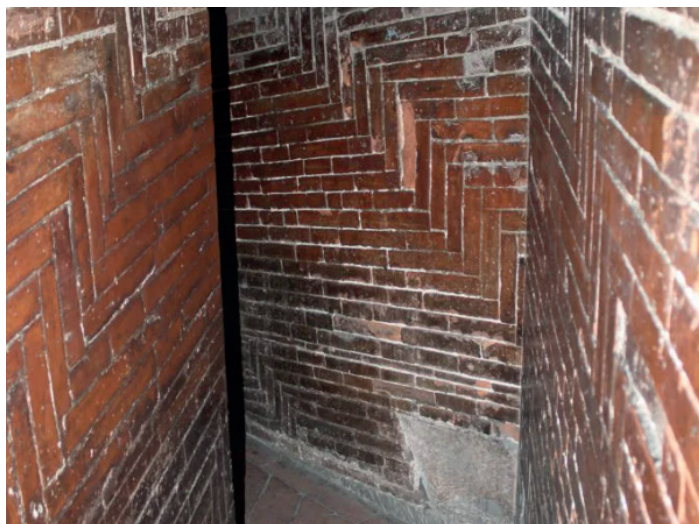


Fig. 13.4 Dettaglio costruttivo della muratura a spina di pesce
Detalle de construcción de fábrica en espina de pez

sfida principale: la costruzione

Dal livello della seconda navata della cupola inizia il sartiame a spina di pesce. Consiste nel rompere i piani orizzontali di debolezza che gli strati di malta presuppongono, mediante l'inserimento di mattoni verticali. Ogni mattone verticale si sovrappone per $2/3$ della sua altezza al precedente, in modo tale da generare una linea obliqua, più simile a una spirale attorno alla cupola. Anche se potrebbe non sembrare a causa della sua forma ottagonale, questa spirale ruota attorno all'intera cupola, in modo continuo [Fig.13.3]. Nel 2012 gli scavi hanno portato alla luce una cupoletta nei pressi del Duomo e realizzata con la stessa tecnica, per cui si teorizza la possibilità che fosse una pratica, un modello, per verificare che potesse essere costruita, pur essendo una cupola circolare e non ottagonale. Una delle teorie più accreditate sulla costruzione, del professore italiano Massimo Ricci, si basa su un disegno di Giovanni di Gherardo da Prato. Collaborò con il Ghiberti, essendo un oppositore del Brunelleschi, e criticò il suo lavoro con scritti e disegni su pergamena, suggerendo che la cupola sarebbe caduta a causa di alcuni errori del suo progettista. Grazie a questo, esiste questo documento grafico unico sulla costruzione.

La teoria costruttiva si basa sull'uso di corde guida [Fig.13.4-13.6]. Un fiore con 8 petali è stato disegnato su una piattaforma, a cui sono state legate delle corde che, da un lato, attraversano il fiore, e dall'altro definiscono il muro della cupola. Le funi controllano l'angolo e l'altezza dei mattoni, poiché la fune proietta la sua curvatura sul muro, creando un arco rovesciato, che ha la forma di una "corda tesa", come una catenaria.

Pertanto, ogni piano "orizzontale" della cupola ha una forma concava e inclina verso il centro della cupola. Potrebbe originarsi (e questo costituisce un'altra teoria) da linee perpendicolari ai cappucci. Estendendo queste linee nella nostra immaginazione, viene generato un cono con un vertice inferiore, che cambia al variare dell'altezza della cupola.

Oltre a questo Brunelleschi progettò tutti i tipi di macchine edili, ad esempio per poter sollevare materiali fino a 50 m di altezza dove si trovavano gli operai della cupola.

A partir del nivel del segundo pasillo de la cúpula comienza el aparejo en espina de pez. Consiste en romper los planos horizontales de debilidad que suponen las capas de mortero, mediante la intercalación de ladrillos verticales. Cada ladrillo vertical se superpone en $2/3$ de su altura con el anterior, de tal manera que se va generando una línea oblicua, que más bien es una espiral alrededor de la cúpula. Aunque no lo parezca por la forma octogonal, esta espiral gira alrededor de toda la cúpula, de forma continua [Fig.13.3]. En 2012 se descubrió con excavaciones una cúpula pequeña cercana a la Catedral y realizada con la misma técnica, por lo que se teoriza sobre la posibilidad de que fuera una práctica, un modelo, para comprobar que se podía construir, aunque es una cúpula circular y no octogonal. Una de las teorías más aceptadas sobre la construcción, del profesor italiano Massimo Ricci, se basa en un dibujo que realizó Giovanni di Gherardo da Prato. Éste trabajaba con Ghiberti, siendo opositor de Brunelleschi, y criticó su trabajo con escritos y dibujos en un pergamino, sugiriendo que la cúpula se caería por algunos errores cometidos por su diseñador. Gracias a ello existe este único documento gráfico sobre la construcción.

