

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



Máster en planificación y gestión en ingeniería civil

**ESTADO DEL ARTE DE LOS FACTORES QUE
AFECTAN A LA DURABILIDAD DE LAS
EDIFICACIONES**

Por

Vicente Francisco Esteve Muñoz

Autor / <i