

GRADO EN INGENIERÍA TECNOLOGÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

EVALUACIÓN DEL RIESGO DE DAÑOS EN SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS

Alumna: Pérez Esnaola, Iratxe

Directora: Garmendia Arrieta, Leire

Curso: 2018 - 2019

Fecha: Jueves. 27 de Junio de 2019

Resumen:

En este documento se realiza una evaluación del riesgo de daños en soluciones constructivas estructurales. Los elementos constructivos a estudiar son las estructuras tridimensionales; el arco, la bóveda, la cúpula, así como elementos tridimensionales mallados.

Inicialmente, se hace una introducción al elemento explicando el funcionamiento del mismo, las partes que lo conforma, los materiales de los que se construye y sus métodos de construcción. Posteriormente, se enumeran los posibles daños estructurales que podrían aparecer y sus causas. A su vez, se expresa que normativa vigente española incumplen en relación con la construcción. Toda esta información es recogida en una tabla Excel con la finalidad de generar una base de datos.

Una vez recogida toda la información, se establece una metodología para el análisis de riesgo, la cual se basa en la probabilidad de ocurrencia de un daño en una determinada solución constructiva y sus consecuencias. A su vez, la probabilidad de daño se establece analizando la exposición del elemento a agentes externos como la ubicación, el clima, etc. y la frecuencia con la que suceden los daños. La gravedad de las consecuencias del daño se decide en base al incumplimiento normativo y el espacio ocupado por el elemento afectado, respecto al conjunto de elementos que forma la estructura principal.

Como resultado se consigue una metodología de análisis de riesgo. La metodología es aplicada a dos casos reales, como son la catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz y la catedral San Antolín de Palencia.

Laburpena:

Dokumentu honetan soluzio konstruktiboen kalte arrisku balioztatzea egiten da. Aztertzen diren elementu konstruktiboak arkua, bobeda, kupula eta elementu tridimentsional saretuak dira.

Elementu bakoitzerako hainbat atal jorratzen dira; elementuaren funtzionamendua, osatzen duten atal desberdinak, bere eraikuntzarako erabiltzen diren materialak eta metodoak. Ondoren, zerrenda baten bidez ezartzen dira ager daitezkeen kalte estrukturalak eta horien zergatiak. Era berean, gaur egun existitzen den zein eraikuntza arautegi betetzen ez duen adierazten da. Informazioa Excel taula bat erabiliz batzen da datu-base bat eratzeko helburuarekin.

Arrisku azterketarako metodologia zehatz bat ezartzen da, zeinek elementua akatsa izateko aukeretan eta horien ondorioen eraginean oinarritzen den. Jakiteko elementu baten aukerak kaltea sortzeko beste bi kontzeptu erabiltzen dira, elementuaren esposizioa kanpoko eragileei, kokalekua, klima, etc. eta kalteen maiztasuna. Azkenik, ondorioen eragina neurtzeko bi parametro erabiltzen dira. Alde batetik, kalteak sortzen

duen ondorioak zein arautegi betetzen ez duen. Beste aldetik, kaltea duen elementuak egituraren estruktura nagusiaren zenbateko gunea betetzen duen.

Prozesu horren bidez kalte arrisku balioztatzeko metodologia lortzen da. Metodologia hau bi kasu errealetan planteatuko da metodologiaren aplikazio adierazteko. Kasu bi hauek Vitoria-Gasteizko Santa María katedrala eta Palentziako San Antolin katedrala.

Abstract:

This document contains the evaluation of the damage risk on different constructive solutions. The constructive solutions that are analysed are the arch, the vault, the cupola and three-dimensional mesh structures.

There is a first introduction in which they are explain different facts about the element such as the way it works, the composition, the material that are use and the different construction techniques. Afterwards, the possible damages and their direct consequences are list. In this instance, there is also mention which current regulation is been violated when the damage happens. That information is collect by an Excel table which objective is to generate a database.

The dates collected will be the starting point to establish the methodology use to analyse the damage risk, which is based on the probability of the appearance of a damage on a specific constructive solution and the consequences that carries. That possibility is provided by the exposure of the element to outside forces such as the localization, the climate, etc. and the frequency of those damages. Finally, to decide the level of importance of the damage two criteria are set. On one hand, which current regulation in been violated when the damage happens. On the other hand, the amount of space that the damage element is covering in regards of the main structure.

As a result a risk evaluation methodology is obtained; moreover, it will be applied to two real cases. Those cases will be Vitoria-Gasteiz cathedral and Palencia's San Antolin cathedral.

Palabras clave: Arco, bóveda, cúpula, estructura tridimensional mallada, riesgo, metodología, patología, fábrica.

Hitz gakoak: Arkua, bobeda, kupula, egitura mailatu tridimentsionala, arriskua, metodologia, patologiak, fabrika.

Key words: Arch, vault, dome, three-dimensional mesh structure, risk, methodology, pathology, masonry.

Agradecimientos:

Este trabajo ha sido realizado en el marco de las actividades del grupo de investigación del Gobierno Vasco" IT781-13 e IT1314-19"

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	CONTEXTO.....	2
2.1	HISTORIA DE LA NORMATIVA DE LA CONSTRUCCIÓN EN ESPAÑA	2
2.2	METODOLOGÍA ANÁLISIS DE RIESGO	4
3	OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO	8
3.1	ALCANCE DEL TRABAJO.....	8
3.2	OBJETIVOS.....	8
3.2.1	Objetivo principal	8
3.2.2	Objetivos secundarios	9
4	BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO.....	10
4.1	BENEFICIOS PERSONALES	10
4.2	BENEFICIOS TÉCNICOS	10
5	ESTADO DEL ARTE	12
6	DESARROYO DEL TRABAJO	16
6.1	ARCOS, BÓVEDAS Y CÚPULAS.....	16
6.1.1	Definición y función de los elementos constructivos.....	16
6.1.2	Composición	21
6.1.3	Materiales.....	23
6.1.4	Puesta en obra y ejecución.....	24
6.1.5	Causas y daños.....	24
6.2	ESTRUCTURAS TRIDIMENSIONALES MALLADAS.....	34
6.2.1	Definición y función de los elementos constructivos.....	34
6.2.2	Composición	34
6.2.3	Materiales.....	35
6.2.4	Puesta en obra y ejecución.....	35
6.2.5	Causas y daños.....	36
6.3	INCUMPLIMIENTO DE NORMATIVA.....	40
6.4	METODOLOGÍA EVALUACIÓN DEL RIESGO	42
6.4.1	Exposición	44
6.4.2	Frecuencia.....	45
6.4.3	Consecuencias	46
6.5	APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA	47
6.5.1	Catedral de Santa María Vitoria-Gasteiz	47

6.5.2	Catedral de San Antolín de Palencia.....	52
7	METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO	56
7.1	DESCRIPCIÓN DE TAREAS.....	56
7.2	DIAGRAMA DE GANTT	58
8	ASPECTOS ECONOMICOS	60
9	CONCLUSIONES.....	62
	BIBLIOGRAFÍA.....	64
	ANEXO I.....	67

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tabla que establece la relación entre frecuencia y exposición.	43
Tabla 2. Tabla que establece la relación entre la probabilidad de daño y las consecuencias.....	43
Tabla 3. Tabla que establece la relación entre frecuencia y exposición.	51
Tabla 4. Tabla que establece el riesgo.....	52
Tabla 5. Tabla que establece la relación entre frecuencia y exposición.	54
Tabla 6. Tabla que establece el riesgo.....	55
Tabla 7. Horas internas.....	60
Tabla 8. Amortizaciones.	60
Tabla 9. Gastos.....	61
Tabla 10. Coste total.....	61

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Esquema piramidal de la reglamentación.	3
Ilustración 2. Esquema de actividades en la gestión de riesgos.	5
Ilustración 3. Puente de arcos	6
Ilustración 4. Puente atirantado.....	6
Ilustración 5. Diagrama simplificado de fuerzas en un arco.	16
Ilustración 6. Variación de las reacciones en los apoyos dependiendo del tipo de arco.	17
Ilustración 7. Bóveda de cañón.	18
Ilustración 8. Bóveda de aristas.....	19
Ilustración 9. Bóveda de crucería.	19
Ilustración 10. Comparativa de esfuerzos de una dovela de un arco y una cúpula.....	20
Ilustración 11. Componentes del arco.....	21
Ilustración 12. Elementos de una bóveda de cañón.	22
Ilustración 13. Esquema de los elementos de una cúpula.	23
Ilustración 14. Variedad de estribos dependiendo del tipo de arco.	25
Ilustración 15. Línea de empuje de un arco.	26
Ilustración 16. Fisuras en el arco.	27
Ilustración 17. Fisuras en arco por apertura de apoyos.....	28
Ilustración 18. Fisura como consecuencia de un error de asentamiento.	29
Ilustración 19. Deterioro de dovelas de piedra.....	31
Ilustración 20. Deterioro de la madera como consecuencia de la aparición de carcoma.	31
Ilustración 21. Daño por pérdida de mortero en las uniones de las dovelas.....	32
Ilustración 22. Fisuras como consecuencia de la retracción hidráulica del hormigón. ..	33
Ilustración 23. Defectos en la unión del arco con el pilar y arco contiguo que lo sustentan.	34
Ilustración 24. Unión esférica.....	35

Ilustración 25. Colapso estadio deportivo en Girona.....	36
Ilustración 26. Estadio Balaídos, Vigo.....	37
Ilustración 27. Efectos de la corrosión en la unión de barras.	38
Ilustración 28. Deformación en la placa alrededor de la posición del tornillo.	39
Ilustración 29. Bóvedas y arcos apuntados.	48
Ilustración 30. Arcos codales.	49
Ilustración 31. Bóveda catedral de Palencia.....	53

ACRÓNIMOS

AMFE	Análisis Modal de Fallos y Efectos
AMFEC	Análisis Modal de Fallos, Efectos y su Criticidad
CTE	Código Técnico de la Edificación
DB SE	Documento Básico - Seguridad Estructural
DB SE-AE	Documento Básico - Seguridad Estructural - Acciones en la edificación
DB SE-A	Documento Básico - Seguridad Estructural - Estructuras de acero
DB SE-F	Documento Básico - Seguridad Estructural - Estructuras de fábrica
DB SE-M	Documento Básico - Seguridad Estructural - Estructuras de madera
DB SE-C	Documento Básico - Seguridad Estructural - Cimentaciones
DB SI	Documento Básico - Seguridad en caso de Incendio
DB SUA	Documento Básico - Seguridad de Utilización y Accesibilidad
DB HE	Documento Básico - Ahorro de Energía
DB HR	Documento Básico - Protección frente al Ruido
DB HS	Documento Básico - Salubridad
EHE	La Instrucción del hormigón estructural
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
LOE	Ley de Ordenación en la Edificación
NBE	Normas Básicas de la Edificación
TFG	Trabajo de Fin de Grado
UNE	Una Norma Española.

1 INTRODUCCIÓN

Mediante este documento se presenta un trabajo de fin de grado desarrollado en la Escuela de Ingeniería de Bilbao incluido en el grado en Ingeniería Tecnología Industrial. Dentro de las diferentes ramas de la ingeniería este proyecto se centra en el área de Ingeniería de la Construcción y, más concretamente, en la evaluación del riesgo de daños técnicos en edificación, concretamente daños estructurales. Como eje principal del trabajo, se analizan las posibles patologías que pueden aparecer en diferentes elementos constructivos. En este caso, estructuras tridimensionales como los arcos, cúpulas, bóvedas y estructuras tridimensionales malladas.

Con el análisis de estas patologías, se busca establecer una metodología que permita evaluar los riesgos de las diferentes soluciones constructivas.

El riesgo es una herramienta de medida de la probabilidad de daño y de las consecuencias que pueden surgir ante una situación peligrosa, esta definición es la establecida mediante la norma ISO 31010. Dentro del riesgo hay que diferenciar dos aspectos. Por un lado, la posibilidad de que suceda el daño en función de las características constructivas y del entorno. Por otro lado, su criticidad.

Gracias a esta evaluación del riesgo, se establecen unos criterios de actuación ante los diferentes daños, dando más importancia a los calificados de alto riesgo. Como consecuencia, el nivel de seguridad en las estructuras se ve aumentado.

A modo de ejemplo, se aplica la metodología establecida a dos casos reales como son la catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz y la catedral San Antolín de Palencia.

El presente trabajo también incluye una planificación de tareas y presupuesto.

Por último, se establecen unas conclusiones mediante las cuales se prueba la eficacia de la metodología establecida.

2 CONTEXTO

En el contexto de este trabajo se analiza desde dos puntos de vista: la evolución histórica de la normativa aplicable y la metodología de análisis de riesgos de daños técnicos o edificación que se ha utilizado.

2.1 HISTORIA DE LA NORMATIVA DE LA CONSTRUCCIÓN EN ESPAÑA

Como un factor a tener en cuenta en la construcción, uno de los primeros documentos fue NBE (Normas Básicas de la Edificación, 1988) la cual garantizaba una buena práctica constructiva. Posteriormente en 1999 aparece el LOE (Ley de Ordenación en la Edificación) [6]. Esta Ley aparece ante la necesidad de regular el sector de la construcción y proteger al usuario final, ya que la construcción comienza a ser uno de los sectores principales de la actividad económica en España [13]. Mediante el NBE se consigue unir todas las normas existentes hasta el momento en relación con la construcción. Pero será el LOE la que regulará los aspectos más importantes a la hora de edificar y establecerá tanto las obligaciones y responsabilidades de los diferentes participantes. La LOE a su vez dará paso al Código Técnico de la Edificación (CTE).

La LOE se promulga con el objetivo de regular diferentes aspectos del área de la construcción que hasta entonces eran indefinidos. Por ejemplo, establecer obligaciones y responsabilidades dentro de los participantes del proyecto, requisitos básicos para asegurar el adecuado desarrollo de la obra, las garantías, etc.

Los requisitos básicos que establece la LOE son los siguientes [2], [6]:

- Funcionalidad: Utilización, accesibilidad y acceso a los servicios de telecomunicación, audiovisuales y de información.
- Habitabilidad: Higiene, salud y protección del medio ambiente, protección contra el ruido, ahorro de energía y aislamiento térmico y otros aspectos funcionales.
- Seguridad: Estructural, en caso de incendio y de utilización.

En el año 2006 se crea el CTE (Código Técnico de la Edificación) en respuesta a la LOE. Este marco normativo presentará las exigencias básicas que debe cumplir un edificio. Frente a su predecesor presenta una novedad, esta ley se encargará de comprobar que el edificio tiene las aptitudes necesarias para cumplir la función para la que ha sido diseñado.

Actualmente los requisitos básicos de la LOE y el CTE conforman la documentación básica que cualquier edificio. En la Ilustración 1 se aprecia los niveles de importancia entre la LOE y el CTE [11].

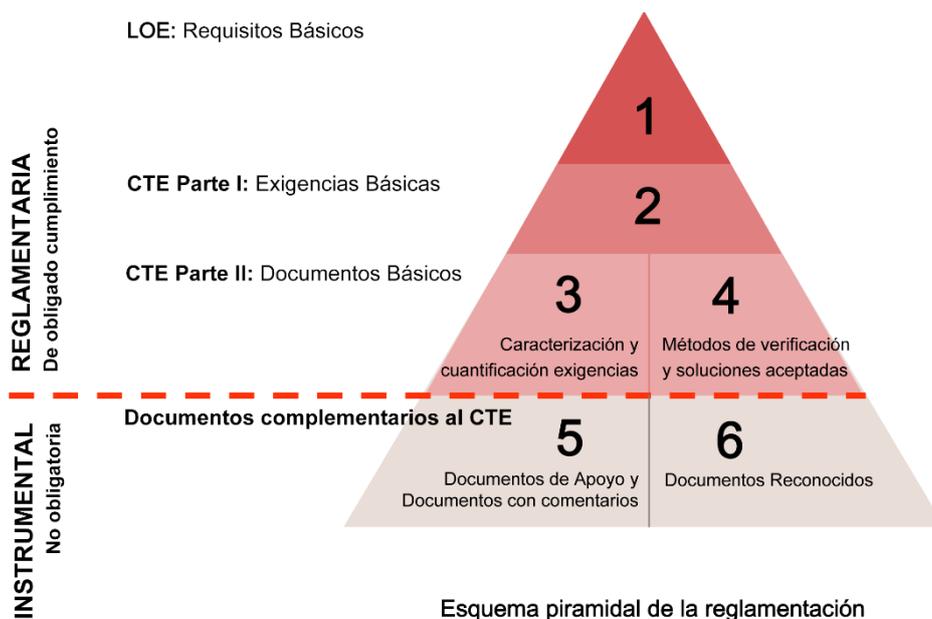


Ilustración 1. Esquema piramidal de la reglamentación.
Fuente: CTE-Código Técnico de la Edificación

Dentro de CTE Parte I se encuentran los requisitos básicos y en la Parte II se especifican las prestaciones a través de los documentos básicos, los cuales se agrupan de la siguiente manera:

DB SE: Seguridad estructural:

- **DB SE-AE:** Acciones en la edificación.
- **DB SE-A:** Estructuras de acero.
- **DB SE-F:** Estructuras de fábrica.
- **DB SE-M:** Estructuras de madera.
- **DB SE-C:** Cimentaciones.