La teoría de la construcción se basa en la utilización de cuerdas guía [Fig.13.4-13.6]. Sobre una plataforma se dibujaba una flor de 8 pétalos, a la que estaban atadas unas cuerdas que, por ese lado, recorren la flor, y por el otro van definiendo la pared de la cúpula. Las cuerdas controlan el ángulo y altura de los ladrillos, pues la cuerda proyecta en el muro su curvatura, creando un arco invertido, que es la forma de "cuerda floja", como de catenaria.

Así, cada plano "horizontal" de la cúpula tiene una forma cóncava e inclinada hacia el centro de la cúpula. Se podría originar (y esto constituye otra teoría) mediante rectas perpendiculares a los casquetes. Prolongando estas rectas en nuestra imaginación, se genera un cono con vértice inferior, que va cambiando a medida que cambia la altura de la cúpula.

Además de ello, Brunelleschi diseñó todo tipo de maquinaria de construcción, por ejemplo para poder subir materiales a los 50 m de altura en que estaban los trabajadores de la cúpula.

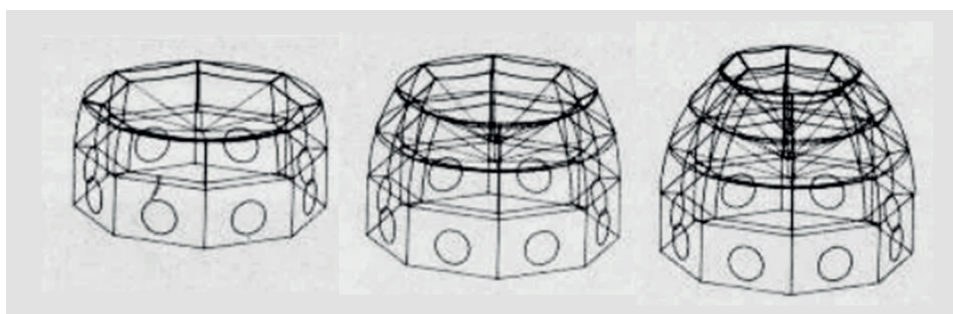


Fig. 13.5 Teoria dei coni con immagine "corda morbida"
Teoría de los conos con imagen "corda blanda"

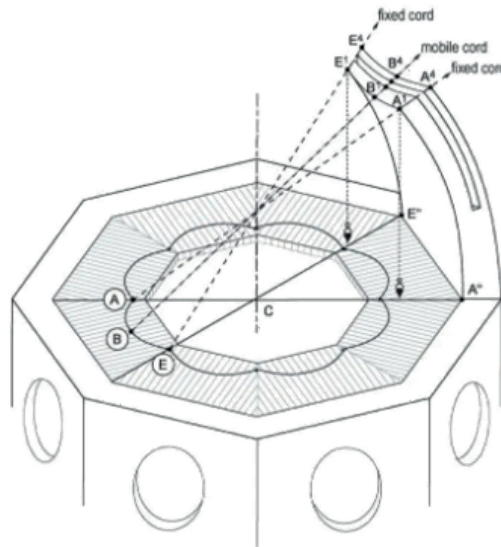


Fig. 13.6 Teoria della metodologia costruttiva della Cupola di Santa Maria del Fiore, Firenze, Italia, ad opera dell'arch. Massimo Ricci
 Teoría de la metodología de construcción de la Cúpula de Santa María del Fiore, Firenze, Italia, por el arch. Massimo Ricci

Tutte le immagini presenti in questo libro sono opera degli autori, eccetto:

Todas las imágenes presentes en este libro son de los autores, excepto:

Antonetti, C.: Fig. 1.4, 2.1, 2.9, 2.13, 3.18, 3.27, 3.32, 6.2

Panarello, A.: Fig. 2.2, 2.11

Knight, R., in *Eero Saarinen Papers, Manuscripts and Archives*: Fig. 3.19

Lozano Apolo, G; Lozano Martínez-Lenguas, A., Fig. pp. 70-73

Keech, C.: Fig. 10.1

Muñoz, R.: Fig. 10.2

Aleu: Fig. 12.1

Courtesy of Boston Public Library: Fig. 12.2, 12.3

Pounds, R., in *Las bóvedas tabicadas de Guastavino: forma y construcción*, in *Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Sevilla, 26-28 octubre 2000: Fig. 12.4

Ricci, M., in <https://www.massimoricciarchitetto.it>: Fig. 13.1, 13.2, 13.3, 13.4, 13.5, 13.6

BIBLIOGRAFIA | BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía | Bibliografía

Adell Argilés, J.M., Cano Lasso, J. (1988). *El ladrillo material moderno*. Madrid: Hispalyt.

Blat Llorens, J.V., (1990). *Elementos constructivos*. Valencia.

Choisy, A. (1873). *L'art de bâtir chez les Romains*. Paris: Librairie de la Société anonyme de publications périodiques.

Davey, N. (1964). *Historia de la construcción*. Barcelona: Jano.

García-Gutiérrez Mosteiro, J., (2000). *Las bóvedas tabicadas de Guastavino: forma y construcción*. En: Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Sevilla, 26-28 octubre 2000 - Sevilla, Junta Andalucía, COAAT Granada: CEHOPU.

Giovannoni, G. (1972). *La tecnica della costruzione presso i Romani*. Roma: Laminas.

Huerta, S. (2004). *Arcos, bóvedas y cúpulas, geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

Huerta, S. (2005). *Mecánica de las bóvedas tabicadas*. Arquitectura: Revista del Colegio Oficial de Arquitectos, Madrid. N°339.

Lozano Apolo, G., Lozano Martínez-Luengas, A. (1995). *Reestructuración de edificios de muros de fábrica Cursos técnicas de intervención*. (Tomo II). Consultores Técnicos de Construcción.

Mittag, M. (1968). *Teoría y práctica de construcción de edificios*. Madrid: Alhambra.

Portoghesi, P. (2006). *Dizionario enciclopedico di architettura e urbanistica*. Roma: Gangemi Editore

Rabasa Díaz, E. (2008). *Forma y construcción en piedra: De la Cantería Medieval a la estereotomía del siglo XIX*. Madrid: MaterPrint.

Ricci, M. (2014). *Il genio di Filippo Brunelleschi e la costruzione della Cupola di Santa Maria del Fiore*. Città di Castello: Sillabe.

Swida, W. (1963). *Estática de arcos y bóvedas*. Madrid: Dossat.

Tarrago, S. (2002). *Guastavino CO*. Barcelona: COAC.

Torroja, E. (1960). *Razón y ser de los tipos estructurales*. Madrid: Instituto Eduardo Torroja.

VV. AA., (1968). *Diccionario de la construcción*. Barcelona: Ceac.

VV.AA., (2001) *Las bóvedas de Guastavino en América*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.



SISTEMI COSTRUTTIVI VOLTATI

EL ARCO Y LA BÓVEDA

Graziella Bernardo, Luis Manuel Palmero Iglesias

Mettere in evidenza due sistemi costruttivi come l'arco e la volta significa ampliare la visione generale della storia dell'edilizia e dell'architettura. Con un'identità unica riconosciuta nel tempo, questi elementi sono stati in grado di risolvere le sfide strutturali in relazione alla meccanica e all'uso dei materiali, fornendo soluzioni esteticamente eleganti e precise. Le loro risultati, che hanno definito stili architettonici, richiamano la corrispondenza dei concetti vitruviani di firmitas, utilitas e venustas in termini di struttura e forma, spazio e funzione, estetica e stile. Questo libro vuole essere utile ai nostri studenti e lettori, definendo in modo chiaro e preciso le parti più significative di questi bellissimi punti di riferimento del nostro passato, presente e futuro architettonico.

Destacar dos sistemas constructivos como son el arco y la bóveda significa ampliar nuestra visión general a lo largo de la historia de la construcción y de la arquitectura. Con una singular identidad reconocida a lo largo del tiempo, estos elementos han sido capaces de resolver desafíos estructurales en relación a la mecánica y al uso de los materiales, aportando soluciones bellas y precisas. Estos resultados, los cuales definieron estilos arquitectónicos, recuerdan la correspondencia de los conceptos Vitruvianos firmitas, utilitas y venustas en cuanto a estructura y forma, a espacio y función y a estética y estilo. Este libro, pretende ser útil a nuestros estudiantes y lectores, definiendo de una forma clara y precisa las partes más significativas de estos bellos hitos de nuestro pasado, presente y futuro arquitectónico.