

CUADERNOS INTEMAC

Trazados y estabilidad de la arquitectura gótica

Design and stability of gothic architecture

M^a. Josefa Cassinello Plaza
Dr. Arquitecto



METIRE UT SCIAS

INTEMAC

INSTITUTO TÉCNICO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

N.º 53
1.º TRIMESTRE '04



METIRE UT SCIAS

INTEMAC

INSTITUTO TÉCNICO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

CONTROL DE PROYECTO

CONTROL DE OBRA

GARANTÍA DE CALIDAD

(O.C.T.) CONTROL PARA EL SEGURO DE DAÑOS

INFORMES DE PATOLOGÍA, REHABILITACIÓN Y REFUERZOS DE CONSTRUCCIONES

OBRAS PÚBLICAS
EDIFICACIÓN
INSTALACIONES



INTEMAC
A U D I T

AUDITORIA TÉCNICO-ECONÓMICA DE CONSTRUCCIONES

- ASESORÍA EN EL PLANTEAMIENTO Y EN LA CONTRATACIÓN DE LA OBRA
- SEGUIMIENTO DE COSTOS Y PLAZOS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN
- VALORACIONES DE TERRENOS, INMUEBLES Y CONSTRUCCIONES
- AUDITORÍAS DE TRABAJOS PARCIALES Y DE LIQUIDACIÓN DE LA OBRA



INTEMAC
E C O

AUDITORÍA TÉCNICA MEDIOAMBIENTAL

CONTROL DE IMPACTO AMBIENTAL

Obras Públicas

Edificación

Instalaciones

CONTROL DE CALIDAD AMBIENTAL

Aire

Agua

Ruido

AUDITORÍA MEDIOAMBIENTAL

ASESORAMIENTO EN MATERIA DE MEDIO AMBIENTE

TRAZADO Y ESTABILIDAD DE LA ARQUITECTURA GÓTICA(*)

DESIGN AND STABILITY OF GOTHIC ARCHITECTURE(*)



Mª Josefa Cassinello Plaza

Dr. Arquitecto

Profesora Asociada al Departamento de Construcción
y Tecnologías Arquitectónicas de la Escuela Técnica
Superior de Arquitectura de Madrid

PhD., Architecture

Lecturer at the Construction and Architecture Technology
Department of the Madrid College of Architecture

(*) Esta publicación resume los aspectos más relevantes del trabajo de investigación realizado por la autora como Tesis Doctoral en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid bajo la dirección del Profesor D. José Calavera Ruiz (U. Politécnica de Madrid), teniendo como tutor al Profesor D. Salvador Pérez Arroyo (U. Politécnica de Madrid).

(*) This publication contains a summary of the research conducted by author for her doctoral Thesis at the Madrid College of Architecture under the direction of Professor José Calavera Ruiz (Polytechnic University of Madrid), and tutorship of Professor Salvador Pérez Arroyo (Polytechnic University of Madrid).

Copyright © 2004, INTEMAC

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida o distribuida de ninguna manera ni por ningún medio, ni almacenada en base de datos o sistema de recuperación, sin el previo permiso escrito del editor.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in a data base or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

ISSN 1133-9365

Depósito legal: M-49042-2004
Infoprint, S.A. - San Vicente Ferrer, 40

CONTENTS

1. INTRODUCTION
2. GEOMETRIC FIRMS AND COMPONENT CONFIGURATION
3. LABORATORY TEST PROGRAMME: MORTAR AND STONWORK
4. RESULTS OBTAINED. TYPES OF VAULTS
5. SPANISH GOTHIC CATHEDRALS: STRUCTURAL TYPES
6. CONCLUSIONS
7. ANNOTATED REFERENCES AND ENDNOTES

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. FORMA GEOMÉTRICA Y CONFIGURACIÓN CONSTRUCTIVA
3. PLAN DE ENSAYOS: MORTEROS Y FÁBRICAS
4. APORTACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS. TIPOS DE BÓVEDAS
5. CATEDRALES GÓTICAS ESPAÑOLAS: TIPOS ESTRUCTURALES DETECTADOS
6. CONCLUSIONES
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y COMENTARIOS AL TEXTO

ABSTRACT

The aims defined by this research is to stablish a classification method for the spanish gothic cathedrals based on their stone skeletons characteristics. For this purpose we study some elements which lead never been enough analysed before, as the spandrels.

1. INTRODUCTION

The primary and unprecedented purpose of the research conducted was to classify the stone skeletons of Spanish Gothic cathedrals by structural and construction type.

Given that the structural performance of stonework buildings such as Gothic cathedrals is based on their stability and this, in turn, depends directly on the geometric design used by Medieval masters and the specific component configuration of these structures, geometric form and component configuration were the criteria used to establish the type classification. This decision was also driven by other findings, such as the identification of important features of Spanish cathedrals that had not been previously taken into account. These include the existence of spandrels in the formerets and transverse ribs of some types of Gothic fan vaults, which leads to a wholly new interpretation of the structural behaviour of the cathedral as a whole, as well as the discovery of overlying vaults. Whilst the latter do not affect the stability of the entire structural skeleton, they do change the type of stability acting on the vaults involved: in Seville Cathedral, for instance, there are vault types different from the types traditionally assumed.

Moreover, a new concept, esteemed to be important for analysing cathedral stability, is defined: *evolutionary stability*. This approach introduces certain features of the specific component configuration of any given cathedral that make it more or less vulnerable to possible long-term variation. This question may be of considerable relevance in analysing the state of deterioration of such edifices. Consequently, the structural types established in this paper are defined, firstly, in terms of the "roof type", which may be flat or *decked*, as in Seville Cathedral - a type of roof where new layers of material can more readily accumulate over the vault extrados; or double- or multiple-*sloped*, such as in Burgos Cathedral, a type of roof that, on the contrary, has contributed to the conservation of the original extrados over the centuries.

2. GEOMETRIC FORM AND COMPONENT CONFIGURATION

The aims defined entailed a certain degree of complexity, inasmuch as not only the geometric form but also the initial component configuration of Spanish Gothic cathedrals had to be ascertained to establish structural types. The paucity of Gothic manuscripts⁽¹⁾ and the gaps in the construction documentation drafted on the occasion of subsequent restoration works have, over the centuries, made the cathedrals themselves the sole Medieval legacy that can be directly studied and analysed to gain insight into their construction and structure. But the stone skeleton of Gothic cathedrals exists no longer: it has disappeared over the centuries, due not only to the deformation affecting its initial geometric forms, but also, and primarily, under the layer upon layer of subsequent architectural styles and works. In most cases, such as in Burgos Cathedral (Fig. 1), these later operations have substantially modified the stability of the original structure: the introduction of new naves has turned end into intermediate bays and what were exterior into interior buttresses, modifying the balance of the initial Medieval stone mass.

RESUMEN

El objetivo planeado por el siguiente trabajo consiste en establecer un método de clasificación para las catedrales góticas españolas basado en las características de sus esqueletos pétreos. Para ello se analizan elementos a los que antes no se había prestado una atención preferente, como son las enjutas.

1. INTRODUCCION

El trabajo de investigación realizado ha tenido como objetivo fundamental e inédito, establecer una clasificación en Tipos Estructurales y Constructivos de los Esqueletos Pétreos de las Catedrales Góticas Españolas.

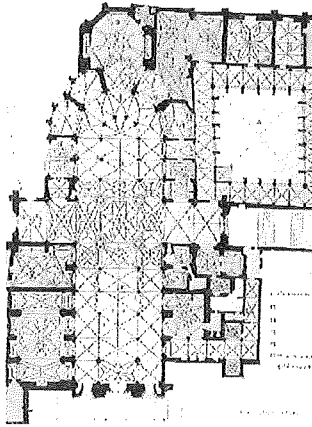
Dado que el funcionamiento estructural de una obra de fábrica como la catedral gótica esta basado en su Estabilidad y que esta depende directamente del Trazado Geométrico con el que los maestros medievales las construyeron así como de su específica configuración constructiva, han sido precisamente su forma geométrica y su específica configuración constructiva la base de la clasificación en tipos que he realizado, una vez detectado y comprobado que existen importantes elementos en las catedrales españolas no tenidos en cuenta hasta la fecha, como la existencia de enjutas en las nervaduras formeras y fajonas de algunos tipos de bóvedas de crucería góticas, que determinan un comportamiento estructural totalmente diferente al supuesto en el conjunto de la catedral, así como la existencia de bóvedas superpuestas, hecho que aunque no interviene en el tipo de funcionamiento estable del conjunto del esqueleto estructural, si cambia el tipo de estabilidad de la propia bóveda, como el caso de la catedral de Sevilla, existiendo tipos de bóvedas diferentes a los supuestos.

Por otra parte, he definido un concepto nuevo que considero importante a la hora de analizar la Estabilidad de una catedral concreta –su *Estabilidad Evolutiva*–, introduciendo algunos aspectos de su configuración constructiva específica que les confieren mayor o menor grado de susceptibilidad frente a posibles variaciones a lo largo del tiempo, hecho que puede tener mucha relevancia a la hora de analizar un estado de deterioro específico. Esta es la razón por la cual dentro de los diferentes Tipos Estructurales que finalmente establezco, he tenido presente como variable el tipo de cubierta; *aterrazada* como la de la catedral de Sevilla, más susceptible de sufrir la aportación de nuevas capas de material sobre la cubierta tendida sobre el extradós de las bóvedas, e *inclinada* a dos o más aguas tipo que ha facilitado la conservación del tipo de configuración constructiva del extradós de las bóvedas a lo largo de los siglos como es el caso de la catedral de Burgos.

2. FORMA GEOMÉTRICA Y CONFIGURACIÓN CONSTRUCTIVA

El objetivo planteado entrañaba la enorme dificultad de tener que conocer no solo la forma geométrica sino también la configuración constructiva primitiva de las catedrales góticas españolas para poder llegar a establecer Tipos Estructurales. La ausencia casi total de manuscritos góticos⁽¹⁾ y la falta de documentación constructiva completa procedente de intervenciones posteriores de restauración, ha convertido a través de los siglos a las propias catedrales en el único legado medieval objeto directo de estudio y análisis para su comprensión constructiva y estructural. Pero el esqueleto pétreo de la catedral gótica no existe, ha ido desapareciendo a lo largo de los siglos, no solo por las deformaciones sufridas en sus formas geométricas primitivas, sino fundamentalmente por la superposición continua de estilos arquitectónicos e intervenciones posteriores, que en la mayor parte de los casos como en el de la catedral de Burgos (Fig. 1) ha variado de forma muy relevante su comportamiento *estable* al haberse introducido nuevas naves, convirtiendo vanos extremos en intermedios que absorben en el interior de la catedral los contrafuertes exteriores modificando el equilibrio de las masas pétreas medievales primitivas.

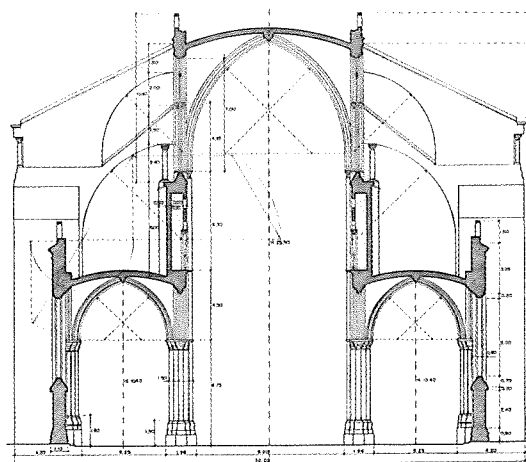
(1) Las notas correspondientes aparecen al final de este Cuaderno.



Planta Catedral de Burgos. Lampérez
Plan view of Burgos Cathedral. Lampérez
Fig. 1

For this reason, in the present survey, after the Spanish Gothic cathedrals were analysed as they stand *today*, the assumed initial Medieval forms⁽²⁾ were defined and the following cathedrals were chosen for further analysis, as representative of the different initial geometries and component configurations identified: Burgos, Santa María del Mar and Seville. Among them, they account for thirteenth, fourteenth and fifteenth century Spanish Gothic cathedral construction⁽³⁾, as well as construction in three different geographic areas, Castile, Catalonia and Andalusia, where typological variations on the forms and component configurations relevant to their stability had been found.

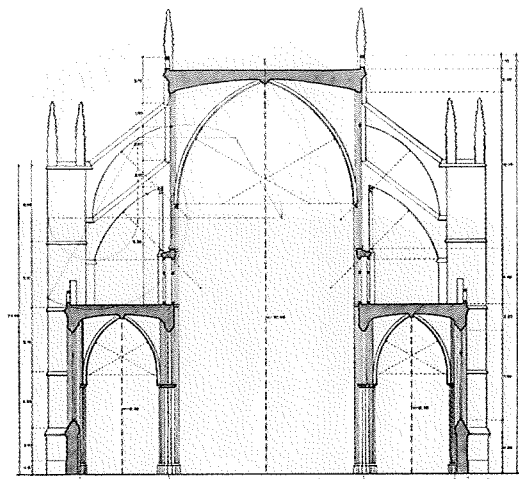
The geometry of each and every one of the various structural members was analysed by applying to the sectional drawings of the various cathedrals some of the initial geometric designs with which Medieval masters are assumed to have determined pier depth, the bearing point for arched buttresses and so on, to guarantee the stability of the design geometry. But the results obtained with this exercise could shed no light on the actual methods of structural engineering used by Medieval masters. Indeed, the geometric rule most extensively used for dimensioning buttresses - described, among others, by Rodrigo Gil de Hontañón⁽⁴⁾ in the sixteenth century, Viollet-Le-Duc in the nineteenth and Fernando Cassinello in the twentieth, and recently applied by Heyman and Santiago Huerta - is valid and adimensional if employed assuming the sole variable to be the geometric form of the cathedral itself subjected to its own self-weight. But other actions that are not adimensional, such as wind and seismic forces, were also taken into account in one way or another by the Medieval masters who, based on their own experience, modified the results obtained from pure geometric analysis of the form. For this reason, it is truly insignificant – from this standpoint – that in the geometric analyses performed for this study the buttress for Leon Cathedral concurs with the results of applying the adimensional geometric rule (Fig. 2), whereas in the Burgos Cathedral the actual buttress is over-engineered on these grounds (Fig. 3).



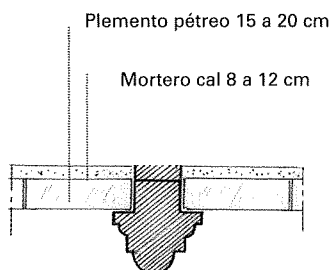
Sección Catedral de Burgos. Aplicación Trazado Geométrico para dimensionado de contrafuertes
Cross-section of Burgos Cathedral. Geometric drawing used to dimension buttresses
Fig. 2

Por esta razón, una vez analizadas las *actuales* catedrales góticas españolas definí las supuestas formas primitivas medievales⁽²⁾ seleccionando para su análisis: Burgos, Santa María del Mar y Sevilla, como representantes de las diferentes geometrías y configuraciones constructivas primitivas detectadas, abarcando así los tres siglos XIII, XIV y XV en los que fueron construidas la mayor parte de las catedrales góticas españolas⁽³⁾ en tres de sus diferentes zonas geográficas; Castilla, Cataluña y Andalucía, en las que detecté variables tipológicas de formas y configuraciones constructivas relevantes frente a su comportamiento estable.

Analiqué la geometría de todos y cada uno de los diferentes elementos estructurales, aplicando a las secciones de varias catedrales algunos de los supuestos Trazados Geométricos primitivos con los que los maestros medievales pudieron llegar a determinar el canto de sus estribos, el punto de aplicación de arbotantes, etc. ... para garantizar la estabilidad de la geometría proyectada. Pero los resultados obtenidos en este aspecto no arrojan ninguna luz sobre los métodos reales de dimensionado estructural utilizado por los maestros medievales, ya que la aplicación de la Regla Geométrica más extendida de dimensionado de contrafuertes, recogida entre otros por Rodrigo Gil de Hontañón⁽⁴⁾ en el siglo XVI, Viollet-Le-Duc en el siglo XIX y Fernando Cassinello en el siglo XX, y aplicada recientemente por Heyman y Santiago Huerta, es válida y adimensional si se utiliza considerando como única variable la propia forma geométrica de la catedral bajo la acción de su propio peso, pero existen acciones que no son adimensionales como el viento y el sismo y que de alguna forma, y basándose en la experiencia directa, los maestros medievales introdujeron modificando los resultados obtenidos bajo el puro análisis geométrico de la forma. Por ello nada significa –en este aspecto– que en los análisis geométricos que he realizado haya obtenido que el contrafuerte de la catedral de León coincide con el resultado de la aplicación de dicha regla geométrica adimensional (Fig. 2), mientras que en el caso de la catedral de Burgos el contrafuerte resulta de mayor dimensión (Fig. 3).



Sección Catedral de León. Aplicación Trazado Geométrico dimensionado de contrafuertes
Cross-section of Leon Cathedral. Geometric drawing used to dimension buttresses
Fig. 3



Detalle constructivo Bóveda
Vault. Construction detail
Fig. 4

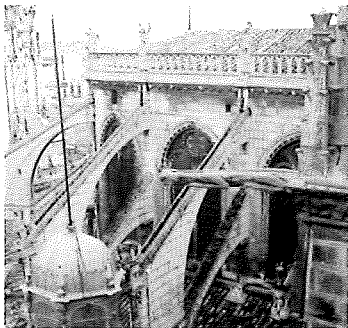
CATHEDRALS SELECTED

The three cathedrals chosen likewise represent three different types of databases obtained to analyse the component configuration of their vaults.

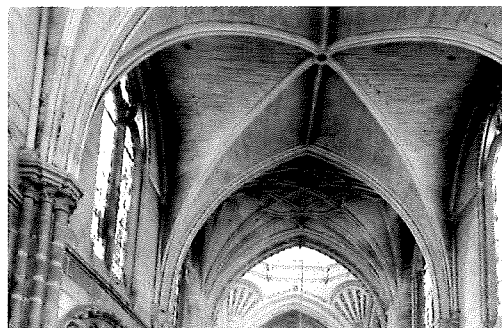
BURGOS

The initial skeleton of Burgos Cathedral, begun in 1221⁽⁵⁾, is representative of the model most commonly followed in France in the twelfth and thirteenth centuries. It has three naves of differing heights, the initial vaults that have reached us are simple quadripartite fan vaults, although there are also stellar vaults of different types. The piers are exterior and there is a double row of arched buttresses around the cathedral perimeter. The roof is double-sloped (Fig. 5). The geometric form of the vaults is defined by semicircular formerets and ogive transverse arches.

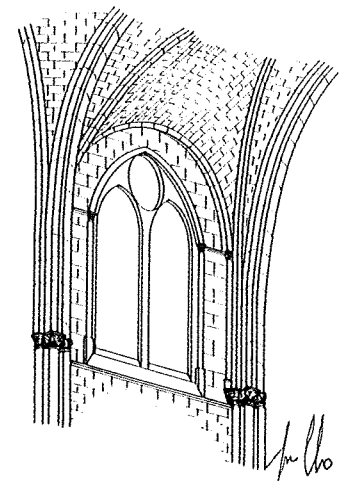
This cathedral was built with "Hontoria" stone from nearby quarries, following usual Medieval practice. All the vaults are quadripartite: the ones in the arcades have nearly square plans (7,08 m x 7,08 m), whilst the central vault has a rectangular footprint (7,08 m x 11,45m), measured from centre-to-centre of the columns. The severies on these vaults are laid from transverse to diagonal and from wall to diagonal ribs with elongated "Hontoria" stone blocks to optimise the number needed to cover the span of the vault. The geometry of the ribs determines the "form" of the severies laid over them. Indeed, since the keystones on the diagonal arches, formerets and perpendicular ribs are staggered, the severies have double-bowed surfaces, affording them greater stiffness than if they were simply bowed. Although quadripartite, the vaults have a supplementary set of ribs that join the keystones of all the perpendicular ribs (Fig. 6) and run across and brace all the vaults in the central nave of the cathedral, with the exception of the stellar vaults at the rear. Another peculiar feature of the geometry of the initial Burgos Cathedral vaults is that the transverse arches are semicircular (Fig. 7), whereas later Gothic cathedrals such as Leon Cathedral (Fig. 8), Santa María del Mar or Seville, have ogive transverse arches.



Cubierta Catedral Burgos
Roof on Burgos Cathedral
Fig. 5



Boveda Crucería Cuatrimpartita
Quatrimpartite fan vault
Fig. 6



Arco Formero de Medio Punto
Semicircular formeret
Fig. 7.

Catedral de Burgos. Toma de datos M^a Josefa Cassinello 1.998
Burgos Cathedral. Data compiled by M^a Josefa Cassinello 1.998

The component configuration of the original vaults in this cathedral is apparently based on French techniques, with elongated stones 15 to 20 cm thick and an 8- to 12-cm thick layer of lime mortar covering (Fig. 4).

SEVILLE

Seville Cathedral, built starting in the fifteenth century, is the largest cathedral in Spain, measuring 116 m long by 76 m wide (Fig. 10). It has five naves, the highest one in the centre, with lateral chapels between the interior buttresses. The central nave spans a distance of approximately 16 m, the nave arcades 11 m and the chapels between buttresses 7 m. The temple has a three-dimensional web of exterior arched buttresses and a flat roof (Fig. 9) which conceals the extrados and prevents any *a priori* determination of the specific component configuration to which the vault was erected.

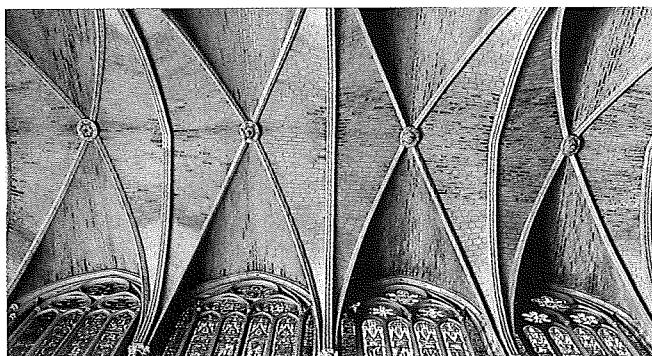
CATEDRALES SELECCIONADAS

Las tres catedrales seleccionadas representan también tres tipos diferentes de base de datos obtenidos sobre la configuración constructiva de sus bóvedas para su análisis.

BURGOS

El esqueleto primitivo de la catedral de Burgos iniciado en el año 1.221⁽⁵⁾, responde al tipo más utilizado en Francia en los siglos XII y XIII. Cuenta con tres naves de diferente altura, las bóvedas primitivas que se conservan son de crucería simple y cuatrimpartitas, aunque existen también bóvedas estrelladas de diferentes tipos. Los estribos son exteriores y existe una doble secuencia perimetral de arbotantes, siendo su cubierta inclinada a dos aguas (Fig. 5). La forma geométrica de sus bóvedas esta generada con arcos formeros de medio punto, y fajones apuntados.

Las fábricas de esta catedral se construyeron con piedra de Hontoria, procedente de canteras cercanas, tal y como era habitual en la construcción medieval. Las bóvedas de esta crujía son cuatrimpartitas, las laterales cubren plantas casi cuadradas (7,08 m x 7,08 m), mientras la bóveda central cubre una planta rectangular (7,08 m x 11,45m) a ejes de pilares. Los plementos de estas bóvedas se tienden de fajones a cruceros y de formeros a cruceros con piezas de sillería de Hontoria de dimensiones muy alargadas para optimizar el número necesario de estas para cubrir el vano de la bóveda. La geometría de las nervaduras determina la "forma" del plemento que se tiende sobre ellos, de tal manera que al existir decalaje entre las claves de los arcos diagonales, formeros y perpiaños, la superficie del plemento resulta de doble curvatura, hecho que dota al plemento de una mayor rigidez que si fuera de simple curvatura. Aunque se trata de una bóveda cuatrimpartita, cuenta con una nervadura suplementaria que une las claves de las nervaduras perpiañas (Fig. 6), y que recorre toda las bóvedas de la nave central de la catedral arriestrándolas, menos las de las posteriores bóvedas estrelladas. Otro hecho peculiar en la geometría de las bóvedas primitivas de la catedral de Burgos es que los arcos formeros son de medio punto (Fig. 7), mientras que en las catedrales góticas posteriores responden a geometrías apuntadas, como en León (Fig. 8), Santa María del Mar o Sevilla.



Boveda de Crucería Cuatrimpartita. Catedral de León
Quatrimpartite fan vault. Leon Cathedral
Fig. 8

En cuanto a la configuración constructiva de sus bóvedas primitivas, al parecer están formadas a la manera francesa, por sillarejos alargados de espesor de 15 a 20 cm y una capa de mortero de cal ejecutada sobre su extradós de 8 a 12 cm (Fig. 4).

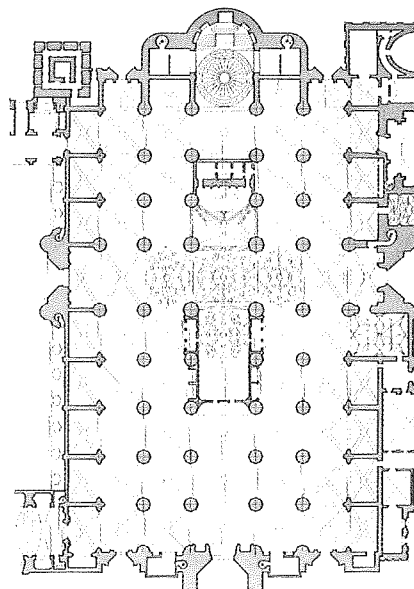
SEVILLA

La Catedral de Sevilla, iniciada en los primeros años del siglo XV, es la mayor catedral española, contando con una longitud de 116 m y una anchura de 76 m (Fig. 10). Consta de cinco naves, siendo de mayor altura la central, y de capillas laterales entre los contrafuertes interiores. La luz libre de la nave central es aproximadamente de 16 m, las laterales de 11 m y las capillas entre contrafuertes de 7 m. Cuenta con un entramado tridimensional de arbotantes exteriores y su cubierta es aterrazada (Fig. 9), hecho que no permite conocer a priori la específica configuración constructiva de del extradós de las cubiertas.

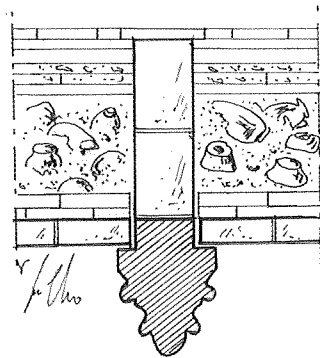


Cubiertas Catedral de Sevilla. Postal 1.996
Roof on Seville Cathedral. 1996 post card
Fig. 9

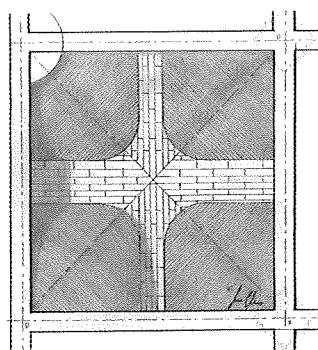
Not only does the geometry of the initial quadripartite vaults differ essentially from the shape of the Burgos Cathedral vaults, with ogive transverse arches such as in Leon, Santa María del Mar and Palma de Majorca Cathedrals, but their component configuration and therefore overall stability are also substantially different from the Castilian structure (Fig. 11). In fact, the inspection conducted of one of the lateral vaults, namely the St Anthony vault, in July 1996⁽⁶⁾, which was documented and analysed by archaeologist Alfonso Jiménez Sancho, led to the discovery of a special component configuration, with vaults overlaying the vaults that roof the nave arcades of the cathedral (Fig. 12). A total of 16 different strata or layers appeared over the extrados of the vault analysed⁽⁷⁾ (Fig. 17). In some areas, there are up to six different layers of mortar and filling between the present flooring of the decked roof and the surfacing of the original roof. This discovery reveals that the weight of the roof increased by approximately 30 N/mm² between the fifteenth and the seventeenth centuries, according to the assessment of the component configuration analysed.



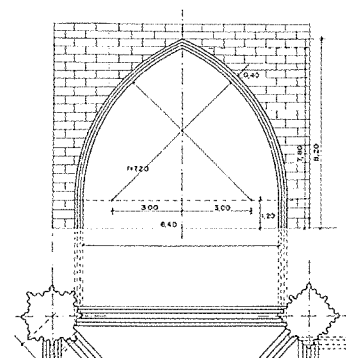
Planta Catedral de Sevilla
Plan view, Seville Cathedral
Fig. 10



Sección Constructiva Clave Bóveda
Construction detail for vault headstone
 Fig. 11



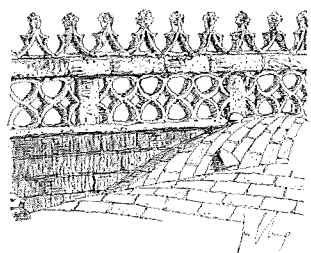
Planta Bóvedas Superpuestas
Plan view of overlaid vaults
 Fig. 12



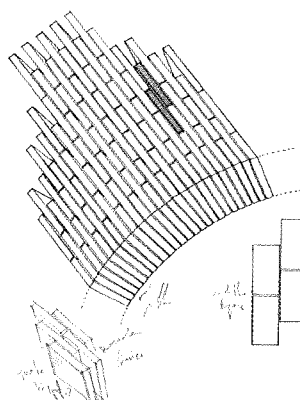
Nervadura fajona enjutada
"Spandrelled" transverse ribs
 Fig. 13

Toma de Datos M^a Josefa Cassinello Plaza. Catedral de Sevilla (julio 1.996)
Data compiled by M^a Josefa Cassinello Plaza. Seville Cathedral (July 1996)

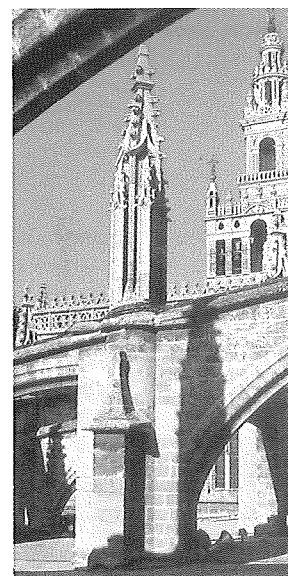
Las bóvedas cuatripartitas más primitivas no solo presentan una diferencia fundamental en su geometría respecto de las de la catedral de Burgos, siendo sus nervaduras formeras apuntadas al igual que las de León, Santa María del Mar, ó Palma de Mallorca, sino que además su configuración constructiva es sustancialmente diferente y así la estabilidad de su conjunto (Fig. 11). En efecto, la inspección que realizamos en julio de 1.996⁽⁶⁾ en la bóveda lateral de San Antonio, que fue documentada y analizada por el arqueólogo Alfonso Jiménez Sancho, desembocó en el descubrimiento de una especial configuración constructiva, existiendo bóvedas superpuestas en las naves laterales de la catedral (Fig. 12). Aparecieron un total de 16 estratos o capas diferentes sobre extradós de la bóveda analizada⁽⁷⁾ (Fig. 17). En algunas zonas, bajo el pavimento de la cubierta aterrazada actual existen hasta un total de seis capas de morteros y rellenos diferentes, y bajo estas otro pavimento – el primitivo – hecho que deja patente un incremento de peso en cubierta desde el siglo XV al XVIII de aproximadamente 30 N/mm² según la evaluación que realice a la vista de la configuración constructiva descubierta.



Enjutas formeras Nave Central
"Spandrelled" formeret. Central nave
 Fig. 14



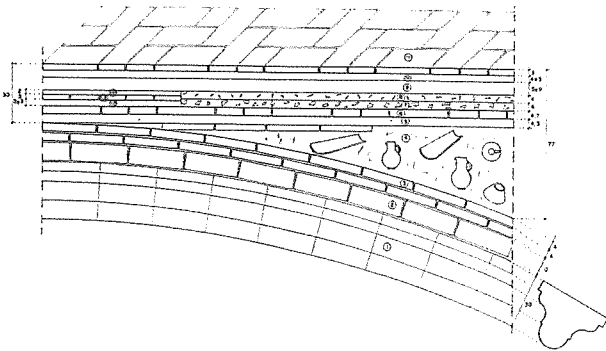
Bóvedas superpuestas de fábrica de ladrillo
Overlaid brick vaults
 Fig. 15



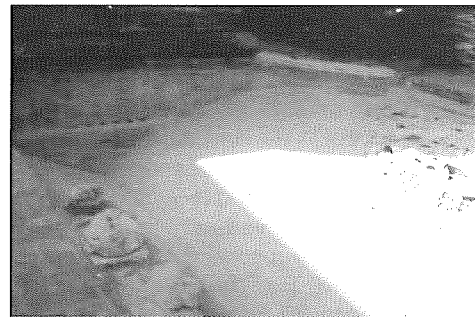
Cubierta Plana Catedral Sevilla
Deck roof on Seville Cathedral
 Fig. 16

El estrato n^o 12 fue una sorpresa para todos los que esperábamos poder ver la específica "configuración constructiva" que enmascaraba la gran diferencia de niveles entre intradós y extradós de la bóveda pétreo hasta la solería aterrazada (Fig. 16). Resultó estar formado por *cuatro bóvedas cónicas de fábrica de ladrillo de tejar*, (Figs.

The explanation for the enormous difference in elevation between the intrados / extrados of the stone vault and the floor of the decked roof was found in the twelfth of the sixteen strata comprising this part of the cathedral (Fig. 16). This layer consists of four cone-shaped brick vaults (Figs. 12, 18) built over the four corners and along the diagonal rib of the extrados of the stone fan vault visible from inside the cathedral. This structure rests directly on the vault itself and supports part of the "enjarrado" or layer of mortar with incrustated fragments of hollow earthenware (Fig. 19). These continuous vaults consist of a single course of rubber brick (Fig. 15), in which the bond defining the distribution of the mortar joints in the successive rings accommodates the conic geometry of the vaults, culminating in longitudinally and transversally tapered joints. These are no lightweight partition-like vaults with a laminar structure, but genuine 17.80 cm thick solid vaults with a span of 5.80 m and a slenderness ratio of three hundredths. They were apparently built with a sort of matted falsework strung from the spring over the highest point of the extrados of the stone vault to the angled walls that delimit it, and resting as well on three brickwork props built near the springers. This specific configuration reduces the volume of the filler layer for the main vault and hence its self-weight, which is spread across the four brickwork vaults erected over the stone fan vault, although this arrangement does entail the concentration of loads along the eight springs on which on which the four brickwork vaults rest. This distribution of mass is indisputably the most favourable for the specific ogival geometry of the volumetrics of the main vault as a whole, lightening the load on its haunches and concentrating it on its keystones.



Sección Constructiva Bóveda-Terraza
Vault-deck roof. Cross-section for construction
Fig. 17



Bóvedas Superpuestas
Overlaid vaults
Fig. 18

Toma de datos M^a Josefa Cassinello Plaza. Julio 1.996
Data compiled by M^a Josefa Cassinello Plaza. July 1996

But despite the importance of the discovery of these overlain vaults, more important still was the verification of the existence of a dense lattice of *stone spandrels* (Figs.13, 20) not referenced in any study conducted to date, which entails a significant change in the *model* in place to *analyse* the stability of this cathedral, the largest in Europe. This finding, moreover, was instrumental to establishing the existence of spandrels as the primary criterion in the definition of stone skeleton structural types for Spanish Gothic cathedrals described hereunder.

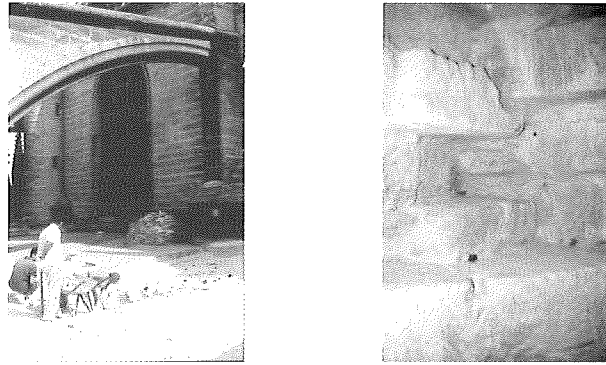
12, 18) situadas en los cuatro ángulos del extradós de la bóveda de crucería pétrea, siguiendo el sentido del nervio diagonal. Esta estructura apoya directamente sobre la bóveda propiamente dicha y sostiene parte del relleno de mortero y vasijas cerámicas de su enjarrado (Fig. 19). Estas bóvedas están ejecutadas con una rosca de ladrillo de tejar, (Fig. 15) de tal forma que los sucesivos arcos están aparejados contrapeando sus juntas; se trata de bóvedas continuas en las que su geometría cónica desemboca en una ley de traba aparejada con escopetas tanto en sentido longitudinal como transversal. No se trata de bóvedas ligeras tabicadas a modo de estructuras laminares sino de verdaderas bóvedas macizas de espesor 17,80 cm salvando una luz máxima de 5,80 m, con una esbeltez de 3 centésimas. Para su ejecución parece que utilizaron una especie de cimbra de cañizo desde el arranque sobre la parte más alta del extradós de la bóveda pétrea hasta los muros en ángulo que la delimitan, apoyando también, cerca del arranque en tres machones de fábrica de ladrillo. Esta específica configuración constructiva reduce el volumen de enjarrado de la bóveda –y así su peso propio–, ya que este se tiende sobre las cuatro bóvedas de fábrica de ladrillo superpuestas a la de crucería pétrea, aunque supone una concentración de carga a lo largo de las ocho generatrices de apoyo de las cuatro bóvedas. La disposición de las masas responde sin duda a la más favorable frente a la específica forma geométrica apuntada de la volumetría del conjunto de la bóveda principal, descargándose los hombros de la misma y concentrando la carga en sus claves.



Inspección-excavación Bóveda de San Antonio. Catedral de Sevilla. Arquitecto mayor Alfonso Jimenez
Inspection-excavation of Ft. Anthony vault. Seville Cathedral. Resident architect Alfonso Jimenez
Fig. 19

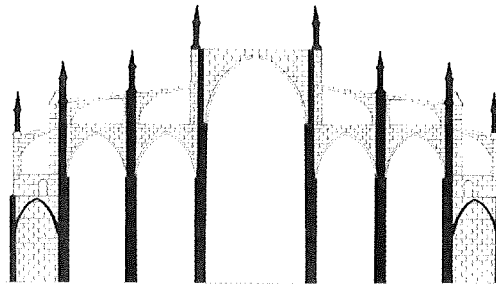
Pero pese a la importancia de este descubrimiento – la existencia de bóvedas superpuestas- fue más importante el hecho de poder comprobar la existencia de un potente entramado de *enjutas pétreas* (Figs. 13, 20) que no aparecen en ningún estudio realizado hasta la fecha y que cambia de forma rotunda el *modelo de análisis* de la estabilidad de la catedral gótica más grande de Europa, y que finalmente me dio la pauta para establecer la existencia de enjutas como la variable fundamental para establecer Tipos Estructurales en los esqueletos pétreos de las catedrales góticas españolas.

En efecto, la catedral de Sevilla esta “enjutada”, los maestros góticos no solo sacaron fuera del interior del edificio arbotantes y contrafuertes sino también el entramado murario que forman las enjutas de las nervaduras de sus



**Enjutas Bóveda lateral
Spandrels. Lateral vault
Fig. 20**

Seville Cathedral is, indeed, “spandrelled”; the Gothic masters moved not only the buttresses, arched and otherwise, but also the whole battery of walls formed by the spandrels of the ribs to its fan vaults from the cathedral interior to its exterior (Fig. 21), to lighten the semblance of the stonework by “hiding” the spandrels in the flat, naked roofs (Fig. 14). Cathedral stability is enhanced by these spandrels, since the stiffness conveyed to the arches defining the vaults substantially increases their capacity to absorb horizontal wind and seismic forces.



**Sección Catedral Sevilla Enjutas fajonas y arbotantes. Toma de datos M^a Josefa Cassinello Plaza, julio 1.996
Cross-section of Seville Cathedral. Spandrels, formerets an arches. Data compiled by
M^a Josefa Cassinello Plaza. July 1996
Fig. 21**

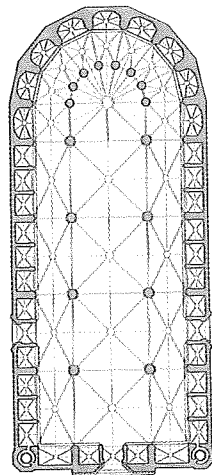
SANTA MARIA DEL MAR (ST MARY OF THE SEA)

The Santa Maria del Mar Gothic church was selected as representative of Spanish cathedrals with square plan quadripartite vaults, as well as of the most widely extended structural stability scheme in Catalonia, where many a three-nave Gothic temple has interior buttresses joined by vaults that cover the chapels housed between them (Fig. 22, 23). Whilst single nave Medieval churches such as Santa Maria del Pi or Girona Cathedral are common throughout Catalonia, there is no lack of numerous three-nave structures, such as Santa Maria del Mar and Barcelona Cathedral, in the region. One of these, Nuestra Señora de la Aurora (Our Lady of the Dawn, 1328), is a very unusual church with a central nave and what might be called two semi-nave arcades with perimeter chapels nestling between the buttresses – semi-buttresses – and the semi-nave arcades. One of the novelties found in Santa Maria del Mar Church is that the central, rather than the lateral, nave section has a square plan. Like most Catalonian Gothic cathedrals, it has a flat roof.

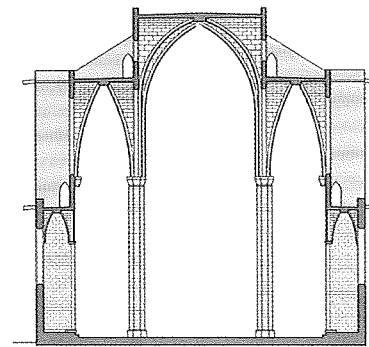
bóvedas de crucería (Fig. 21), consiguiendo una liviana imagen pétreo al “esconder” los tímpanos y manguardias y en las cubiertas aterrazadas y desnudas (Fig. 14). La estabilidad de la catedral se incrementa por el hecho de estar enjutas, ya que la rigidez aportada a las nervaduras que definen las bóvedas aumenta considerablemente su capacidad de absorción de acciones horizontales de viento y sismo.

SANTA MARIA DEL MAR

La iglesia gótica de Santa María del Mar la seleccioné como representante de las catedrales españolas con bóvedas cuatrimpartitas de planta cuadrada, así como en cuanto representante del esquema estructural de estabilidad más generalizado en Cataluña, donde abundan las catedrales e iglesias góticas de tres naves con los contrafuertes en su interior, unidos por bóvedas que cubren las capillas que se ubican entre ellos (Figs. 22, 23). Pese a la gran abundancia existente en Cataluña de iglesias medievales con una sola nave, como es el caso de Santa María del Pi, o la catedral de Gerona, existen también gran número de ellas de tres naves como Santa María del Mar y la propia catedral de Barcelona, incluso el curioso caso de contar con una nave central y lo que podríamos llamar dos medias naves laterales, como la catedral de Nuestra Señora de la Aurora (1.328), en la cual las capillas perimetrales se ubican entre los contrafuertes - medios contrafuertes - y media nave lateral. Una novedad es el cambio que se realiza en esta Iglesia de Santa María del Mar, en la cual son los tramos de la nave central los que tienen planta cuadrada en lugar de las laterales. Su cubierta es aterrazada al igual que en la mayor parte de las catedrales góticas catalanas.



Planta Santa María del Mar
Plan view of Santa María del Mar
Fig. 22



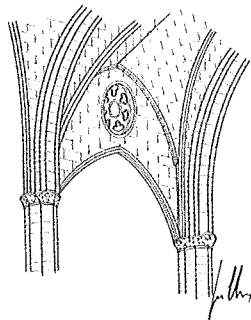
Sección Transversal Santa María del Mar
Cross-section of Santa María del Mar
Fig. 23

La iglesia de Santa María del Mar fue construida en un periodo que abarca aproximadamente medio siglo, se inició en el año 1.329 y en el año 1.383 ya se habían colocado las últimas claves. Intervinieron en su construcción tres maestros: Ramón Despuig, a quien se atribuyen las tracerías, Berenguer de Montagut quien al parecer realizó el trazado de elementos estructurales, y Guillem Metge, interviniendo también posteriormente el maestro Pere Oliva que en el año 1.396 inicia las obras del campanario sur. Su planta es basilical de tres naves, con capillas entre los contrafuertes interiores a la iglesia, cuenta con ábside semicircular en el cual se incluyen los contrafuertes también interiores que generan siete capillas radiales entre ellos, la longitud total de la iglesia es de aproximadamente 90 metros y su anchura de 38,70 metros.

El esqueleto estructural de Santa María del Mar, al igual que el de la Catedral de Sevilla cuenta con enjutas murarias (Figs. 23, 24) sobre las nervaduras de las bóvedas en las dos direcciones ortogonales que generan el trazado de la iglesia, resultando un armazón tremendamente arriostrado y compacto pese a la ingravidez y ligereza apreciables desde el interior de la iglesia ya que dichas enjutas quedan ocultas en la cubierta aterrazada. Por otra parte, en el caso de Santa María del Mar, hasta el nivel de coronación de las bóvedas que cubren las capillas existentes entre los contrafuertes interiores, el esqueleto estructural se ve reforzado al aparecer dos contrafuertes más – de menor espesor- que dividen cada crujía en tres capillas u hornacinas. Otro aspecto que refuerza el esqueleto estable de la iglesia es la existencia de muros – a modo de costillas triangulares- que en prolongación con los contrafuertes, emergen sobre la cubierta de las naves laterales alcanzando la casi totalidad de la altura de la nave central, además la diferencia de altura de claves entre las naves laterales y la nave central es muy pequeña al contrario que en las catedrales de Castilla, como Burgos o León cuya relación entre altura de naves sigue el modelo francés, marcando mucho la diferencia de altura.

Santa María del Mar Church was built in approximately fifty years' time, beginning in 1329; by 1383 the last keystones were in place. Three masters took part in the building process: Ramón Despuig to whom the traceries are attributed, Berenguer de Montagut who apparently designed the structural members, and Guillem Metge. Master Pere Oliva also participated, initiating the works on the south bell tower in 1396. The floor plan is basilical, with three naves and chapels between the interior buttresses. Its semi-circular apse also has interior buttresses with seven radial chapels housed in the interspaces. The church is approximately 90 metres long and 38.70 metres wide.

The structural skeleton of Santa María del Mar, like Seville Cathedral, has spandrels (Figs. 23, 24) on the vault ribs in the two orthogonal directions that define the church layout, providing for a heavily braced and compact frame despite the sensation of weightlessness perceived from inside the church, since these spandrels are concealed inside the decked roof. In addition, in the case of Santa María del Mar, the structural skeleton, up to the crown of the vaults covering the chapels located between the interior buttresses, is reinforced by two further – albeit more slender – buttresses that divide each bay into three chapels or vaulted niches. Another feature enhancing church stability is the existence of walls – like triangular ribs – that extend above the buttresses and through the roof of the lateral naves almost to the height of the central nave. Furthermore, by contrast with Castilian cathedrals such as Burgos or Leon where the difference between nave heights, in keeping with the French model, is very large, in Santa María del Mar the lateral and central nave keystones are at essentially the same height.



Enjutas Interiores Santa María del Mar
Interior spandrels. Santa María del Mar
Fig. 24

In Santa María del Mar all the vaults are quatripartite fan vaults with no supplementary ribs; in the central nave the plans are 15.00-metre squares, measuring from centre-to-centre of the columns, whilst the lateral nave plans form 15.00 x 7.50-metre rectangles, likewise from centre-to-centre of the columns. The vaults over the niches or chapels between buttresses are also quatripartite, whilst the ones in the ambulatory are hexagonal with radial ribs fanning out from the main keystone.

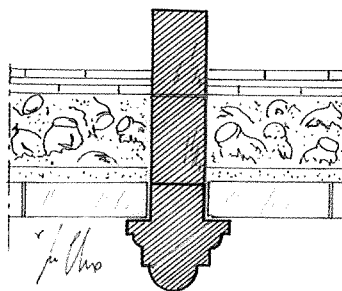
The central and lateral nave vaults were the ones analysed for the present study. The analysis began with a drawing of their geometry based on the data taken *in situ* and from the literature. The central nave is formed of square plan fan vaults with ogive formerets and transverse arches; only the diagonal arches are semicircular.

In this case – unlike Seville Cathedral – the “component configuration” of the vault extrados could not be verified personally by the author, nor were any graphic documents found in the literature showing its construction details. Consequently, the study is based on the data that could be gathered during different visits to the church and the experience described by Buenaventura Bassegoda Musté⁽⁸⁾, a member of the team of architects commissioned by the Santa María del Mar Basilica Works Board in the nineteen fifties to study the structural significance of certain cracks that had appeared in the severies in the second vault in the central nave. Bassegoda reports that for their own peace of mind, the team ordered a borehole to be drilled from the roof deck to determine “the component configuration of the vault extrados”. The attached construction detail is taken from the description of the successive layers found in the sample core. The severy had a concrete covering, capped in turn by a stratum of hollow earthenware incrustated in mortar – the “enjarrado”; the next stratum was a layer of plain lime mortar of variable thickness to slope the roof, topped off by present floor of the decked roof, consisting of raised wood plank surfacing (Fig. 25). The formeret in the central nave vault is spandrelled and springs from the tympanum of another spandrelled ogive arch located inside the church, which both conveys greater stiffness to the structure and guides the eye downward. Sunlight beams into the central nave through the tracery-adorned oculus in this tympanum, an element often used in Catalan Gothic architecture; one prominent example can be found in Girona Cathedral.

Las bóvedas de las naves de Santa María del Mar son en su totalidad de crucería cuatrimpartitas sin nervaduras complementarias, las de la nave central cubren plantas cuadradas de 15,00 metros –a ejes de pilares–, y las laterales cubren plantas rectangulares de 15,00 x 7,50 metros –a ejes de pilares. También las bóvedas de las hornacinas o capillas entre contrafuertes interiores son cuatrimpartitas, siendo las de la girola de planta hexagonal con nervaduras radiales desde la clave central.

Las bóvedas que he analizado son las de la nave central y las de las naves laterales, empezando por dibujar su geometría en base a los datos que pude toma in situ así como a las publicaciones encontradas. La nave central esta cubierta por bóvedas de crucería de planta cuadrada, las nervaduras formeras y fajonas son apuntadas siendo de medio punto tan solo las diagonales.

En este caso – al contrario que en la Catedral de Sevilla- no he podido comprobar personalmente la “configuración constructiva” del extradós de las bóvedas, ni tampoco he encontrado documentos gráficos que recojan a modo de detalles constructivos dicha configuración, por ello me he basado en los datos que pude recoger en las diferentes visitas que realicé a la iglesia así como en la experiencia que describe Buenaventura Bassegoda Musté⁽⁸⁾, quien en la década de los años cuarenta del pasado siglo XX formó parte del equipo de arquitectos a quienes la Junta de la Obra de la Basílica de Santa María del Mar encargó el estudio de la trascendencia estructural de unas grietas aparecidas en el plemento de la segunda bóveda de la nave central. Bassegoda describe como para quedarse tranquilos mandaron ejecutar una cala desde la azotea de cubierta para conocer “la configuración constructiva del extradós de la bóveda”, siguiendo la descripción de las sucesivas capas que encontraron en aquella cala, he realizado el detalle constructivo adjunto. Encontraron sobre el plemento una capa de calcina, sobre esta un relleno de alfarería hueca englobada en argamasa – el enjarrado -, sobre este una capa más de mortero de cal para formar las pendientes y finalmente el tablero tabicado de la azotea. (Fig. 25). El formero de la bóveda de la nave central esta enjutado y a su vez apoyado en otro tímpano ubicado en el interior de la iglesia – arco apuntado enjutado – que aporta mayor rigidez a la vez que enmarca la visión a una cota inferior, calando el tímpano mediante óculo de tracería que permite el paso de la luz hacia la nave central. Este elemento es muy utilizado en la arquitectura gótica catalana, encontrándose entre otras en la catedral de Girona.

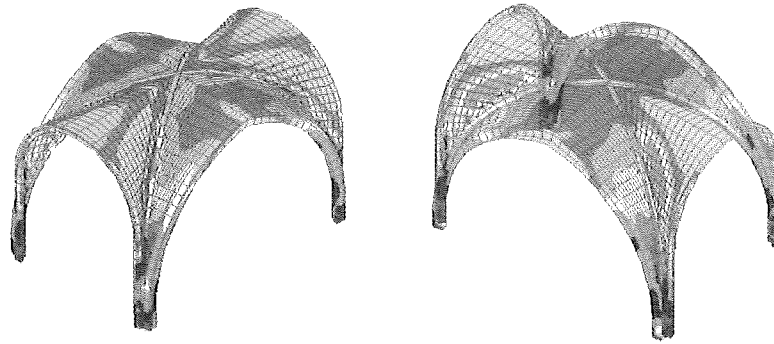


Sección constructiva Bóveda Santa María del Mar
Cross-section for construction, vault in Santa María del Mar
Fig. 25

3. PLAN DE ENSAYOS: MORTEROS Y FABRICAS

Las escasas experiencias realizadas hasta fecha sobre el comportamiento mecánico y fisico-químico de las fábricas pétreas medievales determinaron la necesidad de desarrollar un Plan de Ensayos en el Laboratorio Central de INTEMAC para poder establecer rangos posibles de variabilidad de los parámetros fundamentales que intervienen en la ESTABILIDAD de la Catedral, como la deformabilidad de sus fábricas, de la cual depende la capacidad de adaptabilidad de sus formas geométricas y así de su línea de empujes.

Por otra parte, el estado actual de deterioro de las fábricas pétreas de nuestras Catedrales es cada vez más patente⁽⁹⁾ y hace necesario abandonar la tan repetida premisa de que las bajas sollicitaciones a las que están sometidas convierten en no determinante el “estado del material”. El proceso de deterioro de algunos tipos de piedra es muy lento y por ello es posible que falten varios siglos para que alguna Catedral pudiera fallar por resistencia de sus fábricas y no por estabilidad, pero no podemos olvidar que el deterioro del material también puede influir en gran medida, y de forma mucho más rápida, en la “deformación de su geometría” convirtiéndola en un mecanismo que se desplomaría sin aparente razón, tal y como lo hizo el Campanile de la Plaza de San Marcos de Venecia en 1.902.



MEF Bóveda Catedral de Burgos extradós e intradós
MEF. Vault extradós and intradós, Burgos Cathedral
Fig. 26

3. LABORATORY TEST PROGRAMME: MORTAR AND STONEMWORK

Very few experiments on the mechanical and physical-chemical performance of Medieval stonework had been conducted prior to the present survey. Consequently, a testing plan had to be developed in the INTEMAC Central Laboratory to establish the possible ranges of variability in the essential parameters involved, on the one hand, in cathedral stability and on the other in stonework deformability, which depends on the adaptability of the geometric forms and the line of thrust.

Moreover, the present state of deterioration of the stonework in Spanish cathedrals is becoming increasingly evident⁽⁹⁾ and necessitates a re-thinking of the generally accepted premise that the low levels of stress to which they are subject render the "state of the material" irrelevant. The deterioration of some types of stone is a very slow process and for that reason it may still take several centuries for any of the cathedrals to fail due to the insufficient strength of their materials rather than for reasons of stability. But sight should not be lost of the fact that material deterioration may also have a significant and much swifter effect than "*geometrical deformation*", and could become a mechanism able to trigger an apparently inexplicable collapse, such as in the case of the St Marcos Square bell tower in Venice in 1902.

For all the foregoing, a test programme was developed at the INTEMAC Central Laboratory with mortars, cut stone and stonework samples, after reproducing, to a reasonably acceptable degree, the characteristics of the original Medieval materials. The following parameters were determined, which address not only the materials in the stonework samples but also the stresses to which they are subject in view of the different component configurations in their structural members: vaults, arched buttresses, buttresses and columns.

1. Physical-chemical composition of the stone
2. Stone compression and tensile strength
3. Physical-chemical composition of the mortar
4. Mortar compression and tensile strength
5. Stonework compression strength by mortar joint thickness: dry bond, 1 cm, 2 cm and 3 cm
6. Stonework deformability by mortar joint thickness: dry bond, 1cm, 2 cm and 3 cm
7. Stonework shear strength by joint thickness: dry bond, 1 cm, 2 cm and 3 cm.

Since the enormous variety in Medieval stonework precludes the definition of characteristic parameters, strength or deformability, or, logically, any other physical-chemical or mechanical feature, the aim was to quantify possible ranges of variability for each of the parameters analysed.

STONE

Of all the types of stone used in Spanish cathedrals, the stone selected was the type used in Leon Cathedral (Boñar quarry), a limestone of medium mechanical strength; it is neither as hard as the granite in Tuy Cathedral, for instance, nor as soft as the Seville Cathedral sandstone. The stone was tested to determine its physical-mechanical characteristics, applying the following procedures:

Por estas razones se desarrolló un Plan Experimental en el Laboratorio Central de INTEMAC analizando morteros, sillares y fábricas, una vez reproducidas unas razonables características de los supuestos materiales medievales primitivos. Se determinaron los siguientes parámetros, en función no solo de los materiales que intervienen en la formación de las fábricas pétreas, sino también del tipo de solicitaciones a las que están sometidas en base a las diferentes configuraciones constructivas de sus elementos estructurales: Bóveda, arbotante, contrafuerte y pilar.

- 1º. Composición Fisico-Química de la Piedra
- 2º. Resistencia de la Piedra a Compresión y a Tracción
- 3º. Composición Fisico-Química del Mortero
- 4º. Resistencia del Mortero a Compresión y a Tracción
- 5º. Resistencia de la Fábrica a Compresión - espesores de mortero en juntas: a hueso, 1 cm, 2 cm y 3 cm
- 6º. Deformabilidad de la Fábrica con espesores de mortero en sus juntas: a hueso, 1 cm, 2 cm y 3 cm
- 7º. Resistencia al Cizallamiento de la Fábrica con espesores de juntas: a hueso, 1 cm, 2 cm y 3 cm.

Ante la enorme heterogeneidad de las fábricas pétreas medievales en las que no es posible definir parámetros característicos ni de resistencia ni de deformabilidad, ni por supuesto de cualquier otro aspecto fisico-químico o mecánico, se pretendía cuantificar posibles rangos de variabilidad para cada uno de los parámetros analizados.

LA PIEDRA

De todos los tipos de piedras utilizadas en las catedrales españolas, se seleccionó la de León (cantera de Boñar) por corresponder a una caliza de resistencia mecánica media, no siendo ni de las piedras más duras como el granito de la catedral de Tuy, ni de las más blandas como la arenisca de la catedral de Sevilla. Las piedras se ensayaron para determinar sus características fisico-mecánicas, sometiéndolas:

- resistencia a flexión según UNE 22185
- resistencia a compresión según UNE 22186
- análisis mineralógico, mediante estudio microscópico del material en lámina delgada

Resistencia a Flexión según UNE 22185:

RESISTENCIA A FLEXIÓN (N/mm ²)	MUESTRA ENSAYADA ⁽¹⁾			
	A	B	C	D
Probeta 1	5,0	7,0	9,3	5,0
Probeta 2	4,7	8,3	9,0	5,8
Probeta 3	5,3	9,2	9,1	5,3
Módulo de rotura (valor medio) (N/mm²)	5,0	8,2	9,1	5,4

Resistencia a compresión según UNE 22186

<u>MUESTRA</u>	<u>RESISTENCIA A COMPRESIÓN N/mm²</u>
A.....	89,70
B.....	79,50
C.....	78,20
D.....	66,10

Análisis Mineralógico:

Todas las muestras de piedra analizadas correspondían a la clasificación de Dolomia, una roca de textura relativamente homogénea.

- flexural strength to Spanish standard UNE 22185
- compression strength to Spanish standard UNE 22186
- mineralogical analysis, via microscopic study of a thin layer of the material.

Flexural strength to UNE 22185:

FLEXURAL STRENGTH (N/mm ²)	SAMPLE TESTED ⁽¹⁾			
	A	B	C	D
Specimen 1	5.0	7.0	9.3	5.0
Specimen 2	4.7	8.3	9.0	5.8
Specimen 3	5.3	9.2	9.1	5.3
Modulus of rupture (mean value) (N/mm²)	5.0	8.2	9.1	5.4

Compression strength to UNE 22186

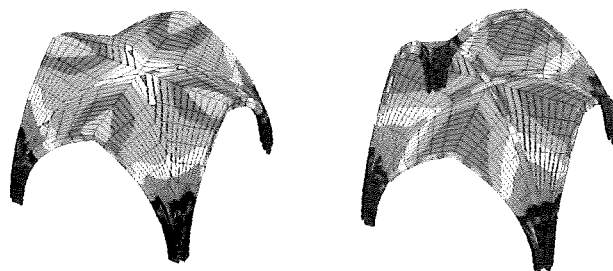
<u>SAMPLE</u>	<u>COMPRESSION STRENGTH N/mm²</u>
A.....	89.70
B.....	79.50
C.....	78.20
D.....	66.10

Mineralogical analysis:

All the stone samples analysed proved to be dolomite, a rock with a relatively uniform texture.

MORTAR

The major practical problem encountered in building stone samples similar to Medieval cathedral stonework was making a lime-based mortar with the same mechanical and physical-chemical characteristics as the ones used by the Gothic masters. Samples of mortar joints were taken for this purpose from Seville Cathedral, rather than the Leon temple. This decision was prompted by the existence of documentary evidence that whole areas of the former still had what were presumably the original Medieval joints with no apparent surface pointing, whereas in Leon Cathedral it is difficult to find such areas, in view of the constant repairs done throughout its history.



MEF Bóveda Santa María del Mar tensión principal de compresión: extradós e intradós
MEF. Main compression stress on Santa María del Mar vault: extradós a intradós

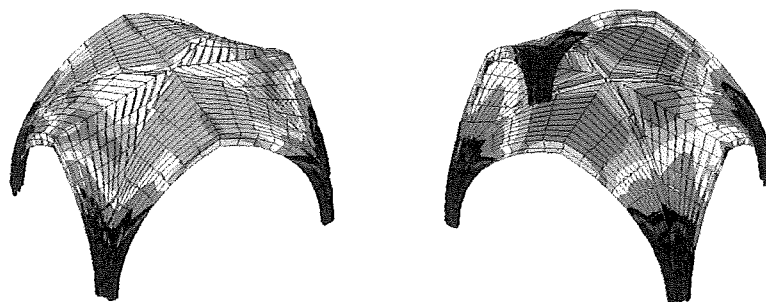
Fig. 27

MORTAR TESTING

The results obtained confirmed the existence of a greater proportion of lime than sand, contrary to lime mortars used today as set out in existing construction codes: rather than ratios of 1:1, the doses used have more sand than lime because modern lime is more highly hydrated and stronger than the extremely varied, questionably hydrated and unevenly grained Medieval material.

MORTERO

El mayor problema para poder construir fábricas pétreas semejantes a las medievales fue fabricar un tipo de mortero de cal que reuniera todas las características mecánicas y físico químicas de los utilizados por los maestros góticos. Por esta razón seleccioné la catedral de Sevilla, y no la de León, para la toma de muestras de su mortero de juntas, dada la constancia documental de zonas presumiblemente medievales en su totalidad y que no han sufrido rejuntados superficiales aparentes, mientras que en la de León es difícil poder contar con zonas donde el mortero de cal sea el primitivo dada la imparable secuencia de intervenciones sufridas a lo largo de su existencia.



MEF Bóveda Catedral de Sevilla tensión principal de compresión: extradós e intradós
MEF. Main compression stresses on Seville Cathedral vault: extrados and intrados
Fig. 28



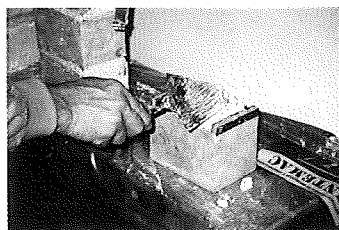
ENSAYOS DE MORTEROS

Los resultados obtenidos confirmaron la existencia de mayor proporción de cal que de arena, al contrario que en los morteros de cal empleados actualmente y recogidos en las normativas vigentes, en los cuales pasando de 1:1 las dosificaciones empleadas contienen mayor proporción de arena que de cal, debido a que las cales de hoy son más hidráulicas y resistentes que las medievales, extremadamente heterogéneas, de dudosa hidráulica y ausencia de uniformidad de grano.

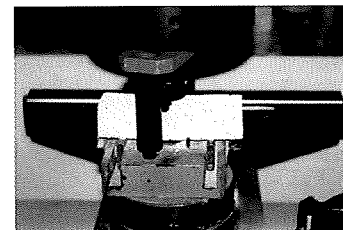
Se obtuvieron en el análisis las siguientes dosificaciones variables según las zonas: 2:1, 3:1 y 4:1, siendo la media de 3:1. Conocido el mortero de cal tipo 3:1, y las características presumibles características de la cal medieval; poco hidráulica, heterogénea y de grano no uniforme, se solicitó una cal de estas características, no existente en el mercado actual, para fabricar morteros 1:1, 1:2, 1:3, 2:1, 3:1 y 4:1 (Fig. 29) y ensayarlos a compresión (Fig. 31) para poder conocer las diferencias en el proceso de carbonatación y endurecimiento de cada uno de ellos, y poder seleccionar un tipo para la construcción de las fábricas con los sillares de la cantera de Boñar, en busca de la combinación de parámetros que mejor pueda reproducir el comportamiento mecánico de una fábrica medieval.



Fabricación probetas mortero
Manufacture of mortar specimens
Fig. 29



Fabricación fábricas pétreas
Manufacture of stonework samples
Fig. 30



Ensayo probetas mortero
Mortar compression test
Fig. 31

The doses found, depending on the area, were: 2:1, 3:1 and 4:1, the mean being 3:1. Once the properties of the 3:1 lime mortar and the presumed characteristics of Medieval lime – scantily hydrated, variable and of uneven grading - were ascertained, a lime of this nature, not available on today’s market, was ordered and 1:1, 1:2, 1:3, 2:1, 3:1 and 4:1 mortars were made (Fig. 29) for compression testing (Fig. 31). The aim was to determine the differences in carbonation and hardening between them and select a type with which to build samples with stone from the Boñar quarry, in other words, to select the combination of parameters best able to reproduce the mechanical strength of Medieval stonework.

In the absence of specific codes anywhere in the world for testing centuries-old mortars, 4x4x16-cm specimens were made in compliance with the present Spanish regulation on modern lime mortars to determine the compression strength of the various mortar types. Specimens were broken 32 days after pouring instead of the statutory 28 days to give the mix more time to air dry, to compensate for the scant hydration of the material.

Mortar	Compression strength (32 days)
1:1	9 kp/cm ²
1:2	8 kp/cm ²
1:3	8 kp/cm ²
2:1	7 kp/cm ²
3:1	5 kp/cm ²
4:1	4 kp/cm ²

The fact that smaller compression strengths are obtained for mortars with a higher lime content when all specimens are tested after the same curing and air drying time, means not that they are weaker but that they need more time to carbonate, since their hardened (carbonated) outer layer forms a crust less permeable to air than the surface exposed after the specimens are demoulded. The more lime there is in the mix, the longer the time needed for the mortar to harden and reach the strength corresponding to total carbonation. Robert Mark⁽¹⁰⁾ even sustains that, given the enormous thickness of some Medieval walls, the relative humidity, the differences in the inside and outside air, and the narrowness of the joints, some mortars in the inner reaches of their thick walls may still not have reached total carbonation even after several centuries, and therefore may still not have attained – nor will they ever attain - their full potential strength. Nonetheless, mortars made with a higher lime content can be stronger than when smaller quantities of lime are used, even when they are of low quality as in the case of Medieval walls and need to be aired for longer times.

Moreover, the strength values obtained with the specimens made with lime-sand ratios of 1:2 and 2:1 are practically the same as the values found for the immediately higher proportions, thereby confirming one of the reasons why existing codes specify a narrow range for lime mortar dosage, from 1:1 to 1:3, compared to 1:1 to 1:8 for cement mortar. Since “slenderness” is a basic factor for the strength of a mortar and its deformability, the fact that the maximum strength obtained is 9 kp/cm² (0.9 N/mm²) in 4 x 16-cm specimens does not mean that the same mortar, in 1-, 2- or 3-cm joints, would be incapable of remaining elastic under or transmitting loads of up to 80 kp/cm² (8 N/mm²).

CHOICE OF MORTAR

Based on the data obtained, the dimensions of the specimens used for the tests and the time lapsing before they broke (five months), a 1:1 lime mortar was chosen, made with the same “poor quality” lime as used for the specimens tested. This choice was made in an attempt to obtain results as similar as possible to what would be found if a very thick, nearly entirely carbonated Medieval stonework structure were tested several years after it was built. The results obtained were used to establish a possible correlation between the parameters thickness and time.

STONEWORK TESTING

Seven stonework samples were made (Figs. 30, 36), each of which consisted of three stones measuring 145 x 96 x 93 mm, 1:1 lime mortar and joint thicknesses of 5, 10 or 17 mm. Five months later two different types of rupture tests were conducted: simple compression (4 samples) and axial loading at 5°, 10° and 20° angles to the vertical plane of the segment (3 samples).

The compression tests were designed to determine the effect of joint thickness on sample performance, and the axial loading tests (Figs. 32) to determine the shift depending on the angle at which the load was applied (resultant of vault forces on the arched buttress).

Dada la inexistencia a nivel mundial de normativas específicas para ensayos de morteros antiguos, se fabricaron probetas de 4 x 4 x 16 cm aplicando la normativa española vigente de morteros de cal actual para la determinación de la resistencia a compresión de cada uno de los tipos de mortero, rompiéndolas a los 32 días en lugar de a los 28 prescritos en la norma por la escasa hidraulicidad de la mezcla, dándole así más tiempo a endurecer en contacto con el aire. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Mortero	Resistencia a Compresión (32 días)
1:1	9 kp/cm ²
1:2	8 kp/cm ²
1:3	8 kp/cm ²
2:1	7 kp/cm ²
3:1	5 kp/cm ²
4:1	4 kp/cm ²

El hecho de que se obtenga menor resistencia a compresión en los morteros con más cantidad de cal, ensayados después del mismo periodo de curado y endurecimiento al aire, no significa que sean menos resistentes sino que necesitan más tiempo para carbonatarse ya que la capa superficial endurecida (carbonatada) forma una costra menos permeable al aire que la superficie expuesta al desmoldar las probetas. Cuanta más cantidad de cal existe en la mezcla más tiempo necesita el mortero para endurecer y alcanzar así la resistencia correspondiente a la uniformidad total de carbonatación de la masa. Por esta razón comenta Robert Mark⁽¹⁰⁾ que existe incluso la posibilidad de que dados los grandes espesores de algunas fábricas medievales, la humedad relativa, la diferencia de aireación entre el interior y el exterior, y la estrechez de juntas, algunos morteros tal vez no han alcanzado todavía después de varios siglos la carbonatación total de su masa en el interior de los gruesos muros, no habiendo por tanto alcanzado la resistencia total que potencialmente puede alcanzar y que tal vez no llegará nunca a alcanzar. Sin embargo, con mayor cantidad de cal se pueden obtener morteros con mayores resistencias que con dosificaciones bajas en cal pese a que sean de mala calidad como es el caso de las medievales y pese a que por ello necesiten más tiempo de aireación.

Por otra parte, las resistencias obtenidas en las probetas realizadas con diferentes dosificaciones de cal, prácticamente se igualan a partir de las proporciones 1:2 y 2:1 con sus inmediatas superiores, confirmándose una de las razones por las cuales las normativas vigentes contemplan para morteros de cal un estrecho rango de dosificaciones de mezcla que van de 1:1 a 1:3, mientras que para morteros de cemento el rango aumenta de 1:1 a 1:8. Dado que la "esbeltez" en un mortero es un factor fundamental para su comportamiento resistente, así como para su capacidad de deformación, el hecho de que la resistencia máxima obtenida sea de 9 kp/cm² (0,9 N/mm²) en probetas de 4 x 16 cm, no significa que el mismo mortero en juntas de 1, 2 ó 3 cm no pueda transmitir cargas de hasta 80 kp/cm² (8 N/mm²), trabajando como una lámina elástica.

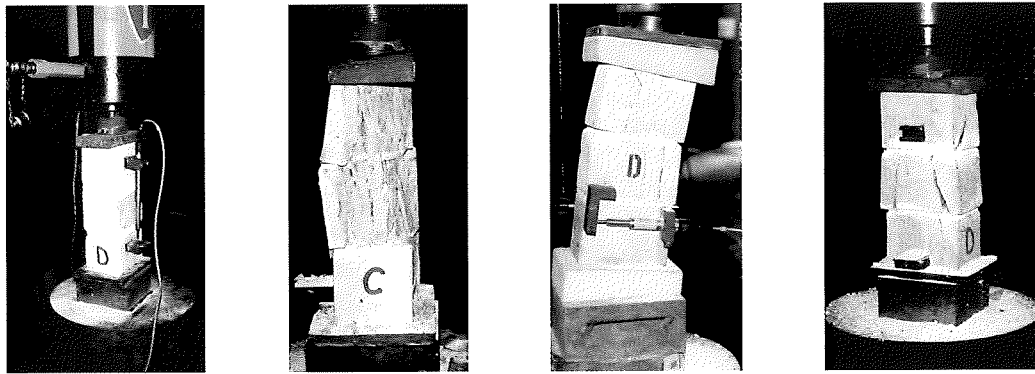
ELECCION DEL MORTERO

En base a los datos obtenidos, a las dimensiones de las probetas que podíamos construir para los ensayos y al tiempo que transcurriría hasta su rotura (cinco meses), se seleccionó un mortero de cal 1:1, fabricado con la misma cal de "mala calidad" utilizada en las probetas anteriormente ensayadas. Esta elección esta basada en obtener unos resultados lo más semejantes posibles a los que podríamos encontrar ensayando una fábrica medieval de gran espesor carbonatada en su casi totalidad una vez transcurridos varios años. Parámetros; espesor y tiempo entre los cuales se establece una posible correlación a la vista de los resultados obtenidos en las fábricas ensayadas.

ENSAYOS DE FABRICAS PETREAS

Se fabricaron 7 piezas de fábrica (Figs. 30, 36), cada una de ellas formadas por tres sillares de dimensiones 145 x 96 x 93 mm con mortero de cal 1:1 y espesores de junta 5, 10 y 17 mm. Transcurridos cinco meses se realizaron dos tipos diferentes de ensayos a rotura con las piezas de fábrica: compresión simple (4 piezas), y bajo carga axil a 5°,10° y 20° con el eje vertical de la pieza (3 piezas).

Con los ensayos a compresión simple se pretendía conocer la influencia del espesor de la junta en el comportamiento de la fábrica, y con los ensayos realizados bajo carga axil (**Fig.32**), determinar los desplazamientos en función del ángulo de aplicación de la carga(resultante de la bóveda sobre el arbotante).



Ensayos fábricas sometidas a compresión simple y carga axial a 5°, 10° y 20° con eje vertical de la pieza
 Masonry specimen testing. Compression and axial loading at 5°, 10° and 20° angles to the vertical plane of the specimen

Fig. 32

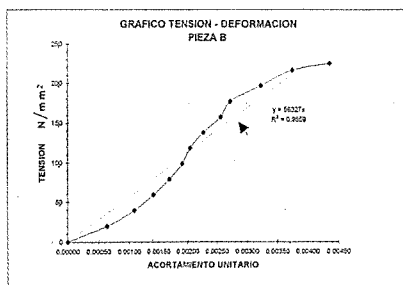


Gráfico Tensión Deformación
 (5,5 mm espesor junta)
 Stress strain curve
 (join thickness, 5.5 mm)
 Fig. 33

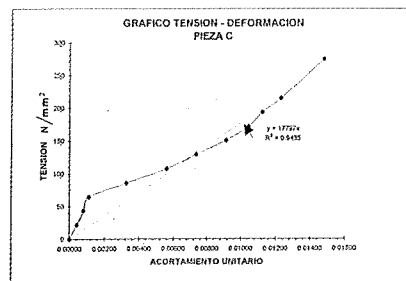


Gráfico Tensión Deformación
 (10,00 mm espesor junta)
 Stress strain curve
 (join thickness, 10.00 mm)
 Fig. 34

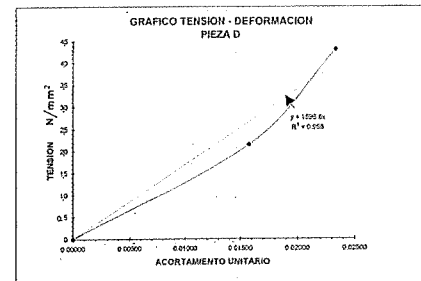
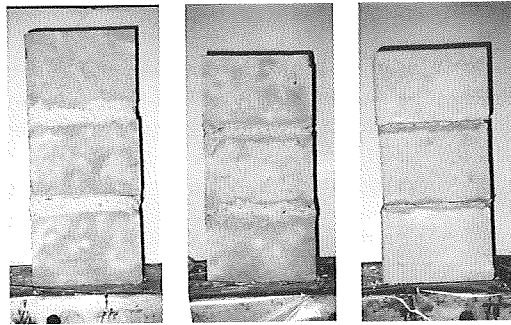


Gráfico Tensión Deformación
 (17,00 mm espesor junta)
 Stress strain curve
 (join thickness, 17.00 mm)
 Fig. 35

SAMPLES TESTED FOR SIMPLE COMPRESSION STRENGTH				
SAMPLE	AGE (days)	MEAN JOINT THICKNESS (mm)	BREAKING STRENGTH N/mm ²	MODULUS OF DEFORMATION N/mm ²
B	212	5.50	22.5	5,6.32.7
C	216	10.00	27.5	1,779.4
D	216	17.00	16.6	169.7
B'	331	11.00	28.9	2,900.6

SAMPLES TESTED FOR JOINT COMPRESSION AND TANGENTIAL STRENGTH						
SAMPLE	AGE days	MEAN JOINT THICKNESS	ANGLE AXIAL F. SAMPLE DIRECTRIX	ULT. SLIPP. ST N/mm ²		MAX STN/mm ² Compression
				Tangential	Normal	
A'	331	11.0	10°	1.8 (S & R)	10.0	22.9
C'	331	10.5	20°	2.3 (S)	6.2	25.3
D'	331	10.5	5°	1.3 (R)	14.5	



Fábricas de diferentes espesores de junta (5, 10 y 17 mm)
Masonry specimens with different thicknesses
Fig. 36

PIEZAS SOMETIDAS A COMPRESIÓN SIMPLE				
PIEZA	EDAD (días)	ESPEJOR MEDIO EN JUNTAS (mm)	TENSIÓN DE ROTURA N/mm ²	MODULO DE DEFORMACIÓN N/mm ²
B	212	5,50	22,5	5.632,7
C	216	10,00	27,5	1.779,4
D	216	17,00	16,6	169,7
B'	331	11,00	28,9	2.900,6

PIEZAS SOMETIDAS A COMPRESIÓN Y ESFUERZO TANGENCIAL EN JUNTA						
PIEZA	EDAD días	ESPEJOR MEDIO DE JUNTAS	ANGULO ESF. AXIL DIRECTRIZ PIEZA	T MAX. DESLIZAM. N/mm ²		T.MAX N/mm ² Compresión
				Tangencial	Normal	
A'	331	11,0	10°	1,8 (D y R)	10,0	22,9
C'	33	10,5	20°	2,3 (D)	6,2	25,3
D'	331	10,5	5°	1,3 (R)	14,5	

4. APORTACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS. TIPOS DE BOVEDAS

Aunque las fábricas ensayadas no eran medievales, la razonable simulación efectuada en el Laboratorio Central de INTEMAC me aportó datos suficientes para poder perfilar rangos posibles de variabilidad de los parámetros analizados; módulo de deformación y resistencia, así como posibles relaciones entre carga y deslizamiento en función de su ángulo de aplicación, y siempre contando con resultados aplicados a fábricas ejecutadas con diferentes espesores de morteros dada la importancia que a este aspecto le dieron los maestros medievales.

MODULO DE DEFORMACIÓN Y RESISTENCIA

La deformabilidad de la fábrica pétreo de las catedrales ha hecho posible su permanencia a lo largo de los siglos dado que las ha dotado de una especial capacidad de adaptación mediante deformación que les ha permitido ir encontrando en su deformada geometría estados de equilibrio y ESTABILIDAD. Pero este parámetro fundamental para analizar el comportamiento estructural de la catedral –la deformabilidad– es tan heterogéneo como la propia

4. RESULTS OBTAINED. VAULT TYPES

Although the samples tested were not Medieval stone structures, the reasonable simulation performed in the INTEMAC Central Laboratory furnished sufficient data to establish possible ranges of variability for the parameters analysed – modulus of deformation and strength – as well as any possible relationship between loading and slippage depending on the angle of application. Results were obtained in all instances from samples made with different mortar thicknesses, given the importance that the Medieval masters attached to this question.

MODULUS OF DEFORMATION AND STRENGTH

The deformability of the stonework in cathedrals is the reason for their endurance over the centuries, and underlies their ability to reach states of equilibrium and stability. But this parameter, deformability, so vital to the analysis of the structural performance of cathedrals, is as diverse as the stonework itself, which contains numerous types of stone, even when taken from the same quarry, and different types of mortar, even when made by the same masons using the same proportions, given the variability of Medieval lime⁽¹¹⁾.

Moreover, as the tests conducted in the INTEMAC Central Laboratory show, sample deformability depends enormously on joint thickness, which ultimately entails plotting the respective stress-strain curves at different scales. Sample B, for instance (Fig. 33), which had the thinnest joint tested – 5.5 mm – broke at a simple compression stress of 225 kp/cm² (22,5 N/mm²), for a modulus of elasticity of 56,327 kp/cm² (5,632.7 N/mm²), while sample D (Fig. 35) which had the thickest joint tested – 17.00 mm, broke at a simple compression stress of 166 kp/cm² (16.6 N/mm²), for a modulus of elasticity of 1,697 kp/cm². The performance of samples tested for compression and tangential stress at the joint also varied with joint thickness, in this case in conjunction with the axial force and angle to the sample directrix. At an angle of 10°, Sample A' with joint thickness of 11.0 mm, reached a tangential rupture or maximum slippage stress of 18 kp/cm² (1,8 N/mm²), a normal stress of 100 kp/cm² (10,00 N/mm²) and a maximum simple compression strength of 229 kp/cm² (22,9 N/mm²), whereas sample C', which had a 10.5-mm joint, reached a 20-degree angle tangential rupture or maximum slippage stress of 23 kp/cm² (2.3 N/mm²), a normal stress of 62 kp/cm² (6.2 N/mm²) and a maximum compression strength of 253 kp/cm².

This provides evidence of the enormous impact of joint thickness on stonework structure strength and deformability, and given the diversity of the stonework in Gothic cathedrals, it is obviously erroneous to assume the existence of a characteristic stonework strength - even if it were placed with dry bonds – due to the equally enormous rheological diversity of the stone itself. Nor may fixed modulus of elasticity values be used. These are considerations that must be taken into account in any structural analysis performed, applying sensitivity studies to the model by varying determinant parameters such as strength and deformability. The modulus of deformation of the wall declines as the thickness of the lime mortar joint increases, from 56,327 kp/cm² (for 5-mm joints) to 1,697 kp/cm² (17-mm joint). In view of these results, and irrespective of the values obtained, a "range of variability" can be established, since the ratio between the depth of the stones tested and the joint thicknesses was determined from the data gathered in the different cathedrals and structural members studied. The pre-established D/th ratios for the samples tested were: 100/5, 100/10 and 100/17. The modulus of deformation declines with the D/th ratio, from 56,327 kp/cm² to 1,697 kp/cm², because the depth of the stone (D) declines in comparison to the lime mortar thickness (th), making the sample more deformable. On the whole, the approximate ratios found in Spanish cathedrals were as follows:

STRUCTURAL MEMBER	D/th
Vault ribs	30 - 20
Columns	15 - 20
Vault severies	10

It would appear, as Viollet-Le-Duc notes, that Medieval masters built the stonework on the different cathedral structural members with different types of stone and joint thicknesses depending on needs in terms not only of strength, but also of "deformability" – adaptability, despite the fact that they were unaware of either of these concepts. Hence, the severies were built with relatively light stone elements – roughly cut, relatively thin ashlar (20 cm) - and very thick joints (2 to 3 cm), a component configuration that ensures light weight, and therefore less thrust, and high adaptability. Arched buttresses, columns and buttresses, on the contrary, were built with thicker, evenly cut dressed stone and thinner joints, although the joints in the lower parts of these members were thicker, an indication that Medieval masters were able to predict – although just how they could do so remains a mystery – that such joints would be compressed by the greater weight of the stonework on the lower courses.

fábrica en la que existen multitud de piedras diferentes incluso aunque procedan de la misma cantera, y diferentes tipos de morteros aunque estén ejecutados por las mismas manos y con las mismas mezclas dada la heterogeneidad de la cal medieval⁽¹¹⁾.

Por otra parte, tal y como demuestran los ensayos realizados en el Laboratorio Central de INTEMAC, la deformabilidad de las fábricas depende enormemente del espesor de juntas, que ha determinado incluso la necesidad de realizar los gráficos adjuntos de Tensión-Deformación a diferentes escalas. Así, la pieza B (Fig. 33) que corresponde al mínimo espesor de junta ensayada -5,5 mm- rompió a una tensión de compresión simple de 225 Kp/cm² (22,5 N/mm²), resultando un Módulo de Elasticidad de 56.327 Kp/cm² (5.632,7 N/mm²), mientras que la pieza D (Fig. 35) que corresponde al máximo espesor de junta ensayada -17,00 mm-, rompió a una tensión de compresión simple de 166 kp/cm² (16,6 N/mm²), resultando un Módulo de Elasticidad de 1.697 kp/cm². También las piezas sometidas a compresión y esfuerzo tangencial en la junta presentan comportamientos muy diferentes en función del espesor de junta, y en este caso unido al ángulo formado entre el esfuerzo axial y la directriz de la pieza. La pieza A' de espesor de juntas 11,0 mm y ángulo 10°, alcanzó una tensión de rotura tangencial o máxima hasta deslizamiento de 18 kp/cm² (1,8 N/mm²) y normal de 100 kp/cm² (10,00 N/mm²), resultando una resistencia máxima a compresión simple de 229 kp/cm² (22,9 N/mm²), mientras que la pieza C' con 10,5 mm de espesor de junta y 20° de ángulo, alcanzó una tensión de rotura tangencial o máxima hasta desplazamiento de 23 kp/cm² (2,3 N/mm²) y normal de 62 kp/cm² (6,2 N/mm²), resultando una resistencia máxima a compresión de 253 kp/cm².

Queda comprobada así la enorme influencia del espesor de junta en las fábricas pétreas frente a su respuesta resistente y de deformabilidad, y dada la heterogeneidad de las fábricas antiguas como la de las catedrales góticas, es patente que no solo no se puede considerar la existencia de una resistencia característica de la fábrica - incluso aunque estuviera colocada a hueso - por la también enorme heterogeneidad reológica de las piedras, sino que tampoco se pueden utilizar valores fijos para el Módulo de Elasticidad, siendo necesario tener presente este aspecto en cualquier análisis estructural que se realice, aplicando al modelo estudios de sensibilidad variando los parámetros determinantes como son resistencia y deformabilidad. A medida que se incrementa el espesor de la junta de mortero de cal el módulo de deformación de la fábrica disminuye, pasando de 56.327 Kp/cm² (espesor de junta de 5 mm) a 1.697 Kp/cm² (espesor de junta 17 mm). A la vista de los resultados, y con independencia de los valores obtenidos, se puede establecer un "rango de variabilidad", dado que la relación entre el canto de los sillares ensayados y los espesores de juntas establecidos los determiné en base a la toma de datos realizada en las diferentes catedrales y elementos estructurales analizados. Las relaciones (C/e) predeterminadas en las fábricas ensayadas son: 100/5, 100/10 y 100/17. A medida que disminuye esta relación C/e, se ha obtenido una disminución del módulo de deformación que pasa de 56.327 Kp/cm² a 1.697 Kp/cm² dado que disminuye el canto del sillar (C) en relación al espesor del mortero de cal (e), obteniéndose una fábrica más deformable. En general las relaciones aproximadas que encontré en las catedrales españolas fueron:

ELEMENTO ESTRUCTURAL	C/e
Nervadura de Bóvedas	30 a 20
Pilares	15 a 20
Plemento Bóvedas	10

Parece que los maestros medievales, tal y como señala Viollet-Le-Duc, construyeron las fábricas pétreas de los diferentes elementos estructurales de la catedral, con piedras y espesores de juntas diferentes en función de las necesidades, no solo de resistencia mecánica si no también de "deformabilidad" - adaptabilidad - pese a no conocer ninguno de estos conceptos. Así, los plementos los construyeron con piezas pétreas poco pesadas - sillarejos de labra tosca y poco espesor (20 cm) y juntas de mortero muy amplias (2 a 3 cm), configuración constructiva que proporciona poco peso -menor empuje- y gran posibilidad de adaptabilidad. Sin embargo los arbotantes, pilares y contrafuertes los construyeron con sillares perfectamente tallados de mayor espesor y con juntas menores, aunque en las partes bajas las juntas las ejecutaban mayores, previendo -no se sabe como- que el mayor peso de fábrica sobre las últimas hiladas comprimiría esta junta de mortero.

TIPOS DE BOVEDAS

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados en INTEMAC me sirvieron también para analizar la influencia de la "geometría" específica de cada Tipo de bóveda cuatripartita que detecté entre las catedrales góticas

TYPES OF VAULTS

The results obtained from the tests conducted at the INTEMAC facility also served to analyse the effect of the specific "geometry" of each type of quadripartite vault identified in Spanish Gothic cathedrals on the possible stress distribution in their severies. In this regard, account was taken of the results obtained by applying the FEM solid method, in which the modulus of deformation values found through testing were used, and conducting a parametric sensitivity study within the range of variability obtained, increased by up to 100-fold.

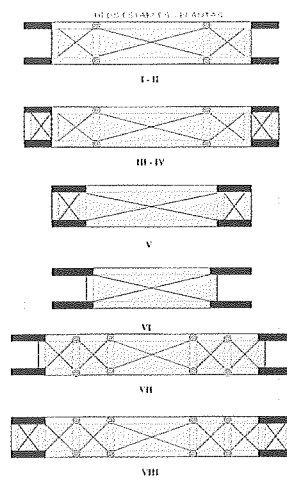
The findings show how Medieval vault geometry evolved, optimising not only stability but the state of stress as well. The semicircular formerets such as in Burgos Cathedral, which generate flexural tendencies in formeret severies (Fig. 26), gave way, in Seville Cathedral for instance (Fig. 28), to ogive arches in both formerets and transverse ribs, a geometric change that eliminated the flexural load. Furthermore, the double-bowed surfaces achieved by staggering the keystones of these arches across broader intervals afforded greater stiffness. Multiplying the modulus of deformation value taken in the parametric sensitivity analysis by 100 yields intriguing results: these show the beneficial effects of increased stiffness in the Burgos and Seville Cathedral vaults, where the stress state is optimised and the loads on the severies are clearly reduced, but confirm that practically no change is observed in the Santa María del Mar vaults (Fig. 27), very likely because of the absolute symmetry of their geometry, with square plans and substantial spandrels.

5. SPANISH GOTHIC CATHEDRALS: CLASSIFICATION BY STRUCTURAL TYPE

Despite its capital importance in the overall stability of the stone skeleton of cathedrals, the spandrel is a structural member that has not been taken into account to date in any structural analysis. In the present study, on the contrary, Spanish Gothic cathedrals are divided into two structural types on this basis: spandrelled and non-spandrelled.

In type A – non-spandrelled – temples, only the formerets and the transverse ribs of the transept and end naves are spandrelled, such as in Leon Cathedral, whereas in type B all the formerets and transverse ribs that support the vault are spandrelled. There are enormous differences between the two types in terms of overall stability (Fig. 39). Consequently, the structural classifications established to date on the grounds of number of naves, existence or otherwise of arched buttresses, etc., while addressing important properties, do not provide a complete and accurate description of the stable skeletons used by Spanish Medieval masters. Fully spandrelled cathedrals – type B – have a powerful orthogonal battery of walls in their skeleton, consisting of spandrels – sometimes concealed under flat roofs – able to absorb dynamic horizontal wind and seismic action, such as in the case of Seville Cathedral. Significantly, in the areas of Spain where seismic risk is highest – Andalusia and Catalonia – the cathedrals are spandrelled, whilst the Castilian cathedrals are not.

Indeed, this can be clearly seen by overlaying the sites of the major Spanish Gothic cathedrals on a current map of seismic hazards⁽¹²⁾ (Fig. 39). It may in fact be sustained that Spanish Gothic architecture was designed to obvious "seismic" criteria, with structural types varying widely by geographic area depending on seismic movements in the preceding centuries and the problems this posed in terms of cathedral stability. The historical data on the major earthquakes occurring in Medieval times suffice to understand the reasons for building spandrelled cathedrals in Seville, Barcelona or Santa María del Mar and non-spandrelled types in Burgos or Leon.



Tipos Estructurales Catedrales Góticas Españolas
Structural types, Spanish Gothic cathedrals
Fig. 37

españolas, en la posible distribución tensional de sus plementos, teniendo en cuenta los resultados obtenidos mediante la aplicación del MEF solid utilizando los valores del módulo de deformación cuantificados en los ensayos y realizando un estudio de sensibilidad paramétrica en dicho rango de variabilidad obtenido incrementado hasta 100 veces.

Los resultados obtenidos muestran como los maestros medievales evolucionaron la geometría de las bóvedas optimizando no solo su estabilidad sino también su estado tensional. Partiendo de bóvedas generadas sobre arcos formeros de medio punto como en el caso de la catedral de Burgos que generan una tendencia a la flexión en los plementos formeros (Fig. 26), cambiando la forma geométrica de sus arcos que como en el caso de la catedral de Sevilla (Fig. 28) los formeros son apuntados al igual que los fajones eliminándose así por cambio de geometría esta tendencia de flexión. Por otra parte incrementaron el decalaje de las claves de dichos arcos generando superficies de doble curvatura dotadas de mayor rigidez. El análisis paramétrico de sensibilidad a suponer un valor del módulo de deformación 100 veces superior arroja curiosos resultados demostrándose el beneficio de la rigidez al optimizarse el estado tensional que disminuye claramente en los plementos en el caso de bóvedas como las de Burgos y Sevilla y no significando apenas ningún cambio en el caso de las bóvedas de Santa María del Mar (Fig. 27) sin duda por la total simetría de la forma geométrica al desarrollarse esta sobre planta cuadrada y con importantes enjutas.

5. CATEDRALES GÓTICAS ESPAÑOLAS: CLASIFICACIÓN EN TIPOS ESTRUCTURALES

Existe un elemento estructural –la enjuta– no tenido en cuenta hasta la fecha en ningún análisis estructural, cuya importancia en la estabilidad del conjunto del esqueleto pétreo de la catedral divide claramente los Tipos Estructurales de las Catedrales Góticas Españolas en dos grandes grupos; no enjutas y enjutas.

En el Tipo A –no enjutas– tan solo están enjutas los arcos formeros y los fajones del crucero y naves extremas de la catedral, como es el caso de la catedral de León, mientras que en el Tipo B todos los arcos formeros y fajones sobre los que se desarrollan las bóvedas de la catedral están enjutas, existiendo una enorme diferencia entre ambos tipos frente a la estabilidad del conjunto (Fig. 39). Por ello, las clasificaciones estructurales realizadas hasta la fecha con base en el número de naves, existencia o no de arbotantes, etc..., aún contemplando aspectos importantes no definen de forma completa y precisa todos los tipos de esqueletos estables utilizados por los maestros medievales en España. Las catedrales totalmente enjutas –Tipo B– cuentan en su esqueleto con un potente entramado murario ortogonal formado por las enjutas –a veces oculto bajo las formaciones de sus cubiertas aterrazadas– capaz de absorber las acciones dinámicas horizontales de viento y sismo, como en el caso de la catedral de Sevilla. Es significativo que las zonas más sísmicas de España –Andalucía y Cataluña– cuentan con catedrales enjutas, mientras que Castilla no enjuto sus catedrales.

En efecto, he realizado la superposición de la localización de las principales catedrales góticas españolas sobre el mapa de peligrosidad sísmica actual⁽¹²⁾ (Fig. 39) y queda patente este hecho, pudiendo afirmarse que la arquitectura gótica española contó en su trazado con claros criterios de “racionalidad sísmica” construyendo tipos estructurales muy diferentes en cada zona geográfica en base a la experiencia acumulada por los maestros medievales sobre los problemas de estabilidad frente los movimientos sísmicos acaecidos siglos atrás. Los datos históricos sobre los principales movimientos sísmicos ocurridos en la época medieval son suficientes para entender las razones que motivaron a la construcción de catedrales enjutas como la de Sevilla, Barcelona o Santa María del Mar de las no enjutas como Burgos o León.

CIUDAD ZONA	CONSTRUCCIÓN CATEDRAL FECHA INICIO* (parte gótica)	SISMO	
		AÑO	GRADO
ANDALUCÍA	—	1.024 – 1.356	X - X
ALMERÍA	1.524	1.406 – 1.487 -1.522	VIII- IX - IX
GRANADA	1.507	1.431-1.526	X - VIII
SEVILLA	1.403*	1.464 – 1.504 -1.608	X-VIII - IX
MÁLAGA	1.528	1.494	IX
GERONA	1.312*	1.152 -1.427-1.448	VIII-VIII-IX
BARCELONA	1.298*	1.427 – 1.448	VIII - VIII
VALENCIA	1.262*		
DATOS: INSTITUTO ANDALUZ DE GEOFÍSICA Y PREVENCIÓN DE DESASTRES SÍSMICOS			

CITY AREA	CATHEDRAL CONSTRUCTION DATE STARTED *(Gothic portions)	EARTHQUAKE	
		YEAR	SEVERITY
ANDALUSIA	—————	1024 – 1356	X - X
ALMERIA	1524	1406 – 1487 -1522	VIII- IX - IX
GRANADA	1507	1431-1526	X - VIII
SEVILLE	1403*	1464 – 1504 -1608	X-VIII - IX
MALAGA	1528	1494	IX
GIRONA	1312*	1152 -1427-1448	VIII-VIII-IX
BARCELONA	1298*	1427 – 1448	VIII - VIII
VALENCIA	1262*		

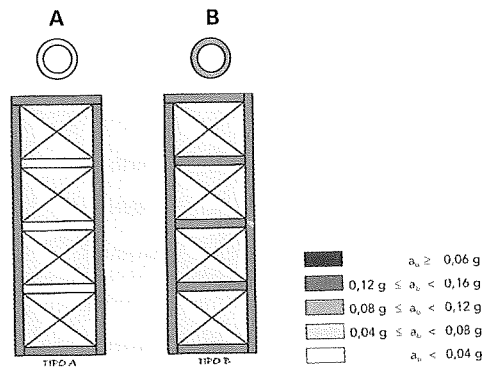
DATA: ANDALUSIAN INSTITUTE OF GEOPHYSICS AND EARTHQUAKE DISASTER PREVENTION

Once the stone skeletons of the cathedrals are classified as Type A or B on the basis of the extent to which they are spandrelled, the remaining characteristics and variables deemed necessary to fully determine the differential performance of Spanish Gothic cathedrals in terms of stability can be introduced. These characteristics and variables include: number of naves and relative heights, position of buttresses (exterior or interior) and the existence of (simple or multiple) arched buttresses and pinnacles. Generally speaking, type A cathedrals are observed to have pitched roofs over the vault extrados, whereas type B temples usually have flat roofs, a constructive adaptation introduced to attain the best seismic performance in cathedral structure and not in response to scant rainfall, as sustained by the prevailing explanation to date, or to the compositional reasons alleged by some historians⁽¹³⁾.

The eight different stability types identified as described above suffice to classify the stone skeletons of all Spanish Gothic cathedrals (Fig. 37): four types with A spandreling and four with B spandreling. It is nonetheless entirely possible that some of the lesser spandrelled or type A cathedrals have totally spandrelled lateral naves, as Viollet-Le-Duc shows in his countless drawings of French cathedrals such as Nôtre Dame in Paris or Amiens⁽¹⁴⁾.

The first variable introduced in the classification, after spandreling, is the number of naves and their relative heights, since this is an essential feature that clearly represents a difference in the approach to counteracting thrust and stabilising the various naves. If the keystones are essentially of the same height, such as in the case of Santa María del Mar Church, the thrust produced by the central nave vaults is partially counterbalanced by the lateral naves. When the naves are of different heights, such as in Leon, Burgos or Palma de Majorca Cathedrals, the thrust from the central nave is offset by flying buttresses and buttresses, such as in the French Nôtre Dame Cathedrals at Paris, Chartres, Reims o Amiens. The next variable introduced is the type of counteraction, in terms of the spatial positioning of the buttresses with respect to the cathedral, a question not analysed to date and which indisputably is of great relevance as far as stability is concerned: interior buttresses, which provide for stiffer stone skeletons, are generally found in conjunction with maximum spandreling or type B cathedrals, designed for areas where earthquake risk is higher. For this reason the Gothic cathedrals built in Catalonia and Andalusia (Seville, Barcelona, Santa María del Mar, Abadía de la Real, San Justo y Pastor, Santa María del Pi, Sant Pere and San Juan Bautista) generally have interior buttresses whilst in Castile and Galicia (Tuy, Cuenca, Burgos, León, Avila, Zamora and Ciudad Rodrigo) the buttresses are usually exterior.

TIPÓS ENJUTAMIENTO



Tipos de Enjutamiento. Nave Central
Types of "spandreling". Central nave
Fig. 38

Una vez clasificados los esqueletos pétreos de las catedrales en los Tipos A y B en función de su grado de enjutamiento, he introducido en ambos las restantes características y variables que considero que determinan de forma completa los comportamientos estables diferentes existentes en las catedrales góticas españolas como son; número de naves y su relación de altura entre ellas, posición de los contrafuertes (exteriores o interiores), y la existencia de arbotantes (simples o múltiples) y pináculos. También he observado y reseñado el hecho de que en general las catedrales cuyo grado de enjutamiento es Tipo A cuentan con cubierta inclinada sobre el extradós de las bóvedas, mientras que las del Tipo B suelen contar con cubiertas aterrazadas, hecho que responde a una adecuación constructiva para conseguir un mejor comportamiento estructural del conjunto de la catedral frente a fuertes movimientos sísmicos, y no a la escasez de lluvia por condicionantes climáticos como se ha interpretado hasta la fecha ni a razones compositivas aludidas por algunos historiadores⁽¹³⁾.

Como resultado, he detectado 8 Tipos estables diferentes en los esqueletos pétreos de la totalidad de las catedrales góticas españolas (**Fig.37**): Cuatro tipos de grado de enjutamiento A y cuatro tipos del grado de enjutamiento B. En el grado de enjutamiento menor – Tipo A – existe sin duda la posibilidad de que muchas de las catedrales pertenecientes a este Tipo cuenten sin embargo con enjutamiento total en las naves laterales tal y como Viollet-Le-Duc recoge en sus innumerables dibujos de catedrales francesas como en Notre Dame de Paris o Amiens⁽¹⁴⁾.

La primera variable introducida en la clasificación tras el grado de enjutamiento es el número de naves y la relación de alturas entre ellas, ya que es un aspecto fundamental que claramente representa una diferente forma de contrarresto de empujes y comportamiento estable entre las diferentes naves, si estas alcanzan la misma altura de claves como en el caso de la iglesia de Santa María del Mar, los empujes procedentes de las bóvedas de las naves centrales quedan en parte contrarrestados por los de las naves laterales, mientras que cuando las naves son de diferente altura, como en las catedrales de León, Burgos o Palma de Mallorca, los empujes procedentes de la nave central se contrarrestan mediante arbotantes y contrafuertes al igual que en las catedrales francesas de Notre Dame de Paris, Chartres, Reims o Amiens. La siguiente variable que he introducido es el tipo de contrarresto resaltando la posición espacial de los contrafuertes respecto de la catedral, aspecto no analizado hasta la fecha y que sin duda es de gran relevancia en cuanto al tipo estable se refiere, ya que cuando los contrafuertes son interiores se establece una mayor rigidez en el esqueleto pétreo de la catedral, coincidiendo este hecho en general con las catedrales con grado máximo de enjutamiento Tipo B, donde la sismicidad es mayor. Por esta razón las iglesias y catedrales góticas construidas en Cataluña y Andalucía cuentan en general con contrafuertes interiores; Sevilla, Barcelona, Santa María del Mar, Abadía de la Real, San Justo y Pastor, Santa María del Pi, Sant Pere, San Juan Bautista, mientras que en la zona de Castilla y Galicia los contrafuertes se sitúan generalmente al exterior de la catedral como en Tuy, Cuenca, Burgos, León, Avila, Zamora o Ciudad Rodrigo.

SPANISH GOTHIC CATHEDRALS STRUCTURAL TYPES				
SPANDRELING	TYPE	No. NAVES	R. HEIGHT	COUNTERBALANCING SYSTEM
SPANDRELED FORMERETS A SLOPED ROOF	I	1	—	IB – NOT ARCHED
	II	3	hHh	EB – ARCHED
	III	3	HHH	IB – NOT ARCHED*
	IV	5	hhHhh	IB – ARCHED
SPANDRELED FORMERETS & TRSVRSE B FLAT ROOF	I	1	—	IB – NOT ARCHED
	II	3	HHH	IB – NOT ARCHED
	III	3	hHh	IB – NOT ARCHED
	IV	5	hhHhh	IB – ARCHED

IB – Interior buttresses (niched chapels)

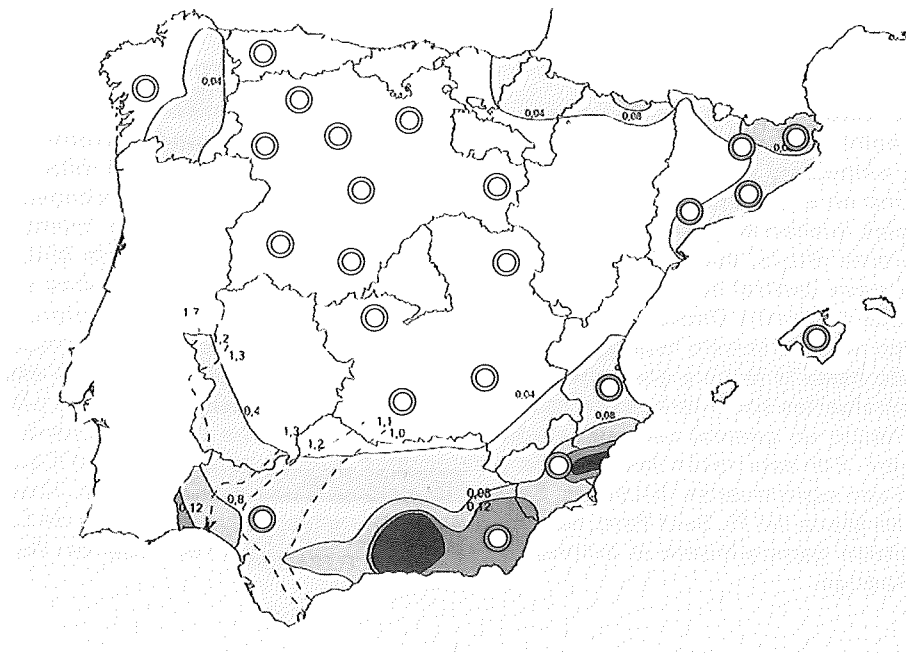
EB – Exterior buttresses

hHh – Three naves, central higher

HHH – Three naves, same height

• There are some with arched buttresses

A look at the recently published integrated European seismic hazards map⁽¹⁵⁾ shows that the low likelihood of earthquakes in France and most of the rest of Europe enabled the Medieval masters to build cathedrals with much less spandreling than in Spain or Italy; consequently the most widely extended stability model was the pattern found in French Gothic cathedrals from the classic period, i.e., the twelfth and thirteenth centuries, at Chartres, Reims or Amiens, followed by type A II, used in areas of Spain where seismic risk is low, such as Castile and Galicia, in the cathedrals at Burgos, León, Cuenca, Tuy, Avila, Zamora, and Ciudad Rodrigo, among others. These temples all have three naves of different heights, double arched buttresses to channel the thrust from vaults, roof and wind, exterior buttresses and sloped roofs built on highly pitched wooden trusses to cover the vaults. The lateral naves are sited between the columns delimiting the central nave and the inner-most face of the exterior buttresses, which extend beyond the perimeter of the cathedral. Therefore, any two consecutive buttresses are braced against one another, on one of their sides, from the height of the vault springing line to the floor via the longitudinal walls between them (and under the stained glass windows); this arrangement also shortens the possible sag length of such walls and of the central nave columns on which the lateral vaults also rest.



Ubicación de catedrales Tipo A y Tipo B sobre el Mapa de España de peligrosidad sísmica. (NCSE-02)
Sites of type A and B cathedrals and seismic hazard in Spain. (NCSE-02)

Fig. 39

CATEDRALES GÓTICAS ESPAÑOLAS TIPOS ESTRUCTURALES					
GRADO ENJUTAMIENTO	TIPO	Nº NAVES	R. ALTURA	SISTEMA DE CONTRARRESTO	
A	ENJUTAS FORMERAS	I	1	—	CI - NO ARBOTANTES
		II	3	hHh	CE - ARBOTANTES
		III	3	HHH	CI - NO ARBOTANTES*
	CUBIERTA INCLINADA	IV	5	hhHhh	CI - ARBOTANTES
B	ENJUTAS FORMERAS	I	1	—	CI - NO ARBOTANTES
	Y FAJONAS	II	3	HHH	CI - NO ARBOTANTES
		III	3	hHh	CI - NO ARBOTANTES
	CUBIERTA ATERRAZADA	IV	5	hhHhh	CI - ARBOTANTES

CI – Contrafuertes Interiores (existencia de capillas hornacina)

hHh – Tres naves de mayor altura la central

- Existen algunos casos con arbotantes

CE – Contrafuertes Exteriores

HHH – Tres naves a la misma altura

La observación del Mapa Europeo integrado sobre peligrosidad sísmica recientemente publicado⁽¹⁵⁾ demuestra como el bajo grado de sismicidad de Francia y de la mayor parte del resto de Europa permitió sin duda a los maestros medievales construir sus catedrales con grados de enjuntamiento mucho menores a los de España o Italia, por ello en general el tipo estable de esqueleto más extendido fue el patrón francés del periodo clásico correspondiente a los siglos XII y XIII como los de Chartres, Reims o Amiens, que responden al Tipo A II, utilizado en España en las zonas de más baja sismicidad como Castilla y Galicia, en las catedrales de Burgos, León, Cuenca, Tuy, Avila, Zamora, y Ciudad Rodrigo entre otras. Este Tipo cuenta con tres naves de diferente altura, dobles arbotantes para canalizar empujes de bóvedas, cubierta y viento, contrafuertes exteriores y cubierta inclinada sobre las bóvedas ejecutada sobre cerchas de madera de pronunciada pendiente. Las naves laterales se ubican entre los pilares que delimitan la nave central y el inicio del canto de los contrafuertes exteriores que sobresalen del perímetro de la catedral, de esta forma se arriostran en uno de sus bordes dos contrafuertes consecutivos entre sí desde la cota de apoyo del nacimiento de la bóveda hasta el nivel de suelo, mediante muros longitudinales bajo las vidrieras, acortando la longitud posible de pandeo de estos al igual que la de los pilares de la nave central en los cuales también apoyan dichas bóvedas laterales.

Sin embargo los maestros medievales se vieron obligados a cambiar el tipo de esqueleto estable en las zonas de más alta sismicidad, por ello los tipos estables Tipo B construidos en la España medieval responden a una clara racionalidad sísmica y se caracterizan por generar una edificación compacta a modo de caja cerrada con costillas con gruesas interiores, sin cuerpos salientes como alas, sin esbeltas cubiertas inclinadas, eliminando así la existencia de elementos que perturbarían la estabilidad del conjunto de la catedral frente a sismo. Por ello es frecuente encontrar iglesias y catedrales del Tipo B I, de una sola nave, sin arbotantes con estribos interiores y cubiertas generalmente aterrazadas o de muy escasa pendiente como Santa María del Pi, San Justo y Pastor, Abadía de la Real, Sant Francés, San Pere, San Juan Bautista o la propia catedral de Gerona. Pero cuando en estas mismas zonas sísmicas de España la catedral se construye con tres naves (Tipos B II y B III) estas suelen contar con la misma altura como en la iglesia de Santa María del Mar o con escaso decalaje entre sus claves como en el caso de la catedral de Barcelona.

En estos tipos estructurales, los contrafuertes interiores incrementan la rigidez y compacidad del esqueleto pétreo de la catedral frente a fuerzas dinámicas producidas por sismos, ya que entre ellos se construyen capillas y las nervaduras fajonas de las bóvedas de crucería que las cubren apoyan por completo en los contrafuertes como es el caso de la catedral de Palma de Mallorca o la iglesia de Santa María del Mar. Las bóvedas de estas capillas aportan un incremento de peso estabilizador en los contrafuertes, además de servir de importantes diafragmas de arriostramiento longitudinal de la catedral. En el caso de Santa María del Mar existen tres capillas por cada crujía de nave central multiplicándose así los contrafuertes interiores.

El Tipo B IV tiene una sola catedral como representante – la catedral de Sevilla – la mayor catedral gótica construida. Cuenta con cinco naves siendo de la misma altura las cuatro laterales, los contrafuertes son interiores y están arriostrados por capillas, siendo su cubierta aterrazada. Las enjuntas forman un entramado murario ortogonal

Nonetheless, the Medieval masters found that they had to change the aforementioned type of skeleton in areas of greater seismic risk; hence, the type B cathedrals built in Medieval Spain are clearly designed to seismic rationale and characterised by a compact edifice in the form of a closed box with thick interior ribs, and no protruding bodies such as wings or slender sloped roofs – in short, eliminating any elements that would have an adverse effect on the stability of the structure as a whole in the event of an earthquake. This is why type BI churches and cathedrals, with only one nave, no arched buttresses, interior piers and usually flat or only slightly sloped roofs are so common in such areas: examples are Santa María del Pi, San Justo y Pastor, Abadía de la Real, Sant Francés, San Pere, San Juan Bautista or even Girona Cathedral. But when cathedrals in these same seismic risk areas of Spain have three naves (types BII and BIII), the three are usually of essentially the same height such, as in Santa María del Mar, or with only a very slight difference in elevation between their keystones, such as in Barcelona Cathedral.

The interior buttresses in these cathedrals make their stone skeletons stiffer and more compact, or in other words, better able to resist the dynamic forces produced by earthquakes, because they house chapels between them and because the transverse ribs of the fan vaults that cover them rest entirely on the buttresses, such as at Palma de Majorca Cathedral or Santa María del Mar. The vaults in these chapels add stabilising weight to the buttresses in addition to acting as powerful longitudinal braces for the cathedral. In Santa María del Mar there are three chapels per central nave bay, thereby increasing the number of interior buttresses.

There is only one type BIV cathedral – the temple at Seville – the largest Gothic cathedral ever built. Its four lateral naves are all of the same height, its buttresses are interior and braced by chapels and its roof is flat. The spandrels form an orthogonal network of walls “concealed” over the vault extrados in the decked roof and topped off by a family of double arched buttresses, whereby all the naves are braced against one another. Indeed, the stone skeleton of Seville Cathedral differs from the model assumed to date, a circumstances that necessarily calls any structural stability survey conducted previously into question. The fact that the arches that constitute the transverse ribs and formerets are not free-standing arches stabilised with fillers on their extrados, but spandrelled arches (2.80 metres along the haunches and 0.60 metres over the keystone), is evidence that this cathedral has a very different type of stability model, which would explain the meaning of the two families of arched buttresses running in the two perpendicular directions defined by the spandrels or arch walls. These arched buttresses, then, long criticised by conventional wisdom as being “unnecessary” for their very horizontal design, clearly provide spatial continuity for the stone skeleton bracing as a whole, which is orthogonally bonded in these same two directions at an intermediate elevation between the lateral nave and central nave spandrels, all of which contributes to decreasing pier slenderness.

Not only did the Medieval masters move the buttresses outside the structure, creating arched buttresses to carry the thrust from the vaults and the wind to them, but they also removed the “battery of walls” that constitutes a substantial part of the stable structure of cathedrals from the interior as well, cleverly concealing it above the vault extrados. In the spandrelled arches used in many rural pre-Romanesque churches such as Santa María de Noya, the spandrels are visible in the church interior; the Gothic masters, however, concealed them over the extrados of vaults. They rested these vaults directly on spandrelled ribs which, although made to look like free-standing arches, actually enhanced the stability of the stone structure as a whole.

This change in the early stone skeletal form of Gothic cathedrals, clearly motivated by seismic concerns, disappeared in many cases under the influence of the Renaissance and later styles deployed in the refurbishment, enlargement or restoration of the initial Gothic cathedrals. The attachment of new structures – chapels, cloisters and towers - may, in cathedrals located in low seismic risk areas such as Burgos – the type A cathedrals – be of lesser importance from the standpoint of possible earthquake damage, but in structures like Seville Cathedral or others sited in Catalonia or Andalusia – the type B cathedrals – such additions indubitably compromise their stability due to the possible vibratory differences in the attached bodies in the event of a strong earthquake.

6. CONCLUSIONS

GOTHIC SKELETON STRUCTURAL TYPES – SEISMIC RATIONALE

Spanish Gothic cathedrals can be typed along structural lines that had never been analysed before, yet whose importance clearly divides these monuments into two large groups, depending on whether their skeletons are spandrelled or non-spandrelled.

The classifications established to date based on the number of naves, existence or otherwise of arched buttresses and so on, while addressing important issues, do not fully and accurately define all the types of stability models used by Medieval masters in Spain.

“oculto” en el extradós de las bóvedas bajo las terrazas rematado con una familia de arbotantes dobles, de tal forma que todas las naves están arriostradas entre sí. En efecto, el esqueleto pétreo de la catedral de Sevilla no corresponde al supuesto hasta la fecha, hecho que invalida cualquier estudio de estabilidad estructural realizado. La realidad existente de que los arcos que constituyen las nervaduras fajonas y formeras no sean arcos exentos estabilizados con rellenos en su extradós, sino arcos enjutados (2,80 metros en hombros de bóveda y 0,60 metros en clave) determina para esta catedral un tipo estructural estable muy diferente, que viene a explicar el sentido de las dos familias de arbotantes existentes en las dos mismas direcciones perpendiculares que se desarrollan las enjutas o muros de los arcos. De esta forma los arbotantes, que por gran horizontalidad de trazado han sido criticados como “innecesarios”, cumplen además la clara función de dar continuidad espacial al arriostramiento del conjunto del esqueleto pétreo de la catedral, que sigue una ley de traba ortogonal en esas mismas dos direcciones a una cota intermedia entre las enjutas de las naves laterales y la nave central disminuyendo la esbeltez de los estribos.

Los maestros medievales no solo sacaron al exterior los contrafuertes y crearon arbotantes para llevar hasta ellos el empuje de las bóvedas y del viento, sino que también sacaron del interior de la catedral “el entramado murario” que constituye una parte importante de su estructura estable, y que ingeniosamente queda oculto sobre la cota de extradós de clave de las bóvedas. Los arcos enjutados utilizados en multitud de iglesias rurales pre-románicas como la de Santa María de Noya, mostraban en su interior los tímpanos y manguardias de los arcos, sin embargo, los maestros medievales ocultaron las enjutas en el extradós de las bóvedas recibidas directamente sobre los arcos como si se tratara de arcos exentos, contando sin embargo con la importante ventaja estructural de este tipo de arcos frente a la estabilidad del conjunto pétreo.

Sin duda la transformación de la forma primitiva del esqueleto pétreo de las Catedrales Góticas, que sin duda respondía a una clara racionalidad sísmica, desapareció en muchos casos en manos del Renacimiento y posteriores estilos, reformaron, ampliaron y restauraron las primitivas catedrales góticas, construyendo cuerpos adosados, nuevas capillas anexas, claustros, y torres, que en el caso de las catedrales situadas en zonas de bajo grado de sismicidad – Tipos A - como es el caso de la Catedral de Burgos puede tener una menor trascendencia desde el punto de vista de posibles sismos pero que el caso de las catedrales ubicadas en Cataluña y Andalucía – Tipos B - como es el caso de la Catedral de Sevilla sin duda puede comprometer en mayor grado su estabilidad por las posibles diferencias vibratorias de los diferentes cuerpos adosados en caso de un fuerte sismo.

6. CONCLUSIONES

TIPOS ESTRUCTURALES DE ESQUELETOS GÓTICOS – RACIONALIDAD SÍSMICA

Existe un Tipo Estructural de Catedral Gótica Española que no había sido analizado nunca, y cuya importancia divide claramente nuestras catedrales en dos grandes tipos de esqueletos estables góticos; enjutados y no enjutados.

Las clasificaciones realizadas hasta fecha con base en el número de naves, existencia o no de arbotantes, etc..., aún contemplando aspectos importantes no definen de forma completa y precisa todos los tipos de esqueletos estables utilizados por los maestros medievales en España.

Las catedrales enjutas cuentan en su esqueleto con un potente entramado murario ortogonal – a veces oculto bajo las formaciones de sus cubiertas aterrazadas – capaz de absorber las acciones dinámicas horizontales de viento y sismo. Es significativo que las zonas más sísmicas de España – Andalucía y Cataluña - cuentan con catedrales enjutas, mientras que Castilla no enjuto sus catedrales.

LA FORMA GEOMÉTRICA DE LAS BÓVEDAS

Los maestros medievales optimizaron la forma geométrica de las bóvedas de crucería. Partieron de arcos fajones apuntados y formeros de medio punto sin apenas decalaje de las claves - catedral de Burgos-, y terminaron apuntando todas las nervaduras y decalando las claves de tal forma que generaron plementos de doble curvatura – catedral de Sevilla – Este cambio de forma optimizó la estabilidad y el estado tensional de la bóveda, ya que incrementó enormemente su rigidez frente a estabilidad, y se redujeron los esfuerzos de flexión que, aunque pequeños, aparecen en los plementos que se generan sobre las nervaduras de medio punto.

Por ello, en función de su geometría – determinante de su tipo de estabilidad – existen tantos Tipos como bóvedas construidas, porque sus geometrías son todas diferentes al variar estos parámetros. Cada forma geométrica genera un determinado estado de estabilidad y distribución tensional.

Spandreed cathedrals have a powerful orthogonal network of walls in their skeletons – sometimes concealed inside their flat roofs – able to absorb the dynamic horizontal actions produced by the wind and earthquakes. Significantly, in the areas of Spain where seismic risk is highest – Andalusia and Catalonia – the cathedrals are spandreed, whilst Castilian cathedrals are not.

GEOMETRIC SHAPE OF VAULTS

The Medieval masters optimised the geometric shape of fanned vaults. They began with ogive transverse arches and semicircular formerets with barely any differences in the height of their respective keystones – as in Burgos Cathedral – and ended up with ogive arches in all ribs and staggering the keystones so as to generate doubly bowed severies – as in Seville Cathedral. This change of shape optimised vault stability and stress state by increasing its stiffness and reduced the – admittedly small - flexural forces that arise in severies built over semicircular ribs.

Therefore, if defined in terms of geometry, there are as many types of stability as there are vaults, whose geometries differ as these parameters vary. Each geometric shape generates a certain stability state and stress distribution.

COMPONENT CONFIGURATION IN VAULTS

There are two types of constructive patterns in Spanish Gothic vaults: one is found under sloped roofs such as in Burgos and Leon, and the other under flat roofs, such as in Seville, Barcelona or Santa María del Mar. The former are built as a shell of 18-25-cm thick ashlar stones and a layer of lime mortar no more than 6 to 10 cm thick over the extrados.

The discovery of the overlain vaults in Seville Cathedral shows that there may be any number of component configurations in flat roofs. Three types were identified in Seville, and the roof over Santa María del Mar Cathedral is different from all three, according to the description provided by Bassegoda Noel. This type of component configuration concurs with “spandreed” skeletons. The existence of spandrels on formerets and transverse ribs in Gothic fan vaults affords them a rigid outer frame which, while transmitting no horizontal loads, delimits their spatial deformation, and the loads on the severies are likewise reduced because the spandrel collaborates in the distribution of stress.

TYPES OF QUATRIPARTITE VAULTS

Three types of stable behaviour may be described in Spanish quadripartite vaults, depending on geometric shape and component configuration:

TYPE	RIB Shape		STAGGERED	PLAN Shape	SPANDRELS	MODEL
	TRSVRSE	FORMERETS				
OO-Hh-R-S	OGIVE	OGIVE	YES	RECTANGULAR	YES	SEVILLE
OS-Hh-R-N	OGIVE	SEMIC.	NO	RECTANGULAR	NO	BURGOS
OO-HH-Sq-S	OGIVE	OGIVE	NO	SQUARE	YES	S ^o M ^o del MAR

DEFORMABILITY OF GOTHIC STONEWORK

Further to the results obtained in the tests conducted in the INTEMAC Laboratory, it was confirmed that with a modern agricultural 1:1 lime mortar – similar to the material sampled from Seville Cathedral, increases in joint thickness prompt a steep decline in the modulus of deformability, from 5,632.7 N/mm² in 5.50-mm joints to 169.7 N/mm² in 17.00-mm joints. Medieval masters used thicker joints in structural members that they intuitively knew should be more deformable – such as the vault severies – and thinner joints in members requiring greater stiffness, such as ribs and columns.

ELASTIC OR PLASTIC ANALYSIS?

The rupture analysis formulated by Coulomb⁽¹⁶⁾ and applied by Heyman over the last few decades is indisputably the most suitable for analysing the stability of masonry walls, providing that the model analysed reproduces the existing geometry and component configuration. Moreover, the constant degeneration of cathedral stone speaks to

CONFIGURACIÓN CONSTRUCTIVA DE LAS BÓVEDAS

Existen dos tipos de configuraciones constructivas en las bóvedas góticas españolas; las que se encuentran bajo cubierta inclinada –Burgos ó León– y las que lo están bajo cubiertas aterrazadas – Sevilla, Barcelona o Santa María del Mar. Las primeras están ejecutadas con una hoja de sillarejos de piedra tomados con mortero de cal, con un espesor de 18 a 25 cm, con solamente una capa de mortero de cal de 6 a 10 cm de espesor sobre su extradós. Sin embargo las que están bajo cubiertas aterrazadas cuentan con una gran carga permanente situada directamente sobre la capa de mortero de cal de su extradós.

El descubrimiento de las bóvedas superpuestas de las naves laterales de la catedral de Sevilla demuestra que pueden existir muy diferentes configuraciones constructivas para la formación de las terrazas. En Sevilla he detectado tres tipos, y la configuración constructiva de la terraza en Santa María del Mar es diferente a ellos, según describe Bassegoda Noel. Este tipo de configuración constructiva coincide con los esqueletos “enjutados”. La existencia de enjutas en las nervaduras formeras y fajonas de las bóvedas de crucería gótica, les aporta un marco rígido de borde, que sin transmitirles acciones horizontales, delimita espacialmente su deformación, haciendo que disminuyan las tensiones de los plementos al colaborar la enjuta en la distribución tensional.

TIPOS DE BÓVEDAS CUATRIpartitas

En función de su forma geométrica y configuración constructiva he clasificado las bóvedas cuatripartitas españolas en tres tipos de comportamientos estables:

TIPO	Forma NERVADURAS		DECALAJE	Forma PLANTAS	ENJUTAS	MODELO
	FAJONAS	FORMERAS				
AA-Hh-R-E	APUNTADA	APUNTADA	SI	RECTANGULAR	SI	SEVILLA
AM-Hh-R-N	APUNTADA	1/2 PUNTO	NO	RECTANGULAR	NO	BURGOS
AA-HH-C-E	APUNTADA	APUNTADA	NO	CUADRADA	SI	S ^a M ^a del MAR

DEFORMABILIDAD DE LAS FÁBRICAS GÓTICAS

En función de los resultados obtenidos en los ensayos realizados en el Laboratorio de INTEMAC, he podido confirmar que con un mortero de cal agrícola actual 1:1 – semejante al material analizado procedente de catedral de Sevilla- el incremento del espesor de junta provoca un rápido descenso del coeficiente de deformabilidad, pasado de 5.632,7 N/mm² en espesores de 5,50 mm a 169,7 N/mm² en espesores de 17,00 mm. Los maestros medievales utilizaron espesores de junta mayores en los elementos estructurales que intuyeron debían ser más deformables – como los plementos de las bóvedas – mientras que utilizaron espesores de juntas muy pequeños en los elementos que necesitan mayor rigidez, como las nervaduras y pilares.

¿ANÁLISIS ELÁSTICO O ANÁLISIS PLÁSTICO?

Sin duda el análisis a rotura formulado por Coulomb⁽¹⁶⁾ es el más apropiado para analizar la Estabilidad de las obras de fábrica, tal y como Heyman ha aplicado en las últimas décadas, pero siempre que se analice un modelo que reproduzca la forma geométrica y configuración constructiva existente. Por otra parte, el imparable proceso de degradación de las piedras de las catedrales demanda cada vez más conocer también el estado tensional al que están sometidas. La aplicación de la teoría de cáscaras a las bóvedas góticas conduce a resultados que se alejan totalmente de su estado tensional, tal y como señala Eduardo Torroja⁽¹⁷⁾.

El Método de Elementos Finitos, pese a considerar en sus comienzos un material elástico, homogéneo y continuo, ha avanzado en los últimos diez años ofreciendo la posibilidad de utilizar elementos tridimensionales anisótropos, no –lineal de deformaciones, y con modelización de apertura de fisuras, permitiendo realizar estudios de sensibilidad frente a los parámetros más determinantes como es el módulo de deformación. Sirve por ello sin duda como instrumento muy eficaz para producir un mayor acercamiento al conocimiento del comportamiento estructural y su distribución tensional, siempre que los resultados se comparen de forma rigurosa con la realidad existente en la obra de fábrica, siendo conscientes de que estos resultados – aunque de gran atractivo colorista – no son la realidad absoluta sino una aproximación que necesita cotejarse con la realidad para ser valorada adecuadamente.

a growing need for a better understanding of the stress state to which it is subjected. The application of shell theory to Gothic vaults leads to results that are far removed from their stress state, as Eduardo Torroja pointed out⁽¹⁷⁾.

Although initially restricted to elastic, smooth and continuous materials, finite element analysis has progressed in the last ten years and can now be implemented with anisotropic three-dimensional, non-linear elements of deformation, with crack modelling, whereby sensitive studies can be conducted for highly determinant parameters such as the modulus of deformation. This makes it a very effective tool to gain greater insight into structural behaviour and stress distribution, providing the results are rigorously compared with the realities observed in the masonry structure. In other words, the analyst needs to be fully aware that these results – whilst highly attractive – do not represent absolute reality but a mere approximation that must be contrasted with actual conditions to be suitably evaluated.

7. ANNOTATED REFERENCES AND ENDNOTES

- (1). Not only is there a paucity of manuscripts by Gothic masters, but the few that have reached us contain very little structural or construction information. The only MS prior to the fifteenth century unearthed to date is the one authored by Villard de Honnecourt in the thirteenth century, from circa 1230. Based on the manuscript kept by the National Library at Paris (No. 19093), introduced and annotated by Alain Erlande-Brandenburg, Régine Pernoud, Jean Gimpe, Roland Bechman. Translation by Yago Barja de Quiroga (1986 Ediciones Akal, S.A).
- (2). The original forms of most cathedrals have been substantially refurbished: towers, cloisters, and the like have been attached to them or their original simple fan vaults have been replaced by more complex stellar vaults. For these reasons the stability of Gothic cathedrals in the twenty first century has nothing at all in common with the stability of the original structure. The analysis hereunder is based on the conditions assumed to have prevailed in the original skeletons.
- (3). Spanish Gothic cathedrals and churches were built over a five hundred-year period (twelfth to sixteenth centuries). One of the oldest is Tuy Cathedral, begun in 1176 which, like all the others built in the twelfth century, such as Zamora, Avila, Tarragona and Salamanca Cathedrals, is a mix of purely Romanesque and purely Gothic elements. Most of Spain's Gothic cathedrals were built in the thirteenth century: such is the case of **Burgos**, León, Palma de Majorca, Barcelona, Tudela, Toledo, Burgo de Osma, Valencia, Ciudad Rodrigo, Vitoria, Badajoz and Oviedo, with more purely Gothic structural lines, generally speaking, as by that time the Romanesque style had been wholly abandoned. Others were built in the fourteenth century, including: **Santa María del Mar**, Girona, Pamplona, Santander, Palencia and Tortosa, and yet others in the fifteenth: Huesca, Astorga, **Seville**, Santo Domingo de la Calzada and Alcalá de Henares; subsequently, Segovia, Salamanca Nueva, Coria and Barbastro Cathedrals were built in an age when Gothic and Renaissance aesthetics co-existed.
- (4). In fact, the Medieval masters used simple geometric designs as an adimensional method for dimensioning arch piers or buttresses, although due to the absence of any Gothic records to this effect, there is no certainty about which of the methods appearing in subsequent treatises and manuscripts from the sixteenth century on and attributed by their authors to Medieval masters were actually ever used. The most extensively cited of these later works are the accounts given by Spanish authors Rodrigo Gil de Hontañón (1500-1572) and Martínez Aranda (seventeenth century), and the treatise in Viollet-Le-Duc's (nineteenth century) *Dictionnaire raisonné*, Article - Construction. "La Construcción Medieval", Enrique Rabasa Díaz and Santiago Huerta Fernández (eds). CEHOPU, CEDEX, Ministry of Internal Development. And in the twentieth century, Fernando Cassinello's article in the Instituto Eduardo Torroja publication *Arcos y Bóvedas de Ladrillo* (1958), cited by Heyman in 1995 in his *Estructuras de Fábrica* Instituto Juan de Herrera, Madrid School of Architecture.
- (5). The geometry and component configuration used are based on graphic documentation furnished by resident architect Marcos Ricos and on the data gathered *in situ*, needed to complete and/or verify information on the vault ribs, sagitta, staggering of centres, thickness of layer of mortar over the extrados, and so on. To analyse stability it was assumed that the bay selected was in its original state, without the added chapels or reinforcement of its piers following on the construction of the vault over the Santa Tecla chapel (seventeenth and eighteenth centuries), as described by Vicente Lampérez y Romea in his plates on Burgos Cathedral. (Madrid Leoncio Miguel MCMXII - Pertinax Labor).
- (6). The raw data for the analysis of Seville Cathedral were the only ones that the author had the opportunity to gather personally, thanks to the authorisation granted by its resident architect Alfonso Jiménez. The discovery of the overlain vaults and the verification of the existence of the spandrels, in addition to being discussed in the doctoral thesis titled "Trazado y Estabilidad de la Arquitectura Gótica" defended in the Madrid School of Architecture on 15 July 2003, were reported in the following publications: Cassinello Plaza M^a Josefa

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS COMENTADAS

- (1). Actualmente no solo se conoce un escaso número de manuscritos realizados por maestros góticos, sino que además su contenido arroja muy poca información sobre aspectos estructurales o constructivos. El único descubierto hasta hoy, anterior a la segunda mitad del siglo XV, fechado aproximadamente en el año 1.230, es el de Villard de Honnecourt: Cuaderno siglo XIII. A partir del manuscrito conservado en la Biblioteca Nacional de París (n.19093), presentado y comentado por Alain Erlande-Brandenburg, Régine Pernoud, Jean Gimple, Roland Bechman. Traducción realizada por Yago Barja de Quiroga (1.986, Ediciones Akal, S.A).
- (2). La mayor parte de las catedrales han sufrido transformaciones importantes en sus formas primitivas, construyéndose cuerpos adosados a ellas, torres, claustros,.....o sustituyéndose las primitivas bóvedas de crucería simple por otras estrelladas más complejas. Por esta razón la estabilidad de la catedral gótica del siglo XXI nada tiene que ver con la de la primitiva catedral medieval. El análisis que he realizado esta basado en los supuestos esqueletos primitivos.
- (3). Las catedrales e iglesias góticas españolas fueron construidas durante un periodo de cinco siglos (XII – XVI). Una de las más antiguas es la catedral de Tuy iniciada en el año 1.176 y que al igual que las restantes construidas en el siglo XII, como Zamora, Avila, Tarragona o Salamanca cuentan con mezcla de elementos puramente románicos, en el siglo XIII es cuando se construyen en España el mayor número de catedrales góticas como; **Burgos**, León, Palma de Mallorca, Barcelona, Tudela, Toledo, Burgo de Osma, Valencia, Ciudad Rodrigo, Vitoria, Badajoz y Oviedo, que responden en general a un esquema estructural más puramente gótico, una vez abandonada definitivamente la concepción románica. En el siglo XIV se construyen entre otras; **Santa María del Mar**, Gerona, Pamplona, Santander, Palencia y Tortosa; en el siglo XV Huesca, Astorga, **Sevilla**, Santo Domingo de la Calzada y Alcalá de Henares y posteriormente, conviviendo ya con el Renacimiento, se construyen las de Segovia, Salamanca Nueva, Coria y Barbastro.
- (4). En efecto los maestros medievales utilizaron sencillos trazados geométricos como regla adimensional para dimensionar los estribos o contrafuertes de un arco, aunque debido a la inexistencia de legados góticos que así lo constaten no existe certeza sobre cual o cuales de todos los recogidos en los posteriores tratados y manuscritos aparecidos a partir del siglo XVI y adjudicados por sus autores a los maestros medievales fueron realmente utilizados por estos. La más extendida es la recogida por los tratadistas españoles Rodrigo Gil de Hontañón (1.500-1.572), y Martínez Aranda (siglo XVII), así como de Fomento, Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, 1.996 Viollet-Le-Duc (siglo XIX) en su "Dictionnaire raisonné" Artículo - Construcción. "La Construcción Medieval" Edición a cargo de Enrique Rabasa Díaz y Santiago Huerta Fernández. CEHOPU, CEDEX, Ministerio. y en el siglo XX Fernando Cassinello en la publicación del Instituto Eduardo Torroja "Arcos y Bóvedas de Ladrillo" 1.958, y que posteriormente aplica Heyman en 1.995 "Estructuras de Fábrica" publicación del Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
- (5). La geometría y la configuración constructiva utilizadas están basadas en la documentación grafica facilitada por el Arquitecto Mayor Marcos Ricos así como en la toma de datos que realicé in situ, necesaria para completar y/o comprobar la definición de las nervaduras de sus bóvedas, ságitas, decalaje de centros, espesor de capas de mortero en el trasdós, etc...Para el análisis de su estabilidad partí de la hipótesis de que la cruja seleccionada estuviera en su estado primitivo, sin capillas añadidas y sin refuerzo en uno de sus estribos, debido a la inclusión de la bóveda de la capilla de Santa Tecla (siglo XVII – XVIII), tal y como recoge Vicente Lampérez y Romea en sus láminas sobre la catedral de Burgos.(Madrid Leoncio Miguel MCMXII - Pertinax Labor).
- (6). Los datos base para el análisis de la catedral de Sevilla son los únicos que tuve la oportunidad de tomar personalmente gracias a la autorización de su arquitecto mayor Alfonso Jiménez. El descubrimiento de las bóvedas superpuestas así como las comprobaciones que pude realizar referentes a las enjutas, además de estar recogidas en la Tesis realizada "Trazado y Estabilidad de la Arquitectura Gótica" presentada en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid el 15 de julio 2.003, las recogí en las siguientes publicaciones: Cassinello Plaza, M^o Josefa
 - Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Madrid ETSAM- septiembre 1.996 Comunicación: "Bóvedas Góticas españolas. Influencia de la configuración constructiva actual en su estabilidad".
 - "Bóvedas Góticas-Problema de la modelización de su realidad constructiva". Primer Congreso Europeo sobre Restauración de Catedrales Góticas. Vitoria-Gasteiz, mayo 1.998
- (7). Estratos definidos por el arqueólogo Alfonso Jiménez Sancho, y dibujados e interpretados por mi durante la toma de datos (julio 1.996): 1º estrato, por orden de aparición, corresponde al pavimento actual de la cubierta aterrazada exterior, y esta formado por baldosas cerámicas colocadas a palma y espiga de 10 x 20 cm de lados y 3 cm de espesor, en dos orientaciones diferentes, N-S y NE-SO, que demuestra la colocación de ambas

- Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Madrid ETSAM- September 1996 Paper: "Bóvedas Góticas españolas. Influencia de la configuración constructiva actual en su estabilidad".
 - "Bóvedas Góticas-Problema de la modelización de su realidad constructiva". Primer Congreso Europeo sobre Restauración de Catedrales Góticas. Vitoria-Gasteiz, May 1998
- (7). Strata defined by archaeologist Alfonso Jiménez Sancho and sketched and interpreted by the author during sampling (July 1996): The 1st stratum, by order of appearance, corresponds to the present flooring on the decked roof, consisting of 10 x 20-cm ceramic tiles, 3 cm thick, laid in herringbone arrangement in two different directions, N-S and NE-SW, interpreted to mean that it was laid at different times. In one of the surfaces, clearly the earlier of the two, there are traces dating from when the Gothic cathedral was built: this surfacing is from the eighteenth century. The 2nd stratum consists of a layer of 1:1 lime mortar, from 4 to 5 cm thick, that serves as the bed for the ceramic flooring laid over the original surfacing in the eighteenth century, in all probability to repair leaks. The 3rd stratum is a layer of yellowish lime mortar (1 sand to 2.4 lime) varying in thickness from 5 to 9 cm under the N-S aligned flooring. The 4th stratum is a 4-cm layer of 1:2 lime mortar with incrustated wood chips, somewhat darker in colour than the 3rd, located only under the NE-SW aligned flooring. The 5th stratum is 4 cm thick and consists of crushed brick fragments, pieces of wood and earthenware, with no binder. The 6th stratum is a thin layer of very pure lime, only 2 cm thick (only area shown on sketch at the same level as the fourth stratum). The 7th stratum is a 3-cm layer of ceramic tile placed face down and aligned in an E-W direction, rather carelessly placed. The 8th stratum is a 2-3-cm layer of greyish lime mortar (1 sand to 1.5 of lime). The 9th stratum is a layer of 30.3 x 4.7-cm raked ceramic tile, laid in a N-S direction. It has lichen stains and other signs of exposure to the elements, from which it is deduced to have been the original roof flooring, laid in the fifteenth century. It is at a depth of 20 cm. This original surfacing rests directly on the extrados of the airshaft vault. The 10th stratum is the plaster into which the 9th layer was set; 4.3 cm thick, it consists of lime mortar (1 of sand to 1.5 of lime) and also shows moisture stains. The 11th stratum is the vault filling – the "enjarrado" - made of clay vessels, earthenware jugs, boat lamps, pottery, and the like, incrustated in a very hard, greyish lime binder. This "enjarrado" was built in the fifteenth century (1467). The purpose of using hollow pottery was to lighten the filler over the vault extrados to reach the height and slope required for the flat roof flooring. The 12th stratum consists of four brickwork vaults built directly over the corners of the quadripartite stone vault. The 13th stratum is a layer of lime mortar covering the brick backing that comprises the 14th stratum. The 14th stratum is a double layer of 4 x 4-cm brick backing laid over the vault extrados and exactly profiling its geometry. The 15th stratum is the severy of the Gothic fan vault, made of very porous, soft calcarenite ashlar, much weaker than the 14th stratum brickwork. The joint mortar is a whitish calcite. The 16th stratum (not cored for samples) comprises the stone ribs on the fan vault.
- (8). "Racionalismo a Ultranza en la Arquitectura Ojival" – Buenaventura Bassegoda Musté, article included in the book *Algunos ensayos sobre técnica edificatoria* published by the Polytechnic University of Barcelona in 1974. Bassegoda does not mention any earlier flooring under the surfacing found at that time on the roof, which may be interpreted to mean that no need had arisen to repair the original roof for leaks, or that the original flooring was later replaced altogether. The component configuration described as the last layer – "raised wood planks" - does not, however, appear to be a Medieval technique used in 1329 as a support for the flooring, from which it may be deduced that the original surfacing actually was replaced.
- (9). One of the conclusions of the Primer Congreso Europeo sobre Restauración de Catedrales Góticas (First European Congress on Cathedral Restoration), Vitoria-Gasteiz (May 1998) was that the stone in many cathedrals is damaged by air pollution, and its bearing capacity reduced in some cases by up to 47%, such as in Santa María de Lekeitio Cathedral, according to a survey conducted by the LBEIN Centre of Technological Research.
- (10). Robert Mark: "Experiments in Gothic Architecture", 1982. The Massachusetts Institute of Technology.
- (11). Variability in the modulus of deformation in some old structures:
- | | |
|--------------------------|---|
| Tower of Pisa from | from 29,000 to 404,000 kg/cm ² (2,900 N/mm ² - 40,400 N/mm ²) |
| St Sofia | 2,000 kg/cm ² (200 N/mm ²) |
| Tower of Pavia..... | 40,800 kg/cm ² (4,080 N/mm ²) |
| Duomo in Florence..... | from 50,000 to 105,500 kg/cm ² (5,000-10,500 N/mm ²) |
- (References extracted from INTEMAC archives)
- (12). Spanish seismic building code NCS-94. Eurocode 8, European seismic design.
- (13). To date the explanations provided by different authors – architects, engineers and historians – of why Spanish Gothic cathedrals have flat decks instead of slender sloped roofs over their vaults have completely ignored the "seismic rationale" taken into account by the Medieval masters and described hereunder. Indeed, the reason for the existence of flat roofs over vaults is explained in climatic terms, alluding to scant rainfall in the areas

en diferentes fechas. En una de ellas, claramente la primitiva, aparecen todavía trazados correspondientes a la fase de construcción de la catedral gótica, este pavimento corresponde al siglo XVIII. 2º estrato lo constituye la capa de mortero de cal 1:1 que varía de espesor entre 4 y 5 cm, que sirve de lecho de asiento a la solería cerámica colocada en siglo XVIII sobre la primitiva, seguramente por problemas de filtraciones de humedades. 3º estrato esta formado por una capa de mortero de cal (1 arena + 2,4 cal) de color amarillento de un espesor variable entre 5 y 9 cm situada bajo la solería orientada N-S. 4º estrato esta formado por capa de 4 cm de mortero de cal 1:1 con virutas de madera y de color más oscuro que el anteriormente descrito, situada únicamente bajo la solería orientada NE-SO. 5º estrato tienen un espesor de 4 cm y esta formado por cascotes de ladrillo, trozos de madera y de cerámica, muy troceados y sin conglomerante. El estrato 6º esta formado por una escasa capa de cal muy pura de 2 cm de espesor (solo zona esquema a la altura del estrato cuarto anteriormente descrito). El estrato 7º esta formado por una capa de 3 cm de baldosas cerámicas colocadas bocabajo y orientadas E-W, con traba poco cuidadosa. El estrato 8º esta formado por una capa de mortero de cal (1 arena + 1 1/2 cal) de color grisáceo de 2 a 3 cm de espesor. El estrato 9º esta formado por un pavimento de baldosas cerámicas 30,3 x 14,5 x 4,7 cm, colocadas a palma y espiga y orientadas N-S. Presenta manchas de líquenes y signos de haber estado a la intemperie, lo cual indica que fue el primer solado de la cubierta realizado en el siglo XV. Se encuentra a una profundidad de 20 cm. Este pavimento primitivo se apoya directamente sobre el trasdós de la bóveda en la zona del respiradero. El estrato 10º esta formado por la argamasa de asiento de la capa de solado primitivo que constituye el estrato 9º, tiene un espesor de 4,3 cm y es mortero de cal (1 de arena + 1 1/2 de cal) y que también presentaba manchas de humedad. El estrato 11º esta formado por el relleno de la bóveda –el enjarrado– ejecutado con vasijas, botijos, lámparas de barco, ollería, etc... cerámicas envueltos en aglomerado de cal muy duro de color grisáceo. Este enjarrado se ejecutó en el siglo XV (1.467). El hecho de utilizar piezas cerámicas huecas era una forma de aligerar el relleno del extradós de la bóveda hasta alcanzar el nivel y pendientes de la solería de la cubierta aterrazada. El estrato 12º formado por cuatro bóvedas de fábrica de ladrillo ejecutadas directamente sobre la bóveda pétreo cuatrimpartita y ubicadas en sus esquinas. El estrato 13º esta formado por una capa de mortero de cal ejecutada sobre el trasdosado de ladrillo que constituye el estrato nº 14. El estrato 14º esta formado por una doble capa de tradosado de ladrillo de espesor 4 + 4 cm, que cubre el extradós de la bóveda pétreo siguiendo fielmente su geometría. El estrato 15º esta formado por el plemento de la bóveda pétreo de crucería gótica, ejecutada con sillares de piedra calcarenita – muy porosa y blanda-, y de mucha menor resistencia que la fábrica de ladrillo del estrato 14º. El mortero de juntas es una calcita blanquecina. El estrato 16º (no perforado ni extraídas muestras) lo constituyen las nervaduras pétreas de la bóveda de crucería.

- (8). "Racionalismo a Ultranza en la Arquitectura Ojival" – Buenaventura Bassegoda Musté, artículo publicado en el libro "Algunos Ensayos sobre Técnica Edificatoria" de la Universidad Politécnica de Barcelona en el año 1.974. Bassegoda no habla de haber encontrado otros pavimentos más antiguos por debajo del que formaba la solería que pisaban en aquel momento en la azotea, hecho que se puede interpretar como que no hubo necesidad de arreglar la cubierta primitiva por aparición de humedades, o hecho que atestigüa que tal vez el pavimento primitivo fue sustituido posteriormente pero siendo colocado en su mismo lugar, aunque también se puede interpretar que el pavimento fue realmente sustituido en algún momento porque la configuración constructiva que describe como última capa no parece una técnica medieval de 1.329 – "tablero tabicado"- como apoyo de solería.
- (9). Tal y como quedó referenciado en el Primer Congreso Europeo sobre Restauración de Catedrales Góticas. Vitoria-Gasteiz, mayo 1.998, son muchas las catedrales cuyas piedras están dañadas por diversos agentes exteriores de polución atmosférica, habiéndose reducido su capacidad portante en algunos casos hasta en el 47% como en la catedral de Santa María de Lekeitio, estudio realizado por el Centro de Investigación Tecnológica LABEIN.
- (10). Robert Mark: "Experiments in Gothic Architecture", 1.982. The Massachusetts Institute of Technology.
- (11). Variabilidad del modulo de deformación en algunas construcciones de fábrica antiguas:
- | | |
|-------------------------|--|
| Torre de Pissa..... | de 29.000 a 404.000 kg/cm ² (2.900 N/mm ² a 40.400 N/mm ²) |
| Santa Sofía..... | 2.000 kg/cm ² (200 N/mm ²) |
| Torre de Pavia..... | 40.800 kg/cm ² (4.080 N/mm ²) |
| Duomo de Florencia..... | de 50.000 a 105.500 kg/cm ² (5.000 a 10.500 N/mm ²) |
- (Referencias obtenidas archivo INTEMAC)
- (12). Normativa sísmica Española NCS-94. eurocódigo N° 8 Normativa Sísmica Europea.
- (13). Hasta la fecha las explicaciones dadas por diferentes autores – arquitectos, ingenieros e historiadores- sobre la razón de que algunas las catedrales góticas españolas cuenten con terrazas en lugar de esbeltas cubiertas inclinadas sobre sus bóvedas han sido totalmente ajenas a la realidad de que responden a la "racionalidad sísmica" tenida en cuenta por los maestros medievales y que he puesto de manifiesto en mi trabajo de

concerned, by: James H. Acland who in his book *Medieval Structure: The Gothic Vault*, University of Toronto Press, 1973, referring to the decked roof on Seville Cathedral, notes (page 117) "In Andalucia, Spain, where frost damage was a negligible factor, the vaults were left open to the weather". In his book *Arquitectura Gótica Catalana*, Alexandre Cirici (Photography, Oriol Maspons, Maqueta; Lluís Cloet y Oscar Tusquets) 1968 (page 34) writes: "Una de las mayores originalidades de la arquitectura gótica catalana consiste en un sistema de cubierta mediante bóvedas desnudas, sin la protección de un tejado y únicamente recubiertas por un solado que las hace circulables. Desde el punto de vista natural, es consecuencia del clima mediterráneo, de lluvia escasa y muchos días soleados. ... En cualquier caso la elección de la cubierta de azotea señala una opción meridional paralela a la de la política estatal..." [One of the most original features of Catalan Gothic architecture is the roof system consisting of naked vaults, unprotected by a roof and merely covered over by a floor, which were made into usable decks. From the standpoint of the influence of nature, this is a result of the Mediterranean climate, with scant rainfall and many sunny days... In any event, the choice of a deck roof is a southern option parallel to the option favoured by state policy...].

- (14). Viollet-Le-Duc (siglo XIX) in his *Dictionnaire raisonné*, Article - Construction. "La Construcción Medieval", Enrique Rabasa Díaz and Santiago Huerta Fernández (eds). CEHOPU, CEDEX, Ministry of Puvlics Works.
- (15). The European Seismic Hazards Map 2003, European Seismological Commission (ESC).
- (16). Coulomb C.A., *Essai sur une application de règles de maximis et minimis à quelques problêmes de statique, relatif à l'Architecture. Mémoires de Mathématique et Physique présentées à l'Academie royale de Sciences par divers Savants, et lus dans ses assemblées* (1773). Coulomb: *Sobre los Arcos*, (1992). publication edited by INTEMAC as part of its Christmas series.
- (17). Torroja Miret, Eduardo. *Razón y ser de los tipos estructurales*, 1996, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto Eduardo Torroja. Madrid.

investigación. En efecto, la razón de la existencia de terrazas sobre las bóvedas la justifican por la climatología aludiendo a la escasa lluvia: James H. Acland en su libro "Medieval Structure: The Gothic Vault", University of Toronto Press, 1.973, refiriéndose a las cubiertas aterrazadas de la Catedral de Sevilla (página 117) comenta: *"In Andalusia, Spain, where frost damage was a negligible factor the vaults were left open to the weather"*. Alexandre Cirici en su libro "Arquitectura Gótica Catalana" (Fotografías; Oriol Maspons, Maqueta; Lluís Clolet y Oscar Tusquets) 1.968 página 34: *"Una de las mayores originalidades de la arquitectura gótica catalana consiste en un sistema de cubierta mediante bóvedas desnudas, sin la protección de un tejado y únicamente recubiertas por un solado que las hace circulables. Desde el punto de vista natural, es consecuencia del clima mediterráneo, de lluvia escasa y muchos días soleados."* En cualquier caso la elección de la cubierta de azotea señala una opción meridional paralela a la de la política estatal..."

- (14). Viollet-Le-Duc (siglo XIX) en su "Dictionnaire raisonné" Artículo - Construcción. "La Construcción Medieval" Edición a cargo de Enrique Rabasa Díaz y Santiago Huerta Fernández. CEHOPU, CEDEX, Ministerio.
- (15). The Seismic Hazard Map of the European 2.003 European Seismological Commission (ESC).
- (16). Coulomb C.A., Essai sur une application de regles de maximis et minimis à quelques problemes de statique, relatif à L'Architecture. Mémoires de Mathématique et Physique présentées à L'Academie Royale de Sciences par divers Savants, et lus dans ses assemblées (1.773). COULOMB: "Sobre los Arcos" publicación realizada por INTEMAC con motivo de la Navidad de 1.992.
- (17). Torroja Miret, Eduardo. "Razón y Ser de los tipos estructurales". Octava Edición, 1.996. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Madrid.

Relación de Personal Titulado de INTEMAC

Arquitectos

Fernández Sáez, Ana María
Fraile Mora, Serafín
Gibernau Ponsa, Luis
González Balseyro, María José
López-Nava Muñoz, Alberto Ignacio
Luzón Cánovas, José M^a
Sánchez Arroyo, Jesús M^a
Sicilia Mañá, Beatriz

Ingenieros Aeronáutico

Peraita Colsa, Carlos

Ingenieros de Caminos

Anlló Rodríguez, María
Baena Alonso, Eva
Barrios Corpa, Jorge
Barrios Corpa, Roberto
Beteta Cejudo, M^a Carmen
* Calavera Ruiz, José
Calderón Bello, Enrique
Carpintero García, Ismael
Castillo Fernández, Luis Javier
Corbacho Vicioso, José Angel
Cortés Bretón, Juan María
Corral Folgado, Claudio
De la Cuerda del Olmo, Francisco Javier
De la Fuente Gómez, Ana Isabel
Dávila Sánchez-Toscano, Suyapa
Díaz Heredia, Elena
Díaz Lozano, Justo
Díaz Pavón Cuaresma, Eduardo
Encinar Arroyo, Antonio
Fernández García, Susana
* Fernández Gómez, Jaime Antonio
Gil García, Alfonso
González González, Juan José
* González Valle, Enrique
* Hostalet Alba, Francisco
* Izquierdo Bernaldo de Quirós, José M^a
Jiménez Ortiz, Gonzalo
Ley Urzaiz, Jorge
Molero Rodríguez, Teresa
Munugarren Martínez, Miguel Angel
Recio Cañadas, Alba
Rocha Muñoz, Sergio de la
Rodríguez Escribano, Raúl Rubén
Rodríguez Romero, Jesús M^a
Rueda Contreras, Jorge Ladislao
Ruiz Jiménez-Alfaro, Felipe
Sanz Pérez, Lorenzo
Sirvent Sirvent, Enrique
Tapia Menéndez, José
Torre Cobo, María Carmen
Torres Pérez, Elisa
Valdés Fernández de Alarcón, Pablo
Villanueva Ramírez, Santiago

Ingeniero en Cartografía y Geodesia

López-Canti Casas, Elisa

Ingenieros I.C.A.I.

Marín Estévez, Gonzalo
Escarpizo-Lorenzana Martínez, Jorge

Ingenieros Industriales

* Alvarez Cabal, Ramón Amado
Arroyo Arroyo, José Ramón
Bayonne Sopo, Enrique
Estrada Gómez, Rafael
Muñoz Fuentes, Miguel Angel
Torruella Martínez, Josep M^a
* Valenciano Carles, Federico

Ingeniero de Minas

Ramos Sánchez, Adelina

Dra. en Geografía e Historia

Calavera Vayá, Ana María

Licenciada en Administración y Dirección de Empresas

Perales Gómez, Natalia

Licenciado en Ciencias Ambientales

Gil Esteban, Luis Miguel

Licenciado en C. Económicas y Empresariales

González Chavero, Antonio

Licenciados en Ciencias Químicas

Grandes Velasco, Sylvia María
López Sánchez, Pedro
Morgado Sánchez, José Carlos

Licenciados en Derecho

González del Olmo, Alfredo
* Jarillo Cerrato, Pedro

Licenciada en Filología Hispánica

Valentín Sierra, M^a Consuelo

Licenciados en Geología

Blanco Zorroza, Alberto
Baz Lorenzo, María Ascensión
Casado Chinarro, Alejandro
García Tascón, Jorge
López Velilla, Oscar
Orejas Contreras, M^a Carmen
Peguero Orta, Carlos
Usillos Espín, Pablo

Arquitectos Técnicos

Carrato Moñino, Rosa M^a
Fernández Jiménez, Amelia
Gago Morales, Ana María
Gallego Castro, Sergio
Montejano Jiménez, María del Carmen
Muñoz Mesto, Angel
Ochoa Marañón, Ainara
Sánchez Marina, Alberto

Ingenieros Técnicos Industriales

Alcubilla Villanueva, Rubén
Cruz Rodríguez, Sandra Inés
Díaz-Trechuelo Laffón, Antonio
González Carmona, Manuel
López Aguilar, Fernando
Madueño López, Javier
Madueño Moraño, Antonio
Sánchez Bueno, Juan Jesús
Verdú Hoys, David
Villar Riñones, Jesús

Ingeniero Técnico en Informática de Gestión

Esteban Pérez, Ramón

Ingeniero Técnico de Minas

Sillero Arroyo, Andrés

Ingenieros Técnicos Obras Públicas

Alfaro Martínez, Juan Manuel
Carrero Crespo, Rafael
Galán de Cáceres, M^a del Puerto
García Menéndez, David
González Isabel, Germán
González Nuño, Luis
Gutiérrez Garrosa, Raul
Mata Soriano, Juan Carlos
Mazuecos Salas, Ildelfonso
Montiel Sánchez, Ernesto
Muñoz Mesto, Angel
Ortiz del Campo, Natalia
Prieto Antón, Eva Sonia
Ramos Valdés, Raquel
Rodríguez Carvajal, Cecilia Gloria
Romero García, Daniel
Rosa Moreno, José Andrés
Rozas Hernando, José Juan
Salgado Vinuesa, Beatriz

Sánchez Tomé, Elena
Sánchez Vicente, Andrés
Sillero Olmedo, Rafael
Soto López, Elena del
Suárez Ramos, M^a Pilar
Vaquero Andrés, Laura
Vicente Girón, Susana

Ingenieros Técnicos Topógrafos

Blasco Talaván, Rubén
Barragán Bermejo, M^a Vicenta
Carreras Ruiz, Francisco
Lana Campos, Rebeca
López de Castro, Daniel
López Jiménez, Luis
Molero Vicente, M^a Isabel
Salado Rodilla, Rafael
Sánchez Martín, María de la O
Shaw Molina, María Belén
Torés Campos, Ana M^a
Vicente Conde, M^a Isabel

Ingeniero Técnico Aeronáutico

De Castro Asensio, Felipe

Profesor Mercantil

Sampedro Portas, Arturo

Técnicos en Administración de Empresas

Cebrián Sobrino, M^a José
González del Olmo, M^a de la Peña de F.

Técnico en Publicidad

Blanco Armas, Cristina

Topógrafo

Alquézar Falceto, Ricardo

NOTA: Todo el personal de INTEMAC trabaja en dedicación completa y exclusiva, con la excepción de las personas arriba indicadas con, a las que se autoriza la dedicación a la Enseñanza Universitaria en régimen de dedicación parcial.

CUADERNOS INTEMAC



CUADERNOS INTEMAC es una publicación trimestral, bilingüe en español e inglés, en forma de monografías que recogen trabajos realizados por los técnicos del Instituto o presentados en los Cursos y Conferencias organizados por el mismo.

Los temas tratados cubren tanto el campo de las Obras Públicas como el de la Edificación y sus Instalaciones.

Precio de la suscripción Año 2002: 21,97 €

ULTIMOS TITULOS PUBLICADOS

Cuaderno Nº 52

“Patología en estructuras de hormigón armado y pretensado”.

Autores: **JUSTO DÍAZ LOZANO.**

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

RAÚL RUBÉN RODRÍGUEZ

ESCRIBANO.

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

ISMAEL CARPINTERO GARCÍA.

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Cuaderno Nº 53

“Trazado y estabilidad de la arquitectura gótica”.

Autora: **Mª JOSEFA**

CASSINELLO PLAZA.

Dr. Arquitecto

CUADERNOS DE PROXIMA APARICION

Cuaderno Nº 54

“Influencia del área relativa de resalto de la armadura en el comportamiento estructural del hormigón armado”.

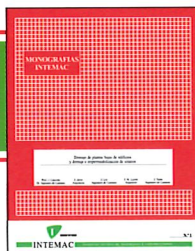
Autores: **U. MAYER**

Dr. Ingeniero Civil

R. ELIGEHAUSEN

Dr. Ingeniero Civil

MONOGRAFIAS INTEMAC



A partir de junio de 1998 INTEMAC emprendió una nueva línea de publicaciones con un carácter eminentemente práctico, destinadas a tratar temas muy concretos que, o bien presentan un nivel de problemas acusados en la práctica, o bien están insuficientemente cubiertos por la Normativa y la documentación técnica existente.

MONOGRAFÍA INTEMAC Nº 5

“Mantenimiento y reparación de parámetros de hormigón”.

Autores: **J. R. Barrios Corpa, C. Bateta Cejudo, E. Díaz Heredia,**

Prof. J. Fernández Gómez, J. Mª. Rodríguez Romero.

Precio de la Monografía 33 €

MONOGRAFÍA INTEMAC Nº 6

“Mantenimiento y reparación de parámetros de ladrillo”.

Autores: **P. López Sánchez, J. Mª. Luzón Cánovas, I. Martínez Pérez**

A. Muñoz Mesto, A. Fernández Sáez.

Precio de la Monografía 33 €

VIDEOS TECNICOS



INTEMAC, dentro de sus actividades en el campo de la información, ha iniciado la edición de una serie de VIDEOS TÉCNICOS, analizando distintos campos de la construcción.

SERIE OBRAS DE HORMIGÓN EN MASA, ARMADO Y PRESENTADO.

REFERENCIA	TÍTULO	CONTENIDO	DURACIÓN	PRECIO
Nº 2001 (1-1)	MUESTREO DE HORMIGÓN FRESCO, FABRICACIÓN Y ENSAYO DE PROBETAS DE HORMIGÓN	Contempla de forma completa y detallada el proceso de toma de muestras de hormigón fresco en obra, la medida de la consistencia con el Cono de Abrams, fabricación de probetas, curado en obra, transporte del laboratorio, curado en cámara, refrenado y ensayo a compresión. Esta nueva versión del vídeo 8801 (1), introduce las modificaciones de EHE y un sistema de estudio de la distribución de presiones de la prensa sobre la probeta así como los aspectos particulares del ensayo de hormigones de alta resistencia.	30 minutos	25 €

BOLETIN BIBLIOGRAFICO

BOLETIN BIBLIOGRAFICO
9207
SERVICIO DE DOCUMENTACION



INTEMAC viene realizando desde su fundación un BOLETIN BIBLIOGRAFICO para uso interno, que ofrece, en una lectura rápida, un panorama general de todas las publicaciones técnicas disponibles. Desde 1991, esta publicación bimestral, ha sido puesta a disposición del público.

EL BOLETIN BIBLIOGRAFICO incluye:

Fotocopia del índice y de los resúmenes de los artículos contenidos en las 105 revistas técnicas que se reciben en el Instituto referentes a los campos de la Edificación, Instalaciones, Obras Públicas y Urbanismo.

Una sección de Normativa reciente, nacional y extranjera.

Secciones de Bibliografía y Cursos.

Una sección de Congresos, Reuniones Técnicas y Ferias de próxima celebración en todo el mundo.

Tarifa de suscripción anual (6 números) 144,24 €

CONSULTAS E INFORMES BIBLIOGRAFICOS

INFORMES BIBLIOGRAFICOS
SERVICIO DE DOCUMENTACION



EL INSTITUTO tiene un SERVICIO DE DOCUMENTACION, que pone a su disposición y que le puede informar sobre cualquier tema relacionado con la Edificación, Instalaciones, Obra Civil y Urbanismo. Se efectúan CONSULTAS BIBLIOGRAFICAS sobre cualquiera de los temas indicados anteriormente, de acuerdo con las siguientes tarifas:

Apertura de expediente	18 €
Cantidad a abonar por referencia	0,36 €
Cantidad a abonar por hoja de fotocopia de documento	0,18 €

Además de la Consulta Bibliográfica correspondiente, el INFORME BIBLIOGRAFICO contiene un breve documento redactado por un especialista en el tema, miembro de INTEMAC, con una serie de recomendaciones sobre la Bibliografía básica, así como los comentarios correspondientes.

Tarifa correspondiente al Informe Bibliográfico: 90,15 € más la tarifa de la consulta.

ARTICULOS TECNICOS

ARTICULOS TECNICOS
SERVICIO DE DOCUMENTACION



INTEMAC dispone de una amplia serie de trabajos publicados por nuestros técnicos en diferentes revistas. A continuación incluimos la lista de los últimos. Si está Vd. interesado, solicite relación completa de títulos.

- INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD Y LA CUANTÍA DE COSIDO EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS PIEZAS COMPUESTAS SOLICITADAS A FLEXIÓN
Enrique González Valle; Jaime Gálvez Ruiz; Luis García Dutari; Ramón Albarez Caval.
- EL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA (HSC): LAS CARACTERÍSTICAS QUE CONDICIONAN EL CALCULO ESTRUCTURAL. Enrique González Valle.
- LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE INFORMACIÓN EN LAS OBRAS. Adolfo Delibes Liniers.
- INVESTIGACIÓN SOBRE REPARACIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO DAÑADAS POR CORROSIÓN DE ARMADURAS. Adolfo Delibes Liniers; Jaime Fernández Gómez.
- HORMIGONADO EN CONDICIONES METEOROLÓGICAS ADVERSAS: ESTUDIO DE LOS ACCIDENTES OCURRIDOS DURANTE EL HORMIGONADO DE UN TABLERO POSTENSADO.
Adolfo Delibes Liniers; Jaime Fernández Gómez; Miguel Angel Acón Robleña.
- LA INFLUENCIA DEL DIAGRAMA TENSION DEFORMACIÓN EN EL CÁLCULO A FLEXIÓN DE SECCIONES REALIZADAS CON HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA.
Enrique González Valle; José Mª Izquierdo; Bernaldo de Quirós.
- EFFECTOS DINÁMICOS EN PUENTES. VARIACION DEL COEFICIENTE DE IMPACTO.
Enrique López del Hierro Fernández; Juan José Benito Muñoz; Javier Gallego Valarde; Ramón Álvarez Cabal.
- CUBIERTAS METÁLICAS DE GRAN LUZ. Mercedes Gómez Álvarez; Justo Díaz Lozano; Ramón Álvarez Cabal.
- LA INSPECCIÓN Y ENSAYO. ORGANIZACIONES DE CONTROL DE CALIDAD Y LABORATORIOS.
José Calavera Ruiz.

P.V.P. 2,40 € / ejemplar.



NUEVA PUBLICACIÓN

Manual para la redacción de informes técnicos en construcción

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 72 €



NUEVA EDICIÓN

Manual de Ferralla

J. Calavera, E. González Valle
J. Fernández Gómez, F. Valenciano

Nueva edición: Noviembre 2003

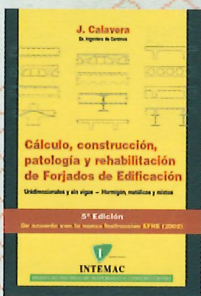
Precio: 38 €



Proyecto de estructuras de hormigón con armaduras industrializadas

J. Calavera, E. González Valle,
J. Fernández Gómez, F. Valenciano

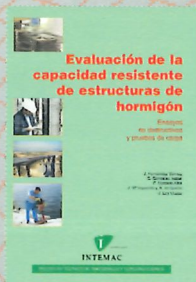
Precio: 47 €



Cálculo, construcción, patología y rehabilitación de forjados de edificación

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 100 €



Evaluación de la capacidad resistente de estructuras de hormigón

J. Fernández Gómez, G. González Isabel,
F. Hostalá Alba, J. Mª Izquierdo, J. Ley Urzaiz

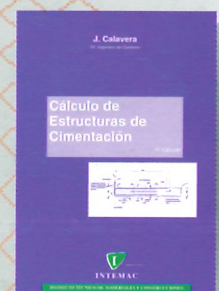
Precio: 58 €



Muros de contención y muros de sótano

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

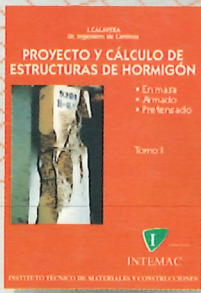
Precio: 71 €



Cálculo de estructuras de cimentación

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

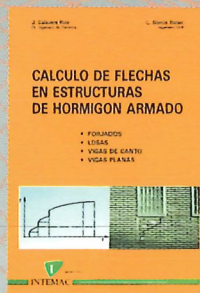
Precio: 71 €



Proyecto y cálculo de estructuras de hormigón

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 156 €



Cálculo de flechas en estructuras de hormigón armado

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)
L. García Dutari (Ingeniero Civil)

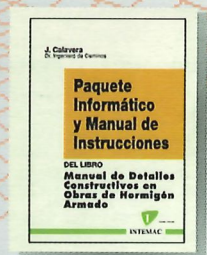
Precio: 50 €



Manual de detalles constructivos en obras del hormigón armado

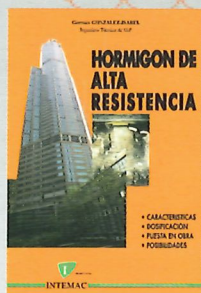
J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Libro: 112 € - Paquete informático: 198 €



INTEMAC

Mario Roso de Luna, 29, Edificio 12 - 28022 MADRID
TEL.: 91 327 74 00 • FAX: 91 327 74 20
e-mail: intemac@intemac.es
www.intemac.es



Hormigón de alta resistencia

G. González-Isabel (Ingeniero Técnico de O. P.)

Precio: 44 €



Tecnología y propiedades mecánicas del hormigón

A. Delibes (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 54 €

PATOLOGÍA DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO Y PRETENSADO

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

Nueva edición: Noviembre 2004

AGOTADO