DB SI: Seguridad en caso de incendio.

DB SUA: Seguridad de utilización y accesibilidad.

DB HE: Ahorro de energía.

DB HR: Protección frente al ruido.

DB HS: Salubridad.

2.2 METODOLOGÍA ANÁLISIS DE RIESGO

La metodología utilizada en este Trabajo de Fin de Grado se apoya en las normas “UNE-ISO 31000 marzo 2018. Gestión del riesgo. Directrices”, “UNE-EN 31010 mayo 2011. Gestión del riesgo. Técnicas de apreciación del riesgo” y “UNE-EN IEC 60812:2018 Análisis de los modos de fallo y sus efectos (AMFE y AMFEC)”. Estos documentos proporcionan una herramienta para la gestión de riesgo en cualquier ámbito. En este trabajo se adaptan dichas normas al análisis de riesgo en diferentes elementos constructivos.

La figura (Ilustración 2) siguiente establece el marco conceptual de la gestión de riesgos, estableciendo 3 etapas principales [12]:

- **Establecimiento del contexto.** En este apartado, se establece el alcance de la evaluación y los parámetros de gestión del riesgo.
- **Evaluación de riesgos:** En este apartado, se identifica y analiza el riesgo mediante unos parámetros previamente establecidos, como pueden ser la frecuencia, exposición, etc.
- **Tratamiento de los riesgos:** En este apartado, se establecen las medidas que se van a realizar para reducir la probabilidad del daño y disminuir sus consecuencias.

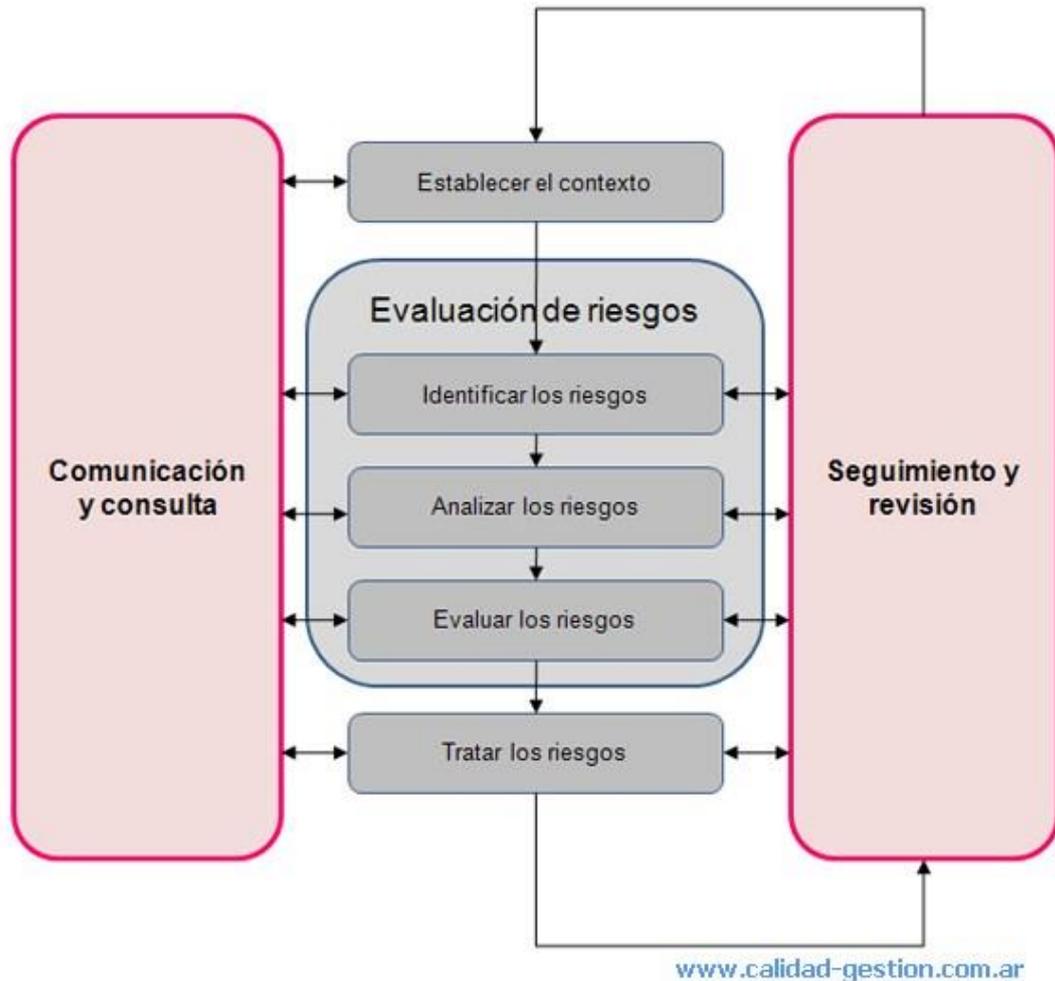


Ilustración 2. Esquema de actividades en la gestión de riesgos.

Fuente: www.calidad-gestion.com.ar

Este trabajo se centra en la Evaluación de riesgos. Dentro de la evaluación se diferencian tres fases:

1. **Identificación de riesgos:** Se identifican los diferentes riesgos que pueden existir para cada elemento constructivo. En este TFG se tienen en cuenta solamente los riesgos relacionados con el funcionamiento estructural.
2. **Análisis de riesgos:** En esta metodología el análisis de riesgo se define mediante dos factores: su probabilidad y sus consecuencias. El análisis y estimación de la probabilidad del riesgo se realiza en base al criterio experto, estableciendo la probabilidad como la relación de dos factores: la exposición del elemento a su entorno (clima, geografía, etc.) y la frecuencia del suceso. El

análisis de las consecuencias se realiza asumiendo que se ha producido el suceso y se analiza el impacto que tendría.

$$RIESGO = \text{PROBABILIDAD DE DAÑO} \times \text{CONSECUENCIAS}$$

$$\text{EXPOSICION (entorno)} \times \text{FRECUENCIA}$$

Por ejemplo, si tuviéramos dos puentes con similar tráfico de vehículos y conectando ciudades equivalentes, en ambos casos las consecuencias por su colapso serían similares, la interrupción de las comunicaciones entre las dos ciudades. En cambio, a la hora de analizar la probabilidad de daño habría diferencias. Mientras que el primero (Ilustración 3) es más sensible a la exposición a riadas, el segundo (Ilustración 4) tiene una mayor exposición a vientos de alta velocidad. Igualmente, habría que analizar con qué frecuencia ocurren los dos fenómenos meteorológicos. Después de ese análisis se podría establecer qué puente tendría menos riesgo dependiendo del lugar en el que se quiera construir.

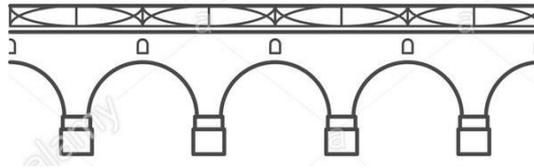


Ilustración 3. Puente de arcos

Fuente: <https://www.alamy.es/tipos-de-puentes-en-conjunto-estilo-lineal-icono-infograficos-de-puentes-image185367077.html>

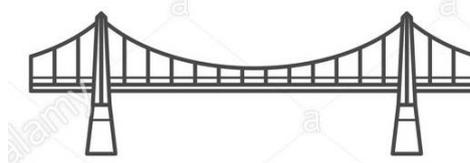


Ilustración 4. Puente atirantado

Fuente: <https://www.alamy.es/tipos-de-puentes-en-conjunto-estilo-lineal-icono-infograficos-de-puentes-image185367077.html>

Para la evaluación de las consecuencias asociadas a cada riesgo se analizan los diferentes aspectos que se ven afectados por éste, como pueden ser el incumplimiento del reglamento de la construcción o el efecto en otros elementos de la solución constructiva.

Tanto la probabilidad de daño como las consecuencias se clasifican mediante un método cualitativo por el cual se establecen la categoría del daño o consecuencia según una escala.

3. **Evaluar los riesgos:** El objetivo de la evaluación de los riesgos es establecer unas prioridades de intervención, a través de la clasificación de los riesgos planteados inicialmente en diferentes niveles de importancia.

3 OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO

En este apartado se definen los objetivos del trabajo y su alcance. Primero, se define los límites de este trabajo. Después, los objetivos se dividen en objetivos principales y secundarios.

3.1 ALCANCE DEL TRABAJO

En este Trabajo de Fin de Grado se plantea el análisis de diferentes elementos tridimensionales. Los elementos tridimensionales que se analizan son: el arco, la bóveda, la cúpula y las estructuras tridimensionales malladas. Estos elementos constructivos forman un conjunto de estructuras muy comunes en el mundo de la edificación.

Para cada uno de esos elementos se plantean diferentes daños que pueden aparecer en ellos. La recopilación de daños se focalizará en daños estructurales, como las sobrecargas o los asentamientos. De la misma forma, cada daño se acompaña de una explicación sobre su causa y de las normativas españolas vigentes que se incumplirían en caso de producirse.

Por último, se evalúa el riesgo de cada daño. Para ello se evalúan tanto el impacto y consecuencias del daño como la probabilidad de que se produzca. La estimación de la probabilidad de que este se produzca se realiza mediante el análisis de la exposición a las diferentes amenazas y la frecuencia de las mismas.

3.2 OBJETIVOS

3.2.1 Objetivo principal

El objetivo principal es conseguir minimizar los daños técnicos con mayor riesgo para cada elemento. Al fin y al cabo, en el mundo de la construcción, siempre se busca la eficiencia económica y una buena gestión de los recursos (tiempo, maquinaria, trabajadores, etc.). Para ello ante una situación de riesgo es necesario saber cuál es el daño con mayor riesgo y el que mayor impacto tendrá en los demás elementos con el objetivo de evitarlos.

3.2.2 Objetivos secundarios

- Una mayor comprensión del funcionamiento de los elementos estructurales. Para crear la lista de los diferentes daños estructurales es necesaria una buena comprensión del comportamiento estructural cada elemento.
- Conocer los elementos secundarios de los que está formada cada estructura tridimensional.
- Comprender como los diferentes materiales de construcción (piedra, madera, metal y hormigón) pueden afectar en la aparición de daños estructurales.
- Ampliar el conocimiento en lo relacionado con el análisis del riesgo, tanto en lo relativo a los diferentes métodos de análisis que existen, como de la normativa vigente.

4 BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO

En este apartado se explican los beneficios que aporta el trabajo. Tanto los beneficios personales que le proporciona al estudiante como los beneficios técnicos.

4.1 BENEFICIOS PERSONALES

En este trabajo la alumna ha podido ampliar su conocimiento del campo tecnológico de la construcción, un área que apenas se trata en el grado de Ingeniería en Tecnología Industrial.

Las asignaturas de mayor conexión con el ámbito de la construcción aparecen en los últimos años del grado, como son Cálculo Elástico de Sólidos en 3º y Teoría de Estructuras y Construcción en 4º. Por lo tanto, los estudiantes que se deciden por esta rama de la ingeniería suelen ser muy pocos, ya que hay un gran desconocimiento de los conocimientos que requiere este campo de especialización. A su vez, también existe un desconocimiento acerca de las salidas laborales que puede ofrecer el estudiar esta especialidad en el máster.

Gracias a este trabajo la alumna ha podido conocer las aplicaciones reales de los conocimientos aprendidos y comprender cuál es el papel de la ingeniería industrial en el ámbito de la edificación. Un sector que hasta ahora siempre se había creído dominado principalmente por la arquitectura.

4.2 BENEFICIOS TÉCNICOS

El resultado de este TFG proporciona un marco de referencia que simplifica la gestión de riesgos asociados a los elementos estructurales en la edificación, ya que a nivel estructural se expresan de una forma precisa y completa todos los peligros que pueden aparecer.

Cada daño es relacionado con su causa, y a su vez se expresa que parte de la normativa española de la construcción incumple cada uno. Por último, se analiza el nivel de riesgo que aporta ese daño.

Como se ha expresado en los objetivos, el lector obtiene la información necesaria para saber cuál es el mayor riesgo que sufre su estructura y de esa forma garantizar la estabilidad del mismo y evitar su colapso.

5 ESTADO DEL ARTE

Existe una gran variedad en lo que se refiere al análisis de riesgo, ya que se trata de una área muy extensa dentro de la construcción. Previamente en el apartado 2.2 “Metodología análisis de riesgo” se explica cómo la metodología propuesta se apoya en diferentes normas. Este apartado tiene como objetivo explicar esas previas. También se justifica la necesidad de crear la metodología que se presenta en este trabajo y en qué aspectos difiere de las mencionadas en el apartado 2.2.

UNE-ISO 31000 marzo 2018. Gestión del riesgo. Directrices.

Este documento proporciona herramientas para gestionar el riesgo. La aplicación de esta norma puede adaptarse a cualquier organización y su contexto. No es específica para el área de la construcción.

El análisis del riesgo considera factores tales como:

- La probabilidad de los eventos y de las consecuencias.
- La naturaleza y la magnitud de las consecuencias.
- La complejidad y la interconexión.
- Los factores relacionados con el tiempo y la volatilidad.
- La eficacia de los controles existentes.
- Los niveles de sensibilidad y de confianza.

A su vez, una vez hecho el análisis del riesgo se hace una comparativa de los resultados conseguidos y de los criterios previamente establecidos. En esos criterios se decide a partir de qué nivel de riesgo se debe actuar. Una vez hecha esa comparativa se identifican diferentes formas de actuar.

Hay diferentes decisiones que se pueden tomar:

- No hacer nada más.
- Considerar opciones para el tratamiento del riesgo.
- Realizar un análisis adicional para comprender mejor el riesgo.
- Mantener los controles existentes.
- Reconsiderar los objetivos.

Si se decide actuar ante el riesgo hay una variedad de formas de hacerlo:

- Evitar el riesgo decidiendo no iniciar o continuar con la actividad que genera el riesgo.
- Eliminar la fuente de riesgo.
- Modificar la probabilidad.
- Modificar las consecuencias.
- Compartir el riesgo (por ejemplo: a través de contratos, compra de seguros).
- Retener el riesgo con base en una decisión informada.

UNE-EN 31010 mayo 2011. Gestión del riesgo. Técnicas de apreciación del riesgo.

Como se aprecia en el nombre de la norma, esta aparece como apoyo a lo ISO 31000.

Dentro de la estimación de la probabilidad, en esta norma se plantean diferentes formas de estimar el riesgo aparte del criterio experto que es el seleccionado para la metodología planteada. Se trata del uso de datos históricos o datos basados en la experiencia. En ambos casos, el criterio para establecer la probabilidad se basa en hechos ocurridos previamente. Para ello se establecen unas similitudes entre la estructura que se analiza y estructuras similares de las que se tengan datos. Dentro de la obtención de datos basados en la experiencia, también existe la posibilidad de utilizar técnicas de simulación.

Aparte del método cualitativo, que es el que se ha utilizado en este trabajo, esta norma presenta otros dos métodos; cuantitativos y semicuantitativos.

- En el caso del método semicuantitativo, se utiliza una escala numérica, la cual puede ser logarítmica o lineal.
- En el caso del método cuantitativo, establece valores reales para las consecuencias y sus probabilidades, y obtiene valores del nivel de riesgo en unidades específicas acordadas cuando se desarrolla el contexto.

UNE-EN IEC 60812:2018 Análisis de los modos de fallo y sus efectos (AMFE y AMFEC)

Es un proceso de análisis para identificar los modos de fallo potenciales, sus causas y efectos en un sistema. Es iterativo y conforme avanza el análisis se puede ir actualizando.

En AMFE se establece un nivel jerárquico de los elementos más básicos. El análisis se hace desde el daño de nivel más bajo hasta el más alto, hasta conseguir el efecto final. Por ejemplo, en el caso del arco, primero se escoge un daño como el error en el mortero de unión. A partir de ahí se ve como ese mortero afectara en las dovelas, no creando una unión uniforme entre ellas. Eso genera desplazamientos en las dovelas, lo cual crea un desplazamiento de la línea de empuje y una posibilidad de colapso de la estructura. Se empieza desde un daño de nivel bajo como es un error en el mortero, hasta un daño final de gran importancia como es el colapso de la estructura.

Existe una variante de ese método llamada AMFEC. Este método incluye herramientas que permiten valorar la criticidad de cada fallo de tal forma que se puedan establecer prioridades a la hora de actuar ante los fallos. Para conseguir la criticidad se hace una combinación de la severidad y la frecuencia, eso se consigue mediante el NPR.

Uno de los métodos que se utiliza en este tipo de análisis es el NPR (Numero de Prioridad el Riesgo). La fórmula que sigue es la siguiente:

$$NPR = S \times O \times D$$

- **S:** Severidad, cuantifica el nivel de impacto que tiene sobre el usuario o el sistema.
- **O:** Probabilidad de fallo dentro de un periodo de tiempo establecido.
- **D:** Nivel de detección, con qué facilidad es evitable ese fallo.

Cada fallo obtiene un número NPR. Una vez se analizan todos los fallos el que tiene un valor mayor de NPR es el más crítico y el que hay que priorizar a la hora de actuar.

En comparación con las normas ISO31000 Y EN31010 la metodología escogida requiere de unas variaciones. Esta se plantea para una situación en la que se carecen de datos reales acerca de los daños y causas en los elementos constructivos. A su vez, son fenómenos muy bien conocidos por los expertos del sector, por lo que no requiere de ninguna base de datos de patologías previas. La obtención de esos datos de experiencias previas son difíciles de conseguir y no siempre se tiene acceso a ellos. Por esa razón, se ha tomado la decisión de optar por el criterio experto y un método cualitativo.

La gran diferencia entre el método que se ha utilizado en este trabajo y el AMFEC es que este último tiene en cuenta el factor D, nivel de detección. Los elementos escogidos (arcos, bóvedas, cúpulas y tridimensionales malladas) suelen estar en lugares de fácil acceso por lo que no se ha visto necesario el uso de la variante del nivel de detección. Por ejemplo, si se tiene una viga de fácil acceso ese valor D será bajo, ya que en el momento que aparece el fallo en la viga aparecen unas gritas que ayudan a la detección del fallo. En cambio, si esa viga esta oculta, ese valor D será alto, ya que solo se encontrará el fallo una vez sea grave y afecte a otros elementos o a la estructura.

Los elementos escogidos (arcos, bóvedas, cúpulas y tridimensionales malladas) suelen estar en lugares de fácil acceso ya que muchas veces no solo cumplen la importante función estructural si no que se utilizan con un fin estético. Es por eso que no se ha visto necesario el uso de la variante del nivel de detección.

Existen diferentes tipos de normativas que pueden guiar a las empresas y entidades a la hora de evaluar el riesgo. Estas normativas tienen un carácter genérico ya que su objetivo es poder ser aplicables en diferentes sectores, ya sea a la hora de evaluar un edificio o el crear una pieza en serie de un automóvil. Es por ello, que aparece la necesidad de crear una metodología que se centre en un sector en concreto, en este caso el de la construcción, y más específicamente relacionado con el riesgo estructural.

6 DESARROJO DEL TRABAJO

En este apartado se describe la solución propuesta. Para ello, la solución se ha dividido en los diferentes elementos constructivos que se estudian. Dentro de cada uno se hace una pequeña introducción del elemento y su análisis de daños.

Posteriormente se explica la metodología de análisis de riesgo que se ha establecido y se aplica a dos casos reales como son la catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz y la catedral San Antolín de Palencia.

6.1 ARCOS, BÓVEDAS Y CÚPULAS

6.1.1 Definición y función de los elementos constructivos

ARCOS

El arco es un elemento constructivo que lleva siglos siendo utilizado por el ser humano en sus construcciones: puentes, catedrales, viaductos, presas, etc.

Se trata de un elemento que trabaja en su totalidad a compresión, minimizando al máximo la existencia de flexión. Gracias a esa propiedad, se trata de una estructura muy segura para distribuir las cargas de a través de sus dovelas hasta llegar a los apoyos de este.

Mediante la siguiente Ilustración 5 se expresa de una forma simplificada las fuerzas que soporta el arco. Por un lado, las fuerzas verticales (representadas en verde) como el peso y las correspondientes reacciones de los apoyos. Por otro lado, las reacciones horizontales que aparecen los apoyos (representadas en rojo).

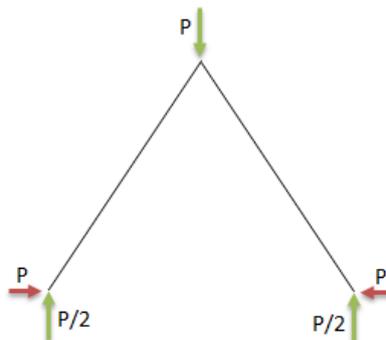


Ilustración 5. Diagrama simplificado de fuerzas en un arco.

El valor y dirección de esas fuerzas horizontales que se generan en el arco dependerán de la carga y la curvatura de este, de forma que cuanto más abierto es el arco las fuerzas horizontales son mayores. Por ejemplo el arco de medio punto (Ilustración 6 primer arco) frente al arco apuntado (Ilustración 6 tercer arco) necesitara de unos estribos más grandes ya que el componente horizontal de su reacción en el estribo es mayor que en el caso del apuntado.

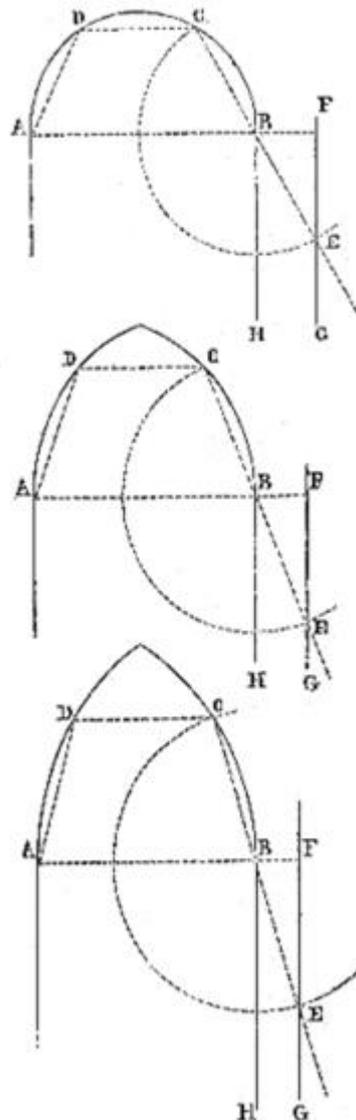


Ilustración 6. Variación de las reacciones en los apoyos dependiendo del tipo de arco.

Por esto se necesita de unos elemento en los extremos del arco que sean capaces de soportar esos esfuerzos y detener la tendencia natural del arco a abrirse.

BÓVEDAS

Es fácil establecer una conexión entre los arcos y las bóvedas, ya que mediante las diferentes uniones de arcos se consiguen las bóvedas. En cambio, la bóveda presenta una gran diferencia frente al arco. El arco y la bóveda transmiten la carga a través de esfuerzos de compresión, pero la bóveda a su vez sirve para cubrir grandes espacios.

Como se expresa en el apartado de definición de los arcos, en los estribos aparecen unas cargas horizontales que hacen que la bóveda tenga una tendencia a abrirse. A continuación se explican los tipos de bóvedas más significativas.

BÓVEDA DE CAÑÓN

Esta bóveda es una de las más simples, se basa en un arco de medio punto el cual se repite uno tras otro consiguiendo cubrir un espacio. En la Ilustración 7 se representa una bóveda de cañón apoyada en 4 pilares. Si es una bóveda de pequeña longitud los esfuerzos horizontales no son tan grandes y se pueden utilizar pilares y reforzar el primer y último arco. En cambio, si el arco es largo esos pilares son dos muros bastante gruesos ya que los esfuerzos horizontales son grandes.



Ilustración 7. Bóveda de cañón.

BÓVEDA DE ARISTA

La bóveda de aristas se genera mediante la intersección perpendicular de dos bóvedas de cañón. Esta tipo de bóveda se utiliza para cubrir espacios cuadrangulares.

Al colocar las dos bóvedas en los lados se reducen las cargas horizontales y eso permite que se pueda apoyar en 4 pilares generando un espacio más diáfano que en el caso de la bóveda anterior.

En la Ilustración 8 mediante las flechas rojas se expresan los esfuerzos horizontales que recibe el pilar. Este esquema se repite en todos los pilares.



Ilustración 8. Bóveda de aristas.

BÓVEDA DE CRUCERIA

En este caso el tipo de arco utilizado es un arco apuntado. Como se explica en el apartado de arcos, en este tipo de arco la curvatura es más inclinada y como consecuencia las fuerzas en los apoyos son mucho más verticales. A su vez, los pilares que lo sostienen se unen a través de otros arcos los cuales generaran una especie de armazón, el cual ayuda a que la bóveda sea más resistente. En la Ilustración 9 se expresa como son las reacciones en los pilares. Suponiendo que los arcos 1 y 3 son iguales entre ellos, anularan parte de sus reacciones. En cambio, hay que aumentar el tamaño del pilar en la dirección del arco 2 ya que ese esfuerzo horizontal es grande.

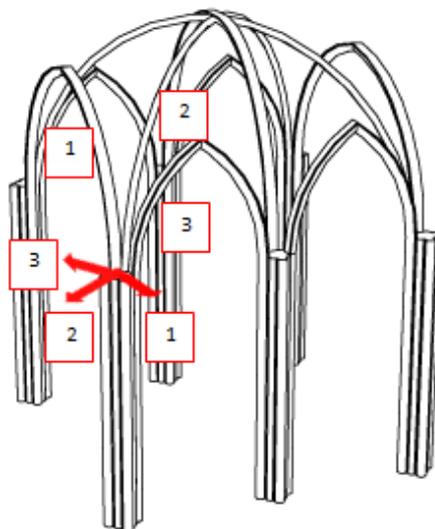


Ilustración 9. Bóveda de crucería.

CÚPULAS

Al igual que la bóveda la cúpula mantiene una estrecha relación con el arco, ya que la cúpula se genera al rotar un arco alrededor de un punto central.

La cúpula presenta una gran diferencia respecto a la bóveda y el arco, las dovelas que la conforman reciben esfuerzos en dos direcciones. En la Ilustración 10 se observa como los elementos de la cúpula son capaces de resistir esfuerzos en dos direcciones: paralela y meridiana.

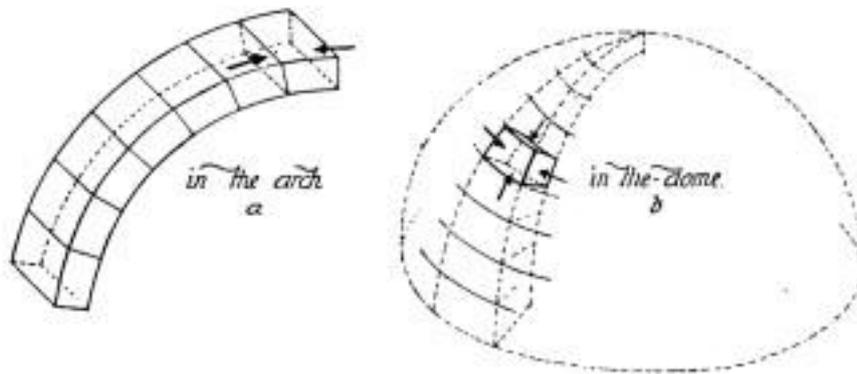


Ilustración 10. Comparativa de esfuerzos de una dovela de un arco y una cúpula

Fuente: "Arcos, bóvedas y cúpulas, geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica".
Santiago Huerta. Instituto Juan Herrera, ETSAM. Madrid, 2004)

A la hora de analizar el comportamiento de una cúpula se divide en dos planos principales:

El meridiano, donde están contenidos los arcos. En este plano, al igual que en el arco, las dovelas trabajan únicamente a compresión.

El paralelo, donde están contenidos los anillos que forman las dovelas.

Dentro de los planos paralelos que hay dentro de una cúpula hay uno llamado el "paralelo neutro". Ese plano, una vez aplicada la carga no, varía su diámetro. Por un lado, los paralelos por encima del neutro tienden a acortarse de tal forma que los paralelos quedan a compresión, evitando que los medianeros se desplacen hacia el interior. Por otro lado, los paralelos por encima del neutro tienden a ampliar su radio de tal forma que en los paralelos aparecen esfuerzos de tracción, para evitar que los medianeros se desplacen hacia afuera.

Gracias a la capacidad de los paralelos de evitar los desplazamientos de los meridianos, la cúpula se considera una estructura más estable que el arco.

6.1.2 Composición

ARCOS

En la Ilustración 11 se observan las diferentes partes que componen un arco. Cada una de las piezas que lo conforman se les llama dovelas (3). Dentro de estas, dependiendo su posición, pueden adquirir nombres diferentes o completar su nombre. La dovela que se coloca en el plano de simetría del arco se le denomina la dovela central o clave (5). En el caso de las colocadas en los apoyos son las dovelas basales o salmers (2). Por último, las próximas a los apoyos son los riñones (11).

Las superficies de un arco toman el nombre de intradós (6) y extradós (7), siendo la primera la generada en el interior y la segunda en el exterior.

Para definir las dimensiones del arco interior son necesarias la luz (9) y la flecha (10). La luz es la distancia entre los apoyos y la flecha la distancia entre la base del arco y la clave.

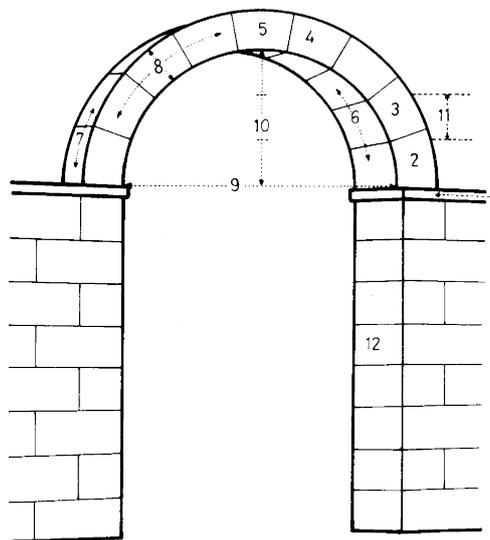


Ilustración 11. Componentes del arco.

Fuente: http://escuela2punto0.educarex.es/Humanidades/Historia/la_obra_de_arte/arquitect/arco.htm

En los arcos se define la línea de empuje como el lugar geométrico de los puntos por los cuales pasan los esfuerzos en los planos de corte de cada dovela. Esta línea adquiere una gran importancia en el análisis del equilibrio de la estructura, ya que en el momento que esa línea sobresalga del área formada por el intradós y el extradós el arco pierde su equilibrio y existe la posibilidad de colapso.

BÓVEDAS

Los elementos explicados en el arco también son aplicables a los arcos utilizados en las bóvedas. Además, dependiendo del tipo de bóveda aparecen nuevos elementos.

En el caso de la bóveda de cañón existe el concepto de arcos fajones y arcos formeros (Ilustración 12). Los primeros son los que dividen la bóveda en varios tramos y descargan sobre los pilares. En el caso de los segundos, son paralelos al plano de simetría de la bóveda y unen los diferentes pilares.

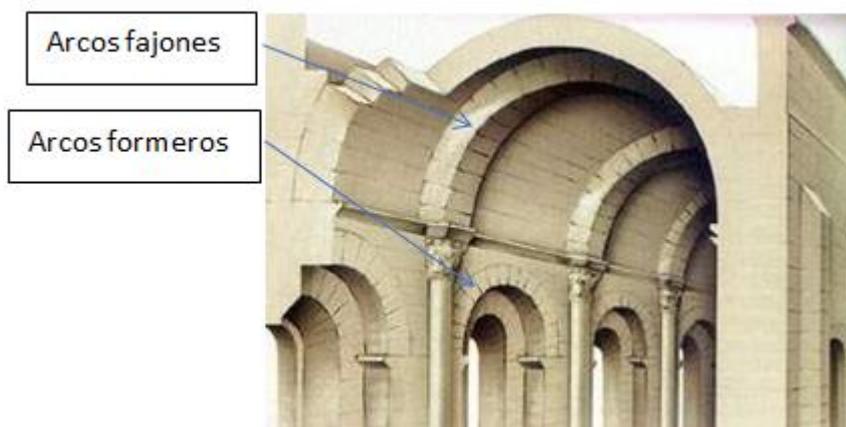


Ilustración 12. Elementos de una bóveda de cañón.

Fuente: Revista ARQHYS. 2012, 12. Bóveda de Cañón. Equipo de colaboradores y profesionales de la revista ARQHYS.com

En el caso de la bóveda de aristas, el arco fajón será el que este en la dirección principal de la bóveda y el formero en la perpendicular. Como su propio nombre indica las aristas son el conjunto de puntos que forman la intersección de las dos bóvedas de cañón.

En las bóvedas de crucería los arcos fajones también se conocen como perpiños. Los arcos diagonales, tan característicos de esta bóveda, se conocen como nervios.

CÚPULAS

En la Ilustración 13 se observan las diferentes partes de una cúpula convencional.

Algunas cúpulas en su parte superior tienen un elemento denominado linterna. Este elemento permite la entrada de luz al interior de la cúpula. Esa linterna se apoya en lo conocido como casquete, se trata de toda la parte exterior de la cúpula.

Debajo del casquete estará en tambor el cual se asemeja a un cilindro y es el encargado de soportar las reacciones en la base de la cúpula.

Por último, debajo del tambor en ocasiones se coloca un elemento llamado pechina. Consiste en un apoyo creado a base de arcos. Las patas de la pechina pueden ser verticales o pueden tener la misma curvatura de la cúpula, este último caso es muy frecuente en cubiertas de estadios deportivos.

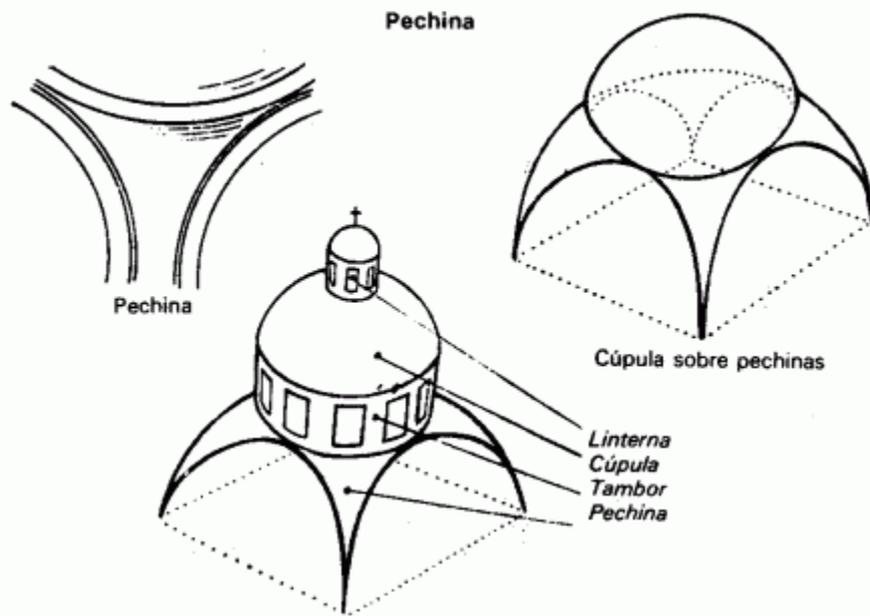


Ilustración 13. Esquema de los elementos de una cúpula.

Fuente: UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia.2014. Cubiertas arquitectónicas: la cúpula.
<https://historiasdelarteuned.wordpress.com/2014/12/24/cubiertas-arquitectonicas-la-cupula>

6.1.3 Materiales

El material más utilizado en estos elementos constructivos es la fábrica, dentro de la cual se encuentra el ladrillo, el adobe y la piedra. Para la unión de los diferentes elementos de fábrica se suele utilizar mortero húmedo.

Otra opción es el hormigón que al igual que la fábrica presenta una gran resistencia a los esfuerzos de compresión, mientras que frente a esfuerzos tracción se fisura con facilidad. En cambio, el uso de hormigón armado puede aumentar la resistencia a tracción de la estructura respecto a la fábrica.

En la arquitectura más moderna se han creado cúpulas nervadas de hormigón, cúpulas con estructuras metálicas combinadas con vidrio y membranas. Estas generalmente suelen ser cubiertas que no tienen que soportar grandes cargas.

6.1.4 Puesta en obra y ejecución

La ejecución de los arcos y bóvedas se realiza mediante la utilización de cimbras. La cimbra se encarga de soportar el peso de las dovelas hasta que se coloque la clave y el arco sea capaz de mantenerse en pie sin necesidad de la cimbra. Es indispensable que la cimbra sea capaz de soportar el peso que le es aplicado sin romperse ni deformarse y que exista un mecanismo que permita su retirada sin afectar al elemento. En un principio, solo se construían de madera, pero cada vez existen más tipos, como pueden ser las de perfiles metálicos.

En el caso de los arcos, bóvedas y cúpulas de hormigón se utilizan encofrados para adquirir la forma.

En las cúpulas de fábrica el sistema de construcción varia, la cimbra no es un elemento fundamental. La cúpula se trata de una solución constructiva la cual en el proceso de construcción puede sostenerse por sí misma antes de colocar la clave. Esto sucede gracias a los esfuerzos paralelos que evitan que las dovelas de los planos meridianos se desplacen.

6.1.5 Causas y daños

1. CAUSA: ERROR DE DIMENSIONADO

Mal dimensionado de la curvatura o cimbra: La curvatura del elemento puede estar mal diseñada por dos motivos diferentes. Por un lado, un mal dimensionado por parte de los encargados del diseño del arco. Por otro lado, un mal diseño de la curvatura de la cimbra o un mal posicionamiento de la misma, la cual afecta directamente en la curvatura del arco.

Una errónea curvatura del arco hace que las cargas se repartan de una forma no homogénea. Este reparto de las cargas está directamente relacionado con la forma que adquiere la línea de empuje, la cual en un estado de cargas adecuado tiene la forma de una catenaria invertida.

Mal dimensionado de los estribos: Los estribos son realmente el elemento final en la cadena de transmisión de cargas. Estos deben de tener la capacidad suficiente para aguantar las cargas verticales y horizontales.

En la Ilustración 14 se observa cómo dependiendo el tipo de arco que se va construir los estribos varían. Si se comparan dos casos extremos, como son el primer y último arco, se observa cómo cuanto el arco es más estrecho y vertical se necesita un estribo estrecho pero alargado. En cambio, si el arco es ancho y horizontal se necesita un estribo principalmente ancho y corto. El diseño del estribo tiene que depender del diseño del arco.

Cabe destacar que en el caso de los estribos esbeltos, como es el primer arco, aparece el inconveniente del pandeo. Hay que tenerlo en cuenta ya que en los estribos de los arcos se trabaja a compresión.

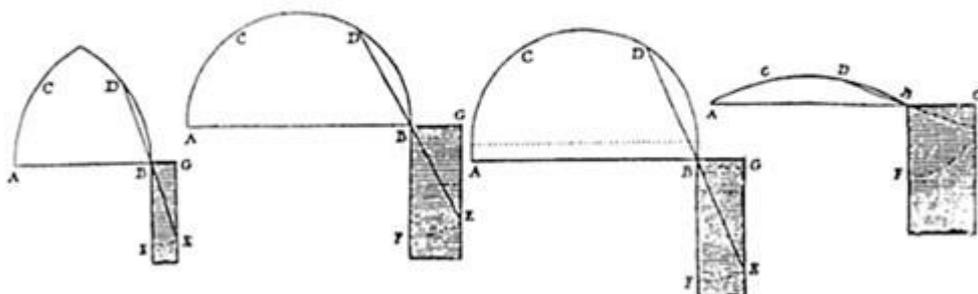


Ilustración 14. Variedad de estribos dependiendo del tipo de arco.

Fuente: "Arcos, bóvedas y cúpulas, geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica".
Santiago Huerta. Instituto Juan Herrera, ETSAM. Madrid, 2004

Cálculo erróneo de la carga y sobrecarga a soportar: Hay que tener en cuenta cuáles serán los límites que pueden soportar los estribos o los muros de sujeción. Si las cargas son mayores de las calculadas las reacciones tanto horizontales como verticales en los apoyos serán mayores de las que pueden soportar los estribos o los muros de sujeción.

Para el cálculo de la sobrecarga hay que hacer un análisis de los usos que va a tener la estructura en la que se va a encontrar el elemento. Por ejemplo, no es lo mismo el cálculo de la sobrecarga de un edificio de viviendas que el de un polideportivo. En el primero, el número de personas que va a haber o los elementos que se van a instalar (muebles, ascensores, etc.) es predecible. En cambio, un polideportivo dependiendo de su actividad, la afluencia de gente puede variar de una forma considerable.

Otro aspecto a tener en cuenta a la hora de calcular las sobrecargas es el entorno del elemento, como le van a afectar acciones como la del viento o la nieve, etc.

1. DAÑO: ERROR DE DIMENSIONADO

Como consecuencia de errores de en el dimensionado del elemento constructivo, las cargas no están repartidas homogéneamente a lo largo del mismo. Esto produce un desplazamiento de la línea de empuje. La línea de empuje (Ilustración 15) es una línea imaginaria que une todos los puntos por los que pasan los esfuerzos en los planos de contacto de las dovelas.

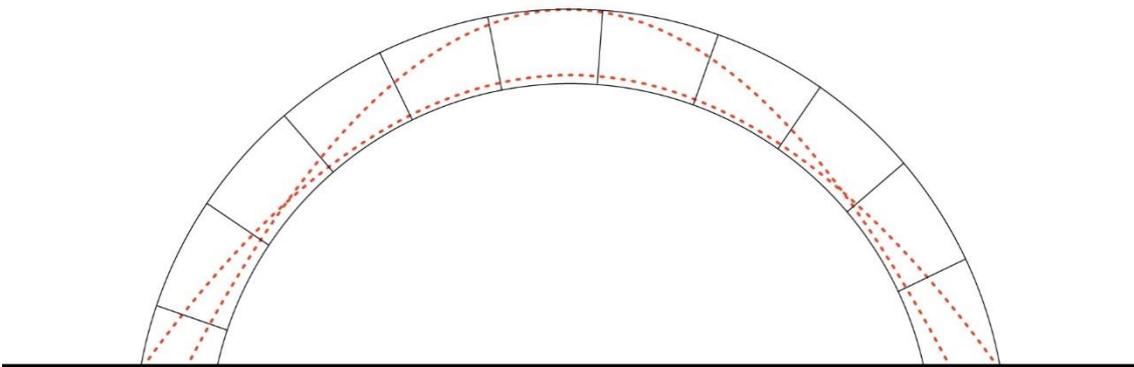


Ilustración 15. Línea de empuje de un arco.

Fuente: Baúl de arquitectura. ¿Por qué no se caen los arcos? Funcionamiento y evolución. 2014

Cuando esta línea de empuje se acerca a los límites establecidos por la fábrica (intradós y el extradós) es cuando empiezan a aparecer las fisuras. Siendo el límite el colapso de la estructura cuando la línea de empuje sale de los límites establecidos por el intradós y extradós.

Cuando la línea de empuje se desplaza hacia los límites de la fábrica, quiere decir que el punto de aplicación de la fuerza se desplaza. Eso generara una necesidad de flexión que a su vez hace que una parte de la sección trabaje a tracción. El arco y los esfuerzos tracción son dos conceptos totalmente incompatibles. Eso conlleva la aparición de articulaciones, las cuales, hacen que el arco se comporte como un mecanismo.

La respuesta del elemento constructivo ante esta sollicitación de flexión es diferente dependiendo de la gravedad.

Por un lado, el arco se va deformando, ya que el arco siempre busca una nueva posición de equilibrio de acuerdo a al nuevo reparto de cargas. También, tanto los estribos como los riñones sufren deformaciones cuando se les aplica cargas mayores a las que pueden soportar. En los casos en los que ese nuevo orden de las cargas haga que la línea de empuje toque los limiten de la fábrica, aparecen fisuras como se observa en Ilustración 16.

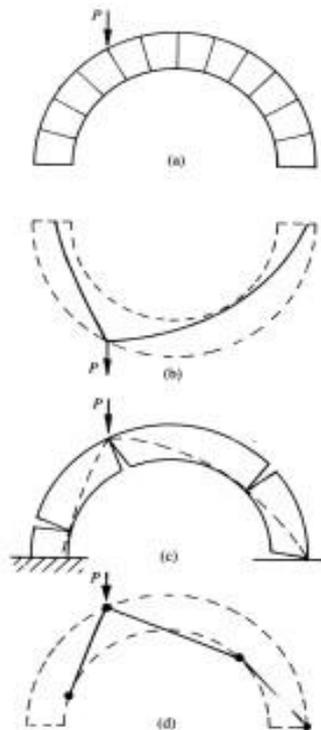


Ilustración 16. Fisuras en el arco.

Fuente: "Arcos, bóvedas y cúpulas, geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica".
Santiago Huerta. Instituto Juan Herrera, ETSAM. Madrid, 2004

Por otro lado, existirán los desplazamientos. Los estribos, aparte de deformarse, también pueden desplazarse. El arco de por si tiene la tendencia a abrirse, por lo tanto si los estribos o muros de contención no son capaces de detener ese movimiento, los estribos se ven desplazados hacia afuera por las fuerzas horizontales del arco. La apertura de estos apoyos trae también la aparición de fisuras. Éstas, en el caso de la clave, aparecen en el intradós, y en los riñones en el trasdós como se observa en Ilustración 17 [17].

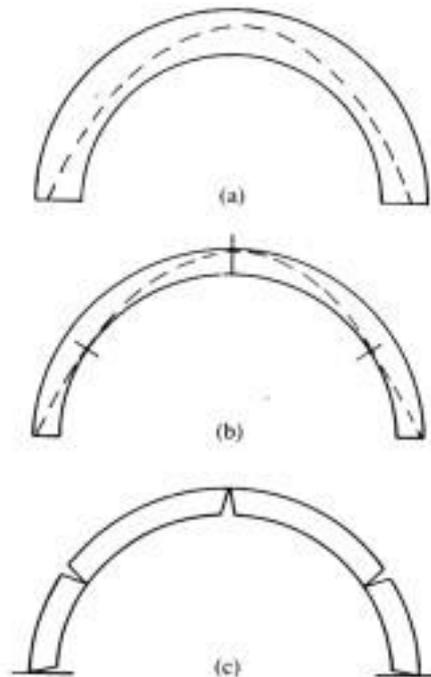


Ilustración 17. Fisuras en arco por apertura de apoyos.

Fuente: "Arcos, bóvedas y cúpulas, geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica".
Santiago Huerta. Instituto Juan Herrera, ETSAM. Madrid, 2004

Por último, la situación más grave es el colapso de la estructura. Esto se produce cuando la estructura funciona como un mecanismo. Por culpa de las rótulas que aparecen el arco comienza a cambiar de forma en busca del equilibrio.

2. CAUSA: SUELOS NO COMPETENTES

Cuando el suelo en el que está apoyado el elemento no es el adecuado se producen asentamientos. Se define como asentamiento el momento en el cual uno de los apoyos se desplaza verticalmente respecto a la posición inicial.

Esto sucede porque el elemento está situado en una zona con dos tipos de tierra diferente y esto hace que cada apoyo tenga un tipo de suelo diferente, con un

comportamiento y una tensión admisible diferente. Lo ideal es apoyar la cimentación directamente sobre roca, pero esto no siempre es posible, ya que dependiendo en la zona en la que se coloca la estructura, la roca se puede encontrar a muchos metros de profundidad.

Otra causa es, que el suelo de cada uno de los apoyos tenga un nivel de humedad desigual o unas propiedades resistentes diferentes. La humedad hace que el suelo sea menos resistente, por lo tanto sea más probable la existencia de un asentamiento.

2. DAÑO: SUELOS NO COMPETENTES

Hay dos tipos diferentes de asentamientos, el asiento puntual y el asiento continuo.

Como su propio nombre indica el asiento puntual es cuando solamente una pequeña sección del apoyo se desplaza. En ese caso aparecen fisuras en forma de V. Si este asentamiento está en el centro de la sección la V es invertida y si está en una de las esquinas la V es normal [17].

En el caso de asiento continuo, hay un desplazamiento de toda la sección. En este caso, las fisuras forman líneas que adquieren diferentes formas dependiendo de qué zona de la sección se desplace [17].

A su vez, al haber un desplazamiento la forma del arco varía generando fisuras (Ilustración 18) en el mismo, ya que la línea de empuje previamente mencionada se desplaza.



Ilustración 18. Fisura como consecuencia de un error de asentamiento.

Fuente: DIFECH Consolidaciones.

3. CAUSA: DETERIORO DE LOS MATERIALES

El deterioro de los materiales está estrechamente relacionado con el entorno que le rodea por el cual es atacado. Se pueden establecer dos tipos de ataques principales: los ataques físicos y los ataques químicos.

Dentro de los físicos, la humedad es uno de los grandes problemas. En el caso de la fábrica el agua genera una erosión y a su paso arrastrar material. Otro proceso con el cual se erosiona la fábrica es el ciclo de congelación-descongelación. La fábrica es un material poroso por lo cual el agua se introduce en esos poros y al congelarse se expande erosionando el material, posteriormente se descongela. Esto suele suceder en zonas de climas muy fríos y de cambios constantes.

Respecto a los ataques químicos los más importantes son la corrosión y el biodeterioro.

Por último, en el caso de un elemento constructivo de madera hay que prestar atención a la aparición de insectos en el mismo, como pueden ser las termitas o la carcoma, ya que crean una disminución importante de la cantidad de material.

3. DAÑO: DETERIORO DE LOS MATERIALES

El mayor efecto del deterioro del material es la pérdida del propio material (Ilustración 19, Ilustración 20). Eso hace que la sección que tiene que soportar las cargas se vea reducida. Las fisuras aparecen en el momento que haya esfuerzos de tracción. Por lo tanto, si la sección se ve disminuida las tensiones aumenta ya que las fuerzas son iguales. Eso hace que el material sea más fácil de fisurar.

También cabe mencionar el aumento de su propio peso que sufre la fábrica al mojarse por filtraciones o por humedad, ya que se trata de un material poroso y el agua se queda retenida. Ese aumento del propio peso del material genera una sobrecarga para la cual la estructura no está preparada llevándola a un colapso de la misma. Es por eso que en los incendios de estructuras de fábrica como pueden ser iglesias o edificios

antiguos siempre se debe tener un máximo cuidado con la cantidad de agua que se vierte y donde se aplica.



*Ilustración 19. Deterioro de dovelas de piedra.
Fuente: Itegranca*



*Ilustración 20. Deterioro de la madera como consecuencia de la aparición de carcoma.
Fuente: RTarquitectura. Inspección técnica de edificios & rehabilitación.*

4. CAUSA: ERROR DE LA PUESTA EN OBRA

A la hora de ejecutar los elementos constructivos tridimensionales de fábrica la unión entre dovelas se produce mediante mortero. Uno de los fallos que puede haber es que no se reparta homogéneamente a lo largo de toda la sección. Esto genera una discontinuidad de una dovela a otra haciendo que los elementos no apoyen bien y disminuye la sección de contacto entre las mismas.

En el caso que el material utilizado sea el hormigón, aparecen dos conceptos, el afogado y la retracción hidráulica del hormigón.

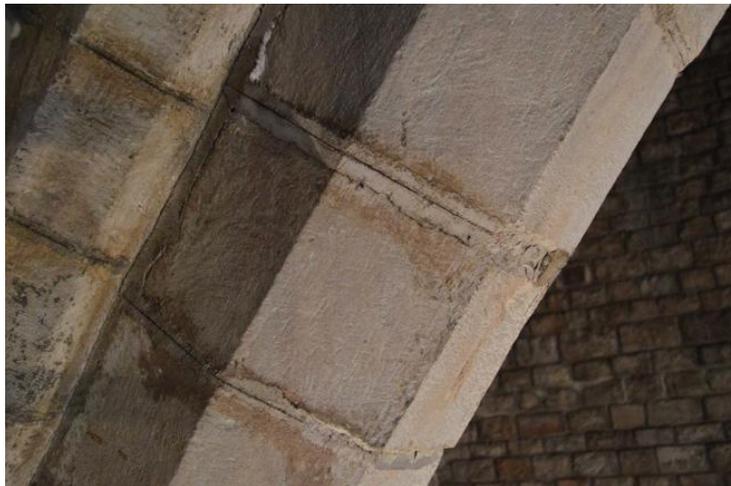
El afogado del hormigón se trata de un fuerte secado superficial (producido por tiempo seco, altas temperaturas o viento) produciendo que el hormigón sufra una disminución de su volumen y se contraiga

La retracción hidráulica del hormigón es la pérdida de agua del hormigón durante el fraguado del mismo, haciendo que el hormigón se contraiga.

El error también puede ser ocasionado por la falta de separadores o altura incorrecta de ellos, a la hora de hormigonar. Esto separadores se colocan en la base inferior del hormigón, de tal forma que queda un espacio entre el suelo y el hormigón. Gracias a esto se permite al hormigón un movimiento libre ante efectos como la retracción hidráulica.

4. DAÑO: ERROR DE LA PUESTA EN OBRA

En el caso del material de fábrica, si la ejecución de la unión de las dovelas no es adecuada hay desplazamientos de las mismas y las cargas de compresión no son transmitidas de unas a otras, invalidando el funcionamiento del arco. Como consecuencia, aparecen fisuras (Ilustración 21) y como daño más grave el colapso de la estructura.



*Ilustración 21. Daño por pérdida de mortero en las uniones de las dovelas.
Fuente: Ayuntamiento Barcelona/ Masala Consultors*

Para el caso de una mala puesta en obra del hormigón, aparecen efectos de tracción los cuales generan las fisuras (Ilustración 22). Si no se respeta el espacio establecido por los separadores el hormigón no tiene espacio de movimiento creando tensiones internas en el hormigón. El hormigón es un material de alta resistencia a compresión pero baja a tracción.



*Ilustración 22. Fisuras como consecuencia de la retracción hidráulica del hormigón.
Fuente: TolsaT.group*

5. CAUSA: DEFECTOS EN LA UNIÓN

A la hora de hablar de defectos en la unión, se tratan las uniones del elemento estructural (arco, bóveda y cúpula) con otros elementos (estructurales o no) con los que está en contacto y que sirven como apoyo y estabilización.

En el caso de las bóvedas y arcos hay que asegurar que existirá una unión perfecta entre el mismo y sus estribos, u otros elementos que sirvan de sustentación.

En el caso de la cúpula será su unión con el tambor u otro elemento en el que se sustente.

La unión correcta debe ser la que se adapte al elemento constructivo (cargas que ha de soportar, los agentes externos que afectarán al elemento, etc.). También debe de ser homogénea a lo largo de la unión para dotarlo de una continuidad mecánica.

5. DAÑO: DEFECTOS EN LA UNIÓN

Los estribos y elementos de sustentación son de gran importancia a la hora de soportar los esfuerzos horizontales que se generan en las bases de los arcos, bóvedas y cúpulas. Si no existe una unión correcta al elemento de sustentación, éste no neutraliza dichos esfuerzos horizontales, por lo que el elemento constructivo tiende a inestabilizarse y colapsa.

En la Ilustración 23 se observa como la unión entre los arcos se ha debilitado.



Ilustración 23. Defectos en la unión del arco con el pilar y arco contiguo que lo sustentan.

Fuente: Arqueología de la Arquitectura. Análisis integrado de construcciones históricas: secuencia estratigráfica y diagnóstico patológico. Aplicación en la iglesia de Santa Clara (Córdoba). 2018. Martín Talavera, R.

6.2 ESTRUCTURAS TRIDIMENSIONALES MALLADAS

6.2.1 Definición y función de los elementos constructivos

Las estructuras tridimensionales malladas se logran mediante la unión de diferentes barras.

Las barras son perfiles ligeros y finos, por lo que se consiguen estructuras resistentes y poco pesadas en comparación con otras soluciones constructivas. La carga que tienen que soportar las barras suele ser mucho mayor que el propio peso de las barras, por lo cual los esfuerzos principales de las barras son tracción y compresión, despreciando la torsión y la flexión. A su vez las barras entre sí se unen mediante soldadura o juntas atornilladas.

Dependiendo de la superficie que se va a cubrir y las cargas que se han de soportar se establece la formas geométricas que tomaran las barras.

Este tipo de estructuras son utilizadas tanto en cubiertas, edificios de gran altura, etc.

6.2.2 Composición

En la composición se diferencia dos elementos principales, los nudos y las barras. Los nudos son los puntos de unión de las diferentes barras.

La forma más común de colocar estas barras es formando elementos triangulares, ya que es un tipo de estructura estable e indeformable.

En casos de cubiertas aparte de los nudos, las barras se conectan mediante paneles cubriendo el espacio que queda entre ellas.

Dentro de los nudos pueden ser de diferentes tipos como esféricos (Ilustración 24), planos, etc.



Ilustración 24. Unión esférica.

6.2.3 Materiales

Aunque el más utilizado son los perfiles de acero, en la actualidad también existen estructuras tridimensionales de materiales menos habituales como la madera o el plástico.

Para el caso de cubiertas es muy utilizada la combinación del acero y el vidrio, siendo el vidrio un material que ofrece una adecuada iluminación.

6.2.4 Puesta en obra y ejecución

Las estructuras tridimensionales malladas son estructuras de gran tamaño por lo cual es muy importante buscar la eficiencia económica. Por esa misma razón los perfiles que se utilizan suelen ser prefabricados y de geometría simple, con el propósito de poder fabricar en serie.

De toda la estructura, el ensamblaje es el proceso más caro y difícil. Por un lado existe la posibilidad de ensamblar las piezas en tierra y luego alzarlas. Y por otro lado, se puede ir ensamblando a medida que se alzan las piezas, en este caso el operario deberá subirse a la estructura.

6.2.5 Causas y daños

1. CAUSA: ERROR DE DIMENSIONADO

A la hora de definir las barras que van a conformar la malla se puede haber errores en las dimensiones de la misma, ya sea la largura o diámetro de las barras. También, se ha de analizar las cargas que va a sufrir para decidir si la geometría escogida es correcta (tetraedro, hexaedro, etc.) y el número de barras que se conectaran en cada nudo es el adecuado.

1. DAÑO: ERROR DE DIMENSIONADO

Si los parámetros explicados en el párrafo anterior no son los correctos, la estructura no es capaz de soportar las cargas establecidas. Dependiendo las dimensiones de la barra esta tiene mayor o menor resistencia ante las deformaciones. A su vez en lo que respecta a la geometría, las geometrías basadas en formas triangulares son más estables que las basadas en rectángulos.

Un error de dimensionado puede llevar a la estructura a la pérdida de estabilidad y en un caso extremo al colapso. En la Ilustración 25 se observa el colapso de la cubierta una estructura deportiva en Girona, en este caso a la hora del diseño de las barras no se tuvo en cuenta la sobrecarga de la nieve. De la misma forma, para el cálculo del estado límite de la estructura no se tuvieron en cuenta las discrepancias entre el modelo y la realidad.



Ilustración 25. Colapso estadio deportivo en Girona.

Fuente: Revista ALCONPAT. 2012. Colapso de la cubierta metálica de un polideportivo; patologías singulares y recurrentes .Alegre, V, Rodenas, V, Villalba, S

2. CAUSA: ERROR EN LA PUESTA DE OBRA

Este error sucede con la colocación errónea de los diferentes componentes de la malla. Por ejemplo, a la hora de unir las barras mediante los nudos para conseguir la forma geométrica, ya que cada barra tiene una posición exacta a su vez que un ángulo exacto.

2. DAÑO: ERROR EN LA PUESTA DE OBRA

Si no están bien colocadas las barras, sucede que la transmisión de las cargas no es la adecuada. En esa situación, todas las barraras no trabajaran igual y hay barras que sufren más, generándose deformaciones.

En la Ilustración 26 se observa el estadio de Balaídos en Vigo, el cual se tuvo que desmontar la cubierta de las gradas una vez colocada, por un fallo en la puesta en obra de las uniones esféricas que contenía.



*Ilustración 26. Estadio Balaídos, Vigo.
Fuente: La Opinión A Coruña, 2016, Marta g.Brea*

3. CAUSA: DETERIORO DE LOS MATERIALES

El material más utilizado en este tipo de estructuras es el acero. El acero puede sufrir tres tipos de deterioro: químico, biológico y físico.

Dentro de los biológicos, no es lo común la existencia de organismos en el acero, pero si existen hongos y bacterias que pueden aparecer. Normalmente su existencia está justificada por efectos como la corrosión.

En el área de los ataques químicos el más perjudicial es la corrosión. Las zonas en las que más impacto tiene son las uniones.

Por último, dentro del deterioro físico cabe mencionar la fatiga y el desgarro laminar. El primero sucede por la aplicación de cargas cíclicas. El segundo se produce como consecuencia de la limitada resistencia del material en la dirección que ha sido laminado.

3. DAÑO: DETERIORO DE LOS MATERIALES

La consecuencia directa es el deterioro de las propiedades mecánicas del material, el material ya no trabajara a su máximo potencial. A su vez se producen pérdidas de material (Ilustración 27), disminuyendo la sección y la resistencia de la misma. Por lo tanto el material es fácil de fisurar y deformar.



*Ilustración 27. Efectos de la corrosión en la unión de barras.
Fuente: Arquitectura+acero. Libertad & diseño*

4. CAUSA: DEFECTOS EN LA UNION

Por un lado, la unión puede ser mediante soldadura. En ese caso el defecto se produce por una mala ejecución de la misma, ya sea por una escasa profundidad del cordón de soldadura, o que la soldadura no sea homogénea a lo largo de la sección.

Por otro lado, la unión puede ser atornillada. En este caso pueden existir dos defectos. El primero es un mal dimensionado de la pletina de conexión, ya sea una sección o su

anchura insuficiente. El segundo está relacionado con los esfuerzos cortantes que aparecen en la unión, los cuales pueden generar cizalladura. La cizalladura puede ser consecuencia de la poca cantidad de tornillos.

4. DAÑO: DEFECTOS EN LA UNION

Al haber defectos en las uniones las barras pueden deslizarse entre sí y hay movimientos relativos. Eso afecta directamente en la estabilidad de la estructura.

En el caso de la cizalladura se crean fisuras y deformaciones (Ilustración 28) alrededor de los tornillos, disminuyendo la efectividad de los mismos.



Ilustración 28. Deformación en la placa alrededor de la posición del tornillo.

Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Union-atornillada-pretensada-Aplastamiento-de-chapas-en-una-union-atornillada_fig1_276276800

5. CAUSA: INADECUACION FUNCIONAL

Pueden existir incompatibilidades entre los materiales, ya sea el coeficiente de dilatación, rigidez, etc.

En el coeficiente de dilatación, hay que tener en cuenta el lugar en el que va a trabajar en material, ya que por la variación de temperaturas a lo largo del año sufre dilataciones. Por ello se deben establecer juntas de dilatación, las cuales permiten una dilatación libre del material y no afectan a otros elementos.

5. DAÑO: INADECUACION FUNCIONAL

En el caso de incompatibilidad de materiales puede suceder que las deformaciones no sean homogéneas, habiendo elementos que sufren mayores deformaciones.

Si no se permite una libre dilatación del material, se generan tensiones internas y el material se fisura y deforma. Como consecuencia más grave está el colapso de la estructura.

6.3 INCUMPLIMIENTO DE NORMATIVA

Al tratarse de un trabajo de fin de grado que se centra en patologías relativas a estructuras de diferentes elementos, la normativa más importante que se incumplirá es la DB-SE (Documento Básico - Seguridad Estructural). Aunque también se pueden encontrar algún apartado del DB-SI (Documento Básico - Seguridad en caso de Incendio).

DB-SE-F (DOCUMENTO BÁSICO - SEGURIDAD ESTRUCTURAL - ESTRUCTURAS DE FÁBRICA)

En este documento se obtiene toda la información necesaria acerca de los elementos contruidos en fábrica.

A la hora de analizar las uniones entre dovelas en el apartado de 2.2 se tratan las “Juntas en movimiento”. En él se establece una distancia que tiene que mantener la piedra para establecer unas juntas que permitan la deformación por flexión y los efectos de las tensiones internas producidas por cargas verticales o laterales, sin que la fábrica sufra daños. A su vez, en este mismo apartado 2.2 se especifica cual tiene que ser la retracción final del mortero y el valor máximo.

En lo que respecta a las propiedades que tienen que mantener los materiales en el apartado 4 se dan los valores de las diferentes propiedades mecánicas que deben cumplir. En este apartado se mencionan materiales como el mortero, la fábrica y hormigón. Cabe mencionar que para el caso del hormigón existe EHE (La instrucción del hormigón estructural) donde se puede encontrar información más detallada.

En relación con las propiedades del material, dentro de este mismo documento en el apartado 3.1 se especifica la clase de exposición del material para poder identificar los ataques que puede sufrir. De tal forma que en el apartado 3.2 se determina qué tipo de material será adecuado para la exposición que se ha establecido en el apartado 3.1.

A la hora de dimensionar los muros y estribos en el apartado 5 se dan una serie de especificaciones acerca del tamaño de los muros de carga o estribos. Para ello se expresan las diferentes formas de trabajar de ese muro y qué valores tiene que cumplir para asegurar su seguridad.

Por último, en el apartado 8 se dan varias pautas a seguir a la hora de la ejecución del elemento estructural de fábrica.

DB SE-A (DOCUMENTO BÁSICO - SEGURIDAD ESTRUCTURAL - ESTRUCTURAS DE ACERO)

En este documento se obtiene toda la información necesaria acerca de los elementos contruidos en acero.

En lo que respecta a un análisis general de la estructura se establece en el apartado 5. A su vez, en el apartado 6 se definen las condiciones del estado límite último y en el 7 el estado límite de servicio.

A la hora de establecer las condiciones de las uniones, esa información se proporciona en el apartado 8. Concretando en el tipo de uniones, en el 8.5 se habla de las uniones atornilladas y en el 8.6 de las de soldadura. En relación a al material de los tornillos y las placas de las uniones, existe el apartado 4. En este último apartado también se explican las propiedades mecánicas del material y las características de los perfiles.

Por último, los daños de puesta en obra se registrarán por el apartado 10 donde se explican las condiciones de ejecución de acciones como las uniones.

DB-SE-AE (DOCUMENTO BÁSICO - SEGURIDAD ESTRUCTURAL - ACCIONES EN LA EDIFICACIÓN)

El documento DB-SE-AE (Documento Básico - Seguridad Estructural - Acciones en la edificación) es de gran importancia a la hora de calcular las cargas que tiene que

soportar el elemento constructivo y dimensionar los elementos para que se adapten a esas cargas. El tipo de cargas se divide en tres grupos:

- Acciones permanentes: Como el propio nombre indica son acciones que siempre están presentes. Aquí se tiene en cuenta el propio peso de los elementos que lo conforman, el pretensado y las acciones del terreno.
- Acciones variables: Estas acciones dependen de factores externos. Aquí se encuentran las sobrecargas generadas por el uso del edificio, el viento, la nieve y las variaciones térmicas.
- Acciones accidentales: Son las sobrecargas que aparecen en situaciones que su pueden llegar a dar como un incendio o seísmo.

DB-SE-C (DOCUMENTO BÁSICO - SEGURIDAD ESTRUCTURAL - CIMIENTOS)

En este documento es de gran importancia a la hora de conocer qué tipo de terreno se tiene, de tal forma que se pueda analizar la posibilidad de asentamientos diferenciales. Más concretamente, en el apartado 3 se especifica cómo se debe hacer un estudio geotécnico para conocer el tipo de terreno en el que se asienta el elemento constructivo.

DB-SI (DOCUMENTO BÁSICO - SEGURIDAD EN CASO DE INCENDIO)

Dentro de este documento los apartados más destacados son tres. El primero, el SI 1 donde se explican las condiciones que tienen que cumplir los elementos internos de una estructura para minimizar la propagación del fuego. El segundo, se trata del SI 2 que será igual que el primero pero para los elementos exteriores como cubiertas. Y el tercero, SI 6 donde se establecen parámetros para asegurar la resistencia al fuego de la estructura.

6.4 METODOLOGÍA EVALUACIÓN DEL RIESGO

En esta metodología el riesgo se define como la probabilidad de que pase un daño por las consecuencias del mismo. A su vez, el primer concepto se obtiene multiplicando la exposición del elemento por la frecuencia con que ocurre el daño. Todos estos criterios se evalúan mediante el método cualitativo, lo que significa que cada criterio

adquiere un nivel basándose en una escala de “BAJO”, “MEDIO” y “ALTO” en base al criterio de un experto.

Posteriormente se crean dos tablas. Una primera (Tabla 1) la cual refleja la probabilidad de que suceda un daño. La segunda (Tabla 2) es la que define el riesgo.

Tabla 1. Tabla que establece la relación entre frecuencia y exposición.

		FRECUENCIA		
		Bajo	Medio	Alto
EXPOSICIÓN	Bajo	Bajo	Medio	Medio
	Medio	Medio	Medio	Alto
	Alto	Medio	Alto	Alto

Tabla 2. Tabla que establece la relación entre la probabilidad de daño y las consecuencias.

		CONSECUENCIAS		
		Bajo	Medio	Alto
PROBABILIDAD DE DAÑO	Bajo	Bajo	Medio	Medio
	Medio	Medio	Medio	Alto
	Alto	Medio	Alto	Alto

Primero se ha creado una tabla Excel donde se hace un listado de todos los daños que pueden aparecer en los elementos constructivos. En este caso todos están relacionados con el área estructural (*ver ANEXO I*). En este Excel hay dos pestañas, una primera en la cual se explican de una forma resumida la causa y una segunda para relacionar la causa con su respectivo daño e incumplimiento de normativa. La tabla sirve como una base de datos, su uso está relacionado con la labor del perito. El objetivo es que el perito, una vez este en la obra, observe los daños que hay y mediante la tabla pueda deducir la causa del mismo y lo marque en el Excel.

Una vez se tiene una lista de los daños existentes y se sabe sus causas se procede a la evaluación del riesgo. A continuación se explican cuáles van a ser los criterios que establecen los diferentes niveles de las consecuencias, exposición y frecuencia.

6.4.1 Exposición

La exposición se comprende como la combinación de ubicación, clima y terreno. Los tres apartados tienen el mismo nivel de importancia, por lo tanto, una vez escogido el nivel de cada uno hay que hacer una media para obtener el de la Exposición.

UBICACIÓN

En este caso la ubicación está relacionada con la agresividad del ambiente. Principalmente tiene impacto en el tipo de material que se utiliza y el deterioro que sufre el material, afectando a su durabilidad.

Un nivel alto de agresividad está relacionado con aspectos como la humedad, contaminación del ambiente, organismos que lo rodean, altas temperaturas, luz solar, etc.

La humedad es uno de los factores más importantes ya que junto a las altas temperaturas puede incrementar el nivel de agresividad de aspectos como la contaminación [1].

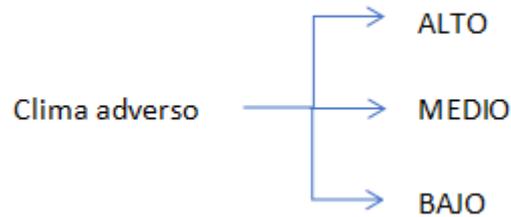


CLIMA

A la hora de evaluar el clima se habla del nivel de adversidad del clima.

La adversidad se establece teniendo en cuenta factores como, si es un lugar lluvioso, si es un lugar con grandes nevadas, si tiene grandes rachas de viento y tiene variaciones de temperatura altas. Esos factores están estrechamente relacionados con los daños

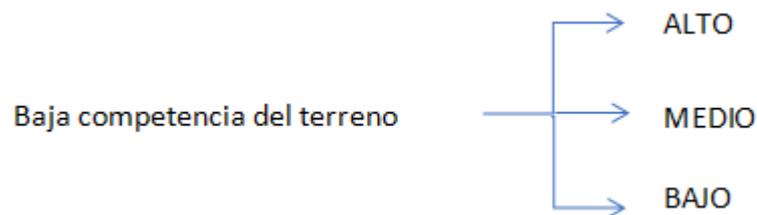
generados por sobrecargas, ya que la acumulación de nieve o fuertes rachas de viento aumentan las cargas que debe soportar el elemento.



TERRENO

A la hora de evaluar el terreno se mira si se trata de un terreno competente para la estructura, facilitando o generando una acción nociva para la estructura.

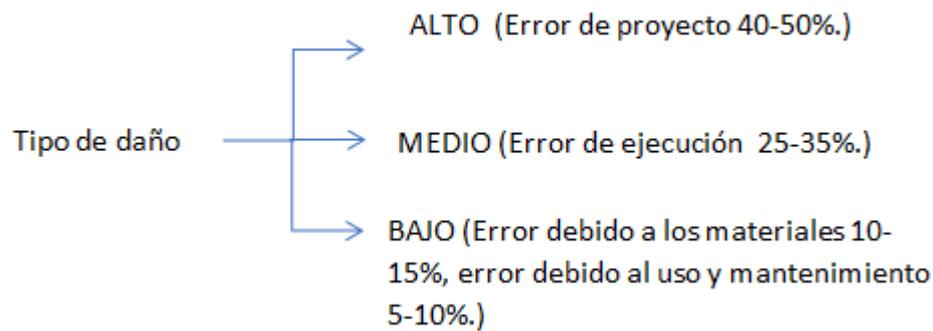
En este apartado se analizan factores como el tipo de suelo (arenoso, humiteros, etc.), el nivel freático, si existe posibilidad de actividad sísmica, cualidades geomecánicas, etc.



6.4.2 Frecuencia

Para el cálculo de la frecuencia los daños se dividen en tres grupos principales: daños de proyecto (relacionados con el diseño previo de los elementos ya sea sus dimensiones o material), daños de ejecución (errores a la hora de puesta en obra) y de mantenimiento (debido a uso y material).

Dependiendo del grupo al que pertenezca el daño, tendrá una importancia diferente [18].

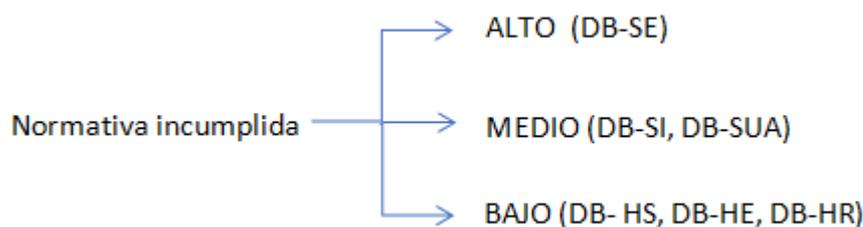


6.4.3 Consecuencias

Para establecer el nivel de las consecuencias los factores a tener en cuenta son el incumplimiento de la normativa, daños colaterales y el porcentaje de superficie. Al igual que el apartado de exposición todos los criterios tienen el mismo peso a la hora de establecer en nivel de las consecuencias.

NORMATIVA INCUMPLIDA

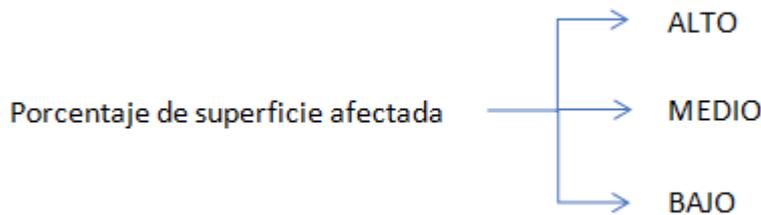
Se le da la mayor importancia a los daños que incumplan la normativa referida a la estructura ya que la consecuencia más grave es el colapso de la estructura del elemento.



PORCENTAJE DE SUPERFICIE

En este Trabajo de Fin de Grado se analizan los daños para unas soluciones constructivas. Esas soluciones están combinadas con otras (muros de carga, vigas, cubiertas, etc.) formando un edificio. En este apartado se analiza el porcentaje de espacio que ocupa la solución constructiva respecto al edificio completo. Por ejemplo, si la solución del arco representa el 25% del edificio y la bóveda el 3%, aunque tengan

el mismo daño como puede ser una sobrecarga, las consecuencias del daño del arco son mucho más decisivas a la hora de asegurar la estabilidad del edificio.



6.5 APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA

En este apartado se analizan dos edificios con el objetivo de entender cómo es la aplicación de la metodología establecida. Más concretamente, se han escogido dos edificaciones de fábrica muy similares que contienen elementos constructivos como arcos, bóvedas y cúpulas.

Entre las dos edificaciones se han analizado diferentes patologías de tal forma que se pueda ver como afectarían a cada patología los diferentes parámetros establecidos en la metodología de evaluación del riesgo (Exposición, frecuencia y consecuencias).

Una primera es la catedral de Santa María Vitoria-Gasteiz y la segunda la catedral de San Antolín de Palencia.

6.5.1 Catedral de Santa María Vitoria-Gasteiz

La catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz, popularmente conocida como la Catedral Vieja, se trata de una edificación del siglo XIII. Dentro de las catedrales situadas en el País Vasco es una de las más importantes.

Entre los años 2000 y 2016 esta catedral sufrió una gran reforma debido al mal estado de la estructura. La estructura padecía de varias patologías importantes, dentro de las cuales se encontraban las relacionadas con los arcos y bóvedas que la forman. La nave central de la catedral está formada varias bóvedas de crucería y en los muros que unen la nave central con las exteriores se encuentran varios arcos (Ilustración 29).



*Ilustración 29. Bóvedas y arcos apuntados.
Fuente: Fundación Catedral Santa María*

Las patologías más importantes se ocasionaron por errores de dimensionado y deterioro de los materiales.

Los riesgos estructurales principales de la catedral de Vitoria-Gasteiz fueron derivados de errores de dimensionado desde una doble perspectiva: incremento de las cargas por encima de los valores de diseño y debilitación de los componentes de la estructura.

Como consecuencia de varios cambios en la catedral, los diferentes elementos constructivos tuvieron que soportar sobrecargas para las cuales no estaban diseñados. Ese hecho fue debilitando la estructura hasta llegar a un punto de riesgo de colapso.

La catedral ha sufrido diferentes cambios estéticos a lo largo del tiempo. En un primer momento la catedral tenía una cubierta de madera la cual posteriormente se sustituyeron por bóvedas de piedra generando importantes sobrecargas. Los muros que existían no estaban preparados para soportar tales sobrecargas, por lo que en el siglo XVI se pusieron los llamados “arcos del miedo” (Ilustración 30) o arcos codales los que reducían el empuje horizontal de las bóvedas. En 1967 los arcos codales de la nave

central son eliminados y sustituidos por tirantes metálicos que no consiguen el mismo efecto que los arcos y acaban por debilitar la estructura [3].

A su vez, en el siglo XIII se abren huecos en los muros para la creación de capillas, Posteriormente, entre 1963 y 1964 se abren diferentes ventanas y vidrieras a lo largo de la catedral para aumentar su luminosidad [7]. En ambos casos la capacidad portante de sus muros se ve alterada y la estructura debilitada.

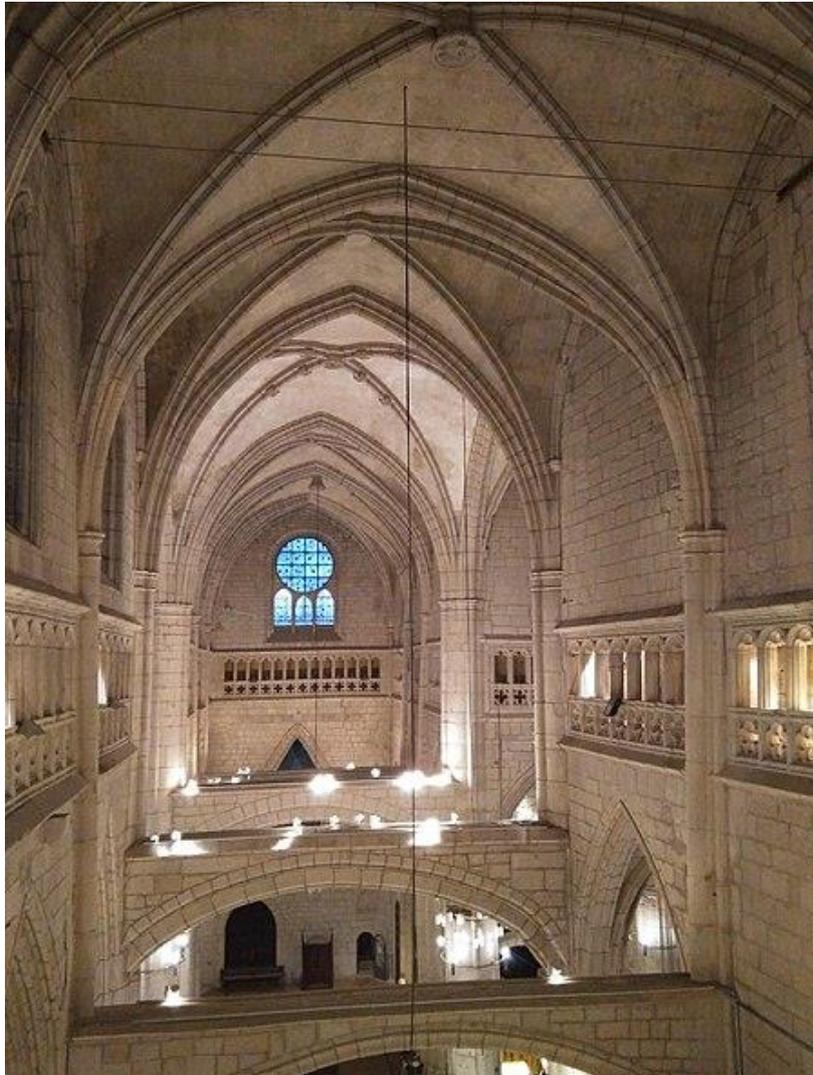


Ilustración 30. Arcos codales.

En el caso del deterioro del material, una exposición continuada durante años a la contaminación produjo desprendimientos del material, debilitando las propiedades mecánicas del mismo, como es la resistencia a tracción.

Exposición: Todas las patologías tienen la misma exposición.

- **Ubicación:** MEDIO. La agresividad del ambiente se considera media. El nivel de contaminación de la ciudad de Vitoria-Gasteiz es bajo. No obstante en el norte Vitoria-Gasteiz hay una importante zona industrial. Las sustancias emitidas por las industrias son transportadas por los vientos hasta la propia ciudad, de forma que una exposición continuada durante años puede afectar al material [3].
Igualmente, se trata de una ciudad de grandes cambios de temperatura en lo que respecta a las estaciones de invierno y verano.
- **Clima:** ALTO. De acuerdo al documento DB-SE-AE, las acciones del viento dependen de tres factores: presión dinámica del viento, coeficiente de exposición y coeficiente eólico o de presión.
En el documento DB-SE-AE Anejo D, en la figura D.1 se presenta un mapa donde se puede apreciar como Vitoria-Gasteiz se encuentra dentro de la zona de mayor presión dinámica del viento. El coeficiente de exposición en la tabla 3.4 se considera IV el grado de aspereza del entorno. Por último, el coeficiente de exposición y coeficiente eólico de presión se consigue mediante el apartado 3.6 para naves y construcciones diáfanas. Para este cálculo se pueden considerar las catedrales como construcciones diáfanas ya que se tratan de edificaciones con interiores muy espaciosos y sin divisiones ni forjados.
A su vez, en ese mismo documento en el apartado 3.5 en la tabla 3.8 se observa como la sobrecarga por nieve de Vitoria-Gasteiz se encuentra dentro de los valores más altos, con $0,7 \text{ KN/m}^2$, siendo el máximo 1 KN/m^2 .
- **Terreno:** BAJO. De acuerdo al libro Catedral de Santa María, Vitoria-Gasteiz: plan director de restauración Vol 2. la catedral está asentada sobre una roca blanda de buenas condiciones resistentes en estado inalterado, sin humedad y ni exposición al aire (2001, p 424) [4].

Teniendo en cuenta que para el cálculo de la exposición el clima el terreno y la ubicación tienen una misma importancia, de media la exposición adquiere un valor de MEDIO.

Frecuencia: Los daños relacionados con errores de dimensionado tienen un nivel de frecuencia ALTO, ya que son errores de proyecto que ocurren por no hacer un correcto análisis previo de las condiciones que va a sufrir el edificio.

Los daños producidos por defectos del material serían de tipo BAJO.

Probabilidad de daño: Mediante la Tabla 3 se obtiene que la probabilidad de daño, para el error de dimensionado será de carácter ALTO y para deterioro del material de carácter MEDIO.

Tabla 3. Tabla que establece la relación entre frecuencia y exposición.

		FRECUENCIA		
		Bajo	Medio	Alto
EXPOSICIÓN	Bajo	Bajo	Medio	Medio
	Medio	Medio Deterioro del material.	Medio	Alto Error de dimensionado.
	Alto	Medio	Alto	Alto

Consecuencias: A la hora de analizar las consecuencias se ha analizado la siguiente información:

- **Normativa incumplida:** Ambos daños obtienen el nivel ALTO, ya que principalmente incumplen el reglamento DB-SE (Documento Básico - Seguridad Estructural).
- **Porcentaje de superficie:** El material afecta principalmente al material exterior y más concretamente a la fachada de la parte norte. Por lo cual el porcentaje de superficie será BAJO. En cambio, el error de dimensionado afecta a la zona de la nave central y las laterales que prácticamente conforman la totalidad del edificio, por lo cual adquiere el valor de ALTO.

Por tanto, el riesgo de daños técnicos (Tabla 4) por deterioro de material es MEDIO mientras que el riesgo de daños por un error de dimensionado es ALTO.

Tabla 4. Tabla que establece el riesgo.

		CONSECUENCIAS		
		Bajo	Medio	Alto
PROBABILIDAD DE DAÑO	Bajo	Bajo	Medio	Medio
	Medio	Medio	Medio Deterioro del material.	Alto
	Alto	Medio	Alto	Alto Error de dimensionado.

6.5.2 Catedral de San Antolín de Palencia

La catedral de Palencia se trata de una edificación que se comenzó a construir en el siglo XIV. Debido a diferentes patologías la catedral se encuentra actualmente en un proceso de reformas. Estas obras comenzaron en el mes de septiembre de 2018 y terminarán en diciembre de 2019 [14].

Las patologías más importantes están ocasionadas en la capilla de la Inmaculada. Por un lado, defectos en la unión de las bóvedas de crucería (Ilustración 31) por desprendimiento de mortero. Por otro lado, deterioro del material en bóvedas y muros [9].

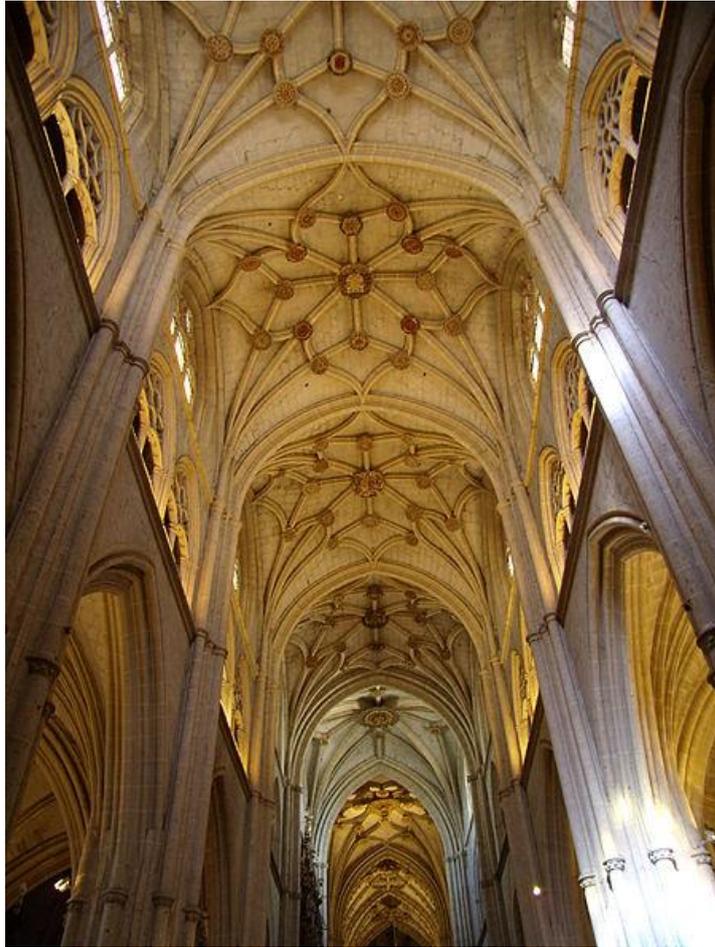


Ilustración 31. Bóveda catedral de Palencia.

Exposición: Todos los daños tienen la misma exposición:

- **Ubicación:** BAJO. Se trata de un lugar sin apenas contaminación, y con un nivel de humedad bajo, y ligeramente más alto en verano [16].

De la misma forma se trata de una ciudad de grandes cambios de temperatura en lo que respecta a las estaciones de invierno y verano.

- **Clima:** MEDIO. De acuerdo al documento DB-SE-AE las acciones del viento dependen de tres factores: presión dinámica del viento, coeficiente de exposición y coeficiente eólico o de presión.

En el documento DB-SE-AE Anejo D en la figura D.1 se presenta un mapa donde se puede apreciar como Palencia se encuentra dentro de la segunda zona de mayor presión dinámica del viento. El coeficiente de exposición en la tabla 3.4 se considera III el grado de aspereza del entorno. Por último, el coeficiente de exposición y coeficiente eólico de presión, al igual que en el caso de la Catedral

de Santa María, se consigue mediante 3.6 para naves y construcciones diáfnas.

A su vez, en ese mismo documento en el apartado 3.5 en la tabla 3.8 se observa como la sobrecarga por nieve de Palencia se encuentra dentro de los valores medios con $0,4 \text{ KN/m}^2$, siendo el máximo 1 KN/m^2 .

- Terreno: BAJO. La catedral se asienta en un terreno adecuado pese a su cercanía al río Carrión cerca del cual existen acuíferos de poca profundidad [16]. La razón es que la catedral se sitúa a una altura superior respecto al río.

Teniendo en cuenta que para el cálculo de la exposición los tres aspectos tienen un mismo valor, siendo conservador se establece que la media de la exposición adquiere un valor de MEDIO.

Frecuencia: Ambos daños se consideran de carácter BAJO.

Probabilidad de daño: Mediante la Tabla 5 se obtiene que la probabilidad de ambos daños es de carácter MEDIO.

Tabla 5. Tabla que establece la relación entre frecuencia y exposición.

		FRECUENCIA		
		Bajo	Medio	Alto
EXPOSICIÓN	Bajo	Bajo	Medio	Medio
	Medio	Medio Deterioro del material. Defectos en la unión.	Medio	Alto
	Alto	Medio	Alto	Alto

Consecuencias: A la hora de analizar las consecuencias se han conseguido la siguiente información:

- Normativa incumplida: Ambos daños obtienen el nivel ALTO, ya que principalmente incumplen el reglamento DB-SE (Documento Básico - Seguridad Estructural).
- Porcentaje de superficie: En el caso de los daños producidos en las uniones de las bóvedas se les da un carácter MEDIO ya que están colocadas en las diferentes naves y estas forman una parte importante del edificio. En el caso del deterioro del material se le da también el carácter MEDIO, ya que estas afectan a partes inferiores de muros y bóvedas.

En conclusión, el riesgo de daños técnicos (Tabla 6) debidos al deterioro de material como a defectos en la unión es ALTO.

Tabla 6. Tabla que establece el riesgo.

		CONSEUENCIAS		
		Bajo	Medio	Alto
PROBABILIDAD DE DAÑO	Bajo	Bajo	Medio	Medio
	Medio	Medio	Medio	Alto Deterioro del material. Defectos en la unión.
	Alto	Medio	Alto	Alto

Se puede observar como en ambos casos existe un daño por deterioro en el material, en cambio, aun teniendo un daño similar la importancia de factores a tener en cuenta (exposición, frecuencia y consecuencias) hace que en uno de los casos el riesgo sea MEDIO y en el otro ALTO.

7 METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO

7.1 DESCRIPCIÓN DE TAREAS

En este apartado se expresan las tareas que se han realizado para el desarrollo de este trabajo.

Tarea 1: Definición del proyecto.

Descripción: En este apartado se establecen los elementos constructivos que se van a analizar y se concretan tanto los objetivos como el alcance que va a tener el trabajo.

Duración: 3 días.

Recursos técnicos: Libros y ordenador.

Recursos humanos: Ingeniera Junior e Ingeniera Senior.

Tarea 2: Búsqueda de documentación.

Descripción: Esta es la fase en la que se consigue toda la bibliografía posteriormente utilizada. Al tratarse de un trabajo con mucha bibliografía se requiere de un proceso de síntesis para conseguir los datos más relevantes.

Duración: 19 días.

Recursos técnicos: Libros y ordenador.

Recursos humanos: Ingeniera Junior.

Tarea 3: Análisis de causas y daños.

Descripción: Mediante el Excel se deciden las patologías a analizar. Durante el proceso se generan tres versiones diferentes.

Duración: 47 días.

Recursos técnicos: Libros, ordenador y programa Excel.

Recursos humanos: Ingeniera Junior.

Tarea 4: Análisis de normativa afectada.

Descripción: Lectura y comprensión de la normativa española vigente en lo relativo al área de la construcción. También buscar relación entre las patologías y las diferentes partes de esa normativa.

Duración: 15 días.

Recursos técnicos: Libros, ordenador y programa Excel.

Recursos humanos: Ingeniera Junior.

Tarea 5: Desarrollo de la metodología de análisis de riesgo.

Descripción: Decidir cuáles van a ser los criterios para establecer la metodología.

Duración: 10 días.

Recursos técnicos: Libros y ordenador.

Recursos humanos: Ingeniera Junior e Ingeniera Senior.

Tarea 6: Validación de la metodología en casos de estudio.

Descripción: Establecer dos casos prácticos en los que se va a aplicar la metodología presentada.

Duración: 10 días.

Recursos técnicos: Libros y ordenador.

Recursos humanos: Ingeniera Junior.

Tarea 7: Redactar Trabajo Fin de Grado.

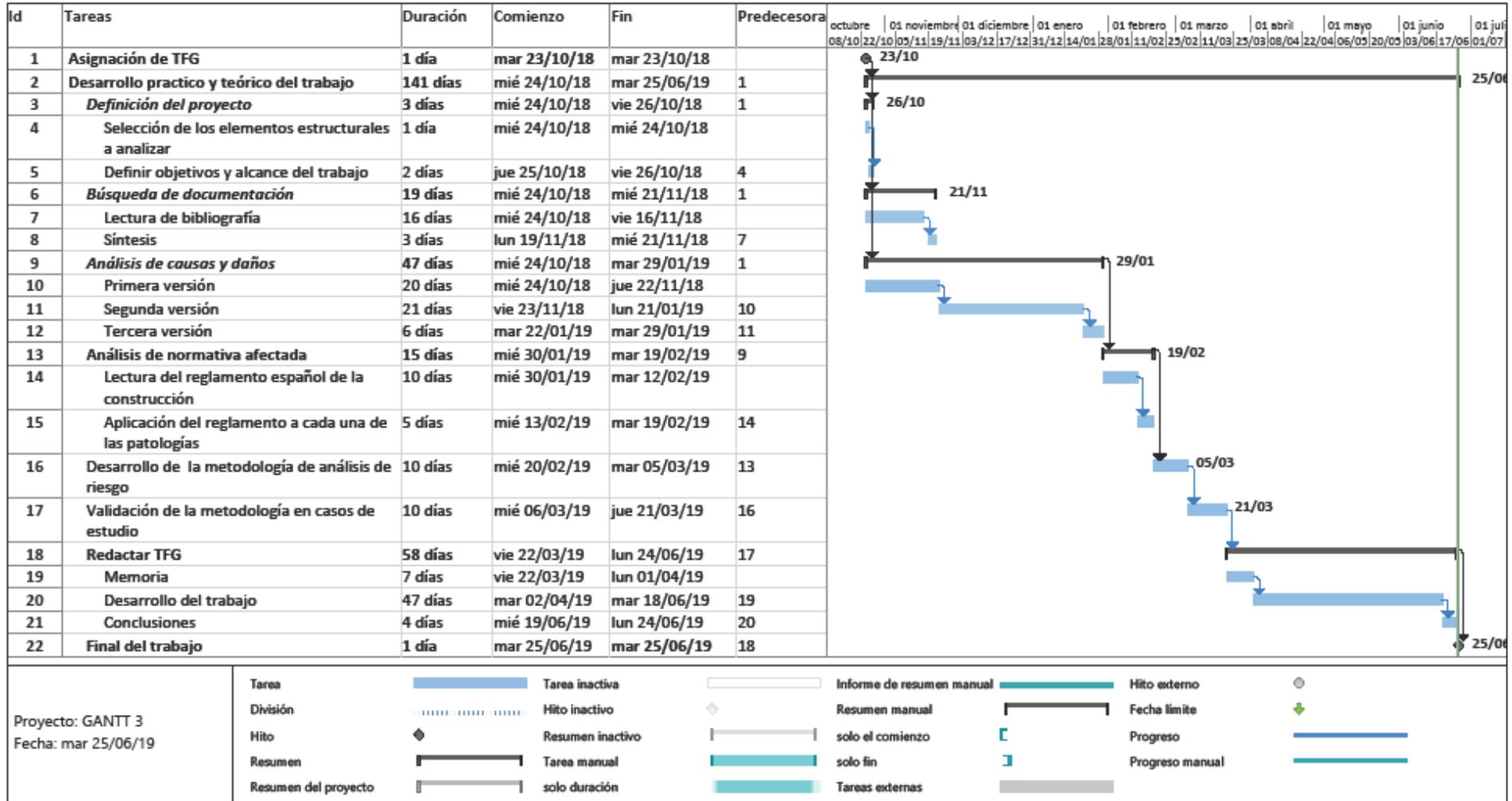
Descripción: Redactar los diferentes apartados del TFG (Memoria, desarrollo del trabajo y las conclusiones). Para esto como base se utiliza toda la información obtenida en las tareas previas.

Duración: 58 días.

Recursos técnicos: Libros y ordenador.

Recursos humanos: Ingeniera Junior e Ingeniera Senior.

7.2 DIAGRAMA DE GANTT



Mediante el diagrama de Gantt se expresan las tareas mencionadas, tanto su fecha de inicio como la fecha final. En la quinta columna se establecen las relaciones entre las tareas, indicando mediante un número que tarea debe ser realizada para poder comenzar la tarea actual. Cada una de las 7 tareas con sus correspondientes subtareas ha finalizado con una reunión con la directora del TFG con el objetivo de asegurar que la tarea estaba ejecutada correctamente.

8 ASPECTOS ECONOMICOS

En este apartado se explica el descargo de gastos. Estas tablas representan los costes del proyecto una vez realizado.

En la primera tabla (Tabla 7) se expresan las horas internas que se han necesitado para desarrollar este TFG. En este trabajo ha participado una ingeniera Junior y una ingeniera Senior a modo de supervisora y guía.

Tabla 7. Horas internas.

HORAS INTERNAS	HORAS (h)	COSTE HORARIO (€/h)	COSTE (€)
Ingeniero Junior	170	20,00	3400,00
Ingeniero Senior	15	50,00	750,00
TOTAL (€)			4150,00

En la siguiente tabla (Tabla 8) se presentan los elementos con posibilidad a ser amortizados, como son el ordenador y la licencia Microsoft Office del Ingeniero Senior y Junior.

Tabla 8. Amortizaciones.

AMORTIZACIONES	VALOR INICIAL (€)	VIDA UTIL (meses)	PERIODO DE USO (meses)	CANTIDAD	AMORTIZACIONES (€)
Ordenadores	1000,00	36	10	2	555,56
Licencia Microsoft Office	99,00	12	10	2	165,00
TOTAL (€)					720,56

Por último, se presentan en una tabla (Tabla 9) los gastos que supone el desarrollo de este TFG. Los gastos se pueden dividir en tres grupos principales.

Un primer grupo en el cual están todas las normativas utilizadas. Las normativas que se han tenido que adquirir son cuatro: ISO31000:2018, UNE 31010.2011, UNE EN 60812:2008, UNE EN 60812:2018.

Un segundo grupo relacionado con la bibliografía. En este trabajo se ha requerido de una amplia bibliografía la cual tiene un gran peso. Dentro de los archivos que se han utilizado, solamente hay un único libro de pago, los demás son tesis doctorales que están accesibles gratuitamente en las páginas de las universidades.

Un tercer grupo en el que se ha incluido todo el material de oficina.

Tabla 9. Gastos.

GASTOS	CANTIDAD	COSTE UNITARIO (€)	COSTE (€)
ISO31000:2018	1	78,47	78,47
UNE 31010.2011	1	63,00	63,00
UNE EN 60812:2008	1	72,00	72,00
UNE EN 60812:2018	1	120,00	120,00
<i>Libro "Patología y técnicas de intervención en estructuras arquitectónicas", Juan Monjo Carrio y Luis Maldonado Ramos</i>	1	35,00	35,00
Material de oficina	1	40,00	40,00
TOTAL (€)			408,47

En la siguiente tabla (Tabla 10) se expresa la suma de los conceptos de las anteriores tablas la cual adquiere el nombre de costes directos. En el trabajo se han tomado como costes indirectos (luz, internet, etc.) el 7% de los costes directos. Consiguiendo el valor total del proyecto mediante la suma de los costes directos e indirectos.

Tabla 10. Coste total.

COSTES DIRECTOS	5.279,03 €
COSTES INDIRECTOS (7%)	369,53 €
TOTAL	5.648,56 €

9 CONCLUSIONES

En este apartado se exponen las conclusiones a las que se ha llegado una vez hecho el trabajo.

Uno de los primeros pasos que se dan en este TFG es el análisis en profundidad de los diferentes elementos constructivos. En ese proceso se ha visto la importancia de un buen conocimiento de los elementos base que los conforman. Los elementos base a priori pueden parecer realmente simples, como es el caso del arco y las formas geométricas triangulares, pero gracias a un buen conocimiento de esos elementos se pueden llegar a conseguir otros mucho más complejos. Los casos de las bóvedas y cúpulas no son más que una consecuencia del arco. De la misma manera que las estructuras tridimensionales malladas encuentran la base de su ser en las geometrías triangulares.

También se ha podido ver como conocer bien la estructura que se va a trabajar es fundamental a la hora de poder identificar posibles daños y patologías, a la vez que el origen de las mismas. Para ello se analiza cada elemento constructivo desde sus elementos base hasta llegar a su totalidad, en el caso de los elementos de fábrica se analiza desde las patologías que se generan en la dovela hasta las que pueden aparecer entre el arco y sus elementos de sustentación.

A la hora de establecer una metodología de análisis de riesgo se ha visto como realmente el factor más importante son los agentes externos al propio daño, la frecuencia de la existencia de esos agentes y las consecuencias que conllevan. Por ejemplo, se tiene un edificio el cual tiene el elemento del arco como parte de su estructura. Si en uno de los arco tiene alguna fisura, como consecuencia de alguna patología, a la hora de evaluar el riesgo la fisura en si no tiene valor. Lo que verdaderamente definirá el riesgo que representa la fisura será su entorno. No es lo mismo que la fisura se encuentre en el único arco que sustenta una pared o que la carga de esa pared se reparta entre diferentes arcos. A su vez no es lo mismo que las consecuencia de esa fisura sea que la estructura cambie de estado de equilibrio o que colapse. Es por ello que no hay que alarmarse al ver un daño o defecto en una estructura, hay que analizar que rodea a ese daño para establecer su gravedad. Puede

sucedier que un daño a priori en un edificio sea realmente crítico, mientras que en otro edificio, con unas condiciones diferentes, no sea crítico.

En lo que respecta a los materiales en la edificación, generalmente las soluciones constructivas como arcos, bóvedas o cúpulas suelen formar parte de edificios de fábrica. Existe una falta de concienciación en lo que respecta a la importancia de este tipo de edificios, que suelen ser vistos como edificios antiguos. Pero al igual que el arco es la base de la bóveda y la cúpula, estos edificios antiguos son la base de muchos edificios que se pueden considerar modernos hoy en día.

Por último, un análisis de riesgo de los daños técnicos de los edificios es fundamental para la mejora y conservación de diseños estructurales, al igual que para conseguir un desarrollo sostenible en el área de la construcción. Al fin y al cabo, es un hecho que la sostenibilidad cada vez tiene más importancia en la industria en general. Es necesario establecer un análisis del riesgo, tanto para construir edificios que se adapten a su entorno y sean lo más duraderos posibles, como para poder asegurar la existencia y conservación de edificios ya existentes. Más concretamente en el caso de edificios antiguos de fábrica es de máxima necesidad establecer una prioridad en los daños, ya que se trata de edificios realmente delicados en los cuales por seguridad se deben hacer las intervenciones mínimas. Merece la pena la conservación de estos edificios debido a su valor funcional y cultural, ya que es parte del patrimonio arquitectónico.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Uruchurtu, J. Efectos de la contaminación en edificios del patrimonio histórico. (1989). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3059577>
- [2] Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación. «BOE» núm. 266, de 6 de noviembre de 1999, páginas 38925 a 38934. (1999). <https://www.boe.es/eli/es/l/1999/11/05/38>
- [3] Azkarate Garai-Olaun, A. EL PLAN DIRECTOR PARA LA RESTAURACION DE LA CATEDRAL DE SANTA MARIA Vol 01. Fundación Catedral Santa María (2001). <https://issuu.com/catedralvitoria.com/docs/www.catedralvitoria.com>
- [4] Azkarate Garai-Olaun, A. EL PLAN DIRECTOR PARA LA RESTAURACION DE LA CATEDRAL DE SANTA MARIA Vol 02. Fundación Catedral Santa María (2001). https://issuu.com/catedralvitoria.com/docs/pd_vol2
- [5] Huerta, S. ARCOS, BÓVEDAS Y CÚPULAS, GEOMETRÍA Y EQUILIBRIO EN EL CÁLCULO TRADICIONAL DE ESTRUCTURAS DE FÁBRICA. Instituto Juan Herrera, ETSAM. Madrid (2004). http://oa.upm.es/1136/1/Huerta_2004_Arcos_bovedas_y_cupulas.pdf
- [6] Historia del CTE – Dirección General de Arquitectura y Política de Vivienda del Ministerio de Vivienda con la colaboración del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. CSIC. Código Técnico de la Edificación. (2006). https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Normativa/CTE-2006/HistoriaCTE.pdf
- [7] Delika Gonzales de Viñaspre, M., & Cortés Pizano, F. ESTUDIO Y PLAN DIRECTOR DE LAS VIDRIERAS DE LA CATEDRAL DE SANTA MARÍA DE VITORIA-GASTEIZ. (2009). <https://www.catedralvitoria.eus/data/galerias/198-2009vidrieras.pdf>
- [8] Señis Lopez, R. OPTIMIZACION DE MALLAS ESTRUCTURALES DE ACERO ENVOLVENTES DE EDIFICIOS DE ALTURA. Universitat Politècnica de Catalunya (2014). <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/95358/TRSL4de8.pdf>
- [9] VISTAS DESDE EL TRIFORIO. Diario palentino. (2014). <https://www.diariopalentino.es/noticia/z59ce8172-f536-ee99-b6a6f9ba5728f601/20140222/vistas/triforio>
- [10] Espino Pérez, U., & Lucas Ruiz, R. & Marín García, D. DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DE RIESGOS SEGÚN LA NORMA UNE ISO 31000 PARA EL TRATAMIENTO DE RECLAMACIONES EN EDIFICACIÓN. Escuela Técnica Superior

- de Ingeniería de Edificación Sevilla. (2014).
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=45566>
- [11] CTE-Código Técnico de la Edificación. Dirección General de Arquitectura y Política de Vivienda del Ministerio de Vivienda con la colaboración del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. CSIC. Código Técnico de la Edificación. (2015).
<https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-que-cte/estructura-contenidos.html>
- [12] González, I. GESTION DEL RIESGO – ISO 31000. Calidad y Gestión. (2016).
<https://calidadgestion.wordpress.com/2016/10/28/gestion-del-riesgo-iso-31000>
- [13] El sector de la Construcción en España - Conexión Industriales. (2017).
<https://conexionindustriales.com/el-sector-de-la-construccion-en-espana/>
- [14] CATEDRAL, OBRAS DE RESTAURACIÓN. Carrión digital. (2019).
<http://carriondigital.com/noticia/2019-05-16-catedral-palencia-obras-restauracion-4210>
- [15] Academia Ingnova. PATOLOGIA Y REHABILITACION DE ESTRUCTURAS.
https://academia.ingnova.es/recursos/apuntes_demo/patologias.pdf
- [16] ETT. Plan General de Ordenación Urbana de Palencia. Informe Ambiental.
https://www.aytopalencia.es/sites/default/files/ayuntamiento/planeamiento/P_GOU/tomo_x_informe_ambiental_0.pdf
- [17] Monjo Carrió, J. & Maldonado Ramos, L. PATOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INTERVENCIÓN EN ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS.
http://oa.upm.es/45423/1/2001_patologia_MC_opt.pdf
- [18] Poves Ferrer, F. EXPOSICIÓN DE LAS PATOLOGÍAS MÁS HABITUALES EN LOS EDIFICIOS. Colegio de la arquitectura técnica de Cantabria.
www.activatie.org/descarga.php?documento=pu1441882661.pdf
- [19] Gómez de Cózar, J. C. & Rodríguez Liñán, C. ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS ESPACIALES DE FÁBRICA (BÓVEDAS Y CÚPULAS) EN CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS – LAS BÓVEDAS DE NERVADURAS DEL REINO DE SEVILLA (S. XIII-XV). Sevilla. <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/23927>

ANEXO I

El Excel consta de dos pestañas. Una primera para la definición de causas y una segunda, en la que se relacionan los daños y las causas para cada elemento, y la normativa que incumplen.

ESTRUCTURAS TRIDIMENSIONALES	
CAUSA	DESCRIPCIÓN
Error de dimensionado	Mal diseño de la curvatura del arco, cimbra, o un mal dimensionado de los estribos. Esto también se puede reflejar en un cálculo erróneo de las cargas que va soportar el elemento. En el caso de estructuras tridimensionales malladas sería un mal dimensionado de los elementos que conforman la malla.
Suelos no competentes	Si uno de los apoyos desciende respecto al otro como consecuencia de un mal asentamiento en el terreno, se perderá el reparto homogéneo de las cargas a lo largo del elemento.
Deterioro de los materiales	Deterioro por ataques físicos: erosión, efecto de los ciclos congelación-descongelación del agua. Deterioro por ataques químicos: corrosión, biodeterioro o contaminación. En el acero se puede encontrar el fenómeno de desgarro laminar (limitada resistencia del material en la dirección que ha sido laminado). En el caso de la madera tendrá gran importancia la aparición de insectos en ella: carcoma, termitas, etc.
Error en la puesta en obra	Afogado del hormigón: Fuerte secado superficial (producido por tiempo seco, altas temperaturas o viento) produciendo que el hormigón sufra una disminución de su volumen y se contraiga creando fisuras. Retracción hidráulica del hormigón: Pérdidas de agua del hormigón durante el endurecimiento del mismo, generando que el hormigón se contraiga. El error también puede ser ocasionado por la falta de separadores o altura incorrecta de ellos. En el caso de la fábrica errores en la aplicación del mortero. En las tridimensionales malladas un disposición erróneo de las barras o nudos.
Defectos en la unión	En el caso de elementos constructivos de fábrica, defectos entre el elemento en sí y el elemento de sustentación del mismo. En caso de tridimensionales malladas, son errores producidos en uniones soldadas (insuficiente profundidad del cordón de soldadura, etc.) y atornilladas (Insuficiente capacidad resistente de los tornillos, bien por ser pocos o por tener poca sección, pletinas demasiado delgadas, etc.).
Inadecuación funcional	Incompatibilidad entre materiales habiendo grandes diferencias en el coeficiente de dilatación, rigidez del material estructural y el que se va a reforzar. Cambios térmicos, en el caso del acero cambiando sus propiedades.

SINIESTROS CATALOGADOS (DAÑOS OBJETO DE PREVENCIÓN)							
abc-ELEMENTO CONSTRUCTIVO / d-CAUSA	DAÑOS	INCUMPLIMIENTO NORMATIVO					
		SE	SI	SUA	HE	HR	HS
29	ESTRUCTURAS:tridimensionales						
	290 Bóvedas						
	Error de dimensionado						
	Suelos no competentes						
	Deterioro de los materiales						
	Error en la puesta en obra						
	Defectos en la unión						
	291 Arcos						
	Error de dimensionado						
	Suelos no competentes						
	Deterioro de los materiales						
	Error en la puesta en obra						
	Defectos en la unión						
	292 Cúpulas						
	Error de dimensionado						
	Suelos no competentes						
	Deterioro de los materiales						
	Error en la puesta en obra						
	Defectos en la unión						
	293 Estructuras tridimensionales malladas						
	Deterioro de los materiales						
	Error de dimensionado						
	Error en la puesta en obra						
	Defectos en la unión						
	Inadecuación funcional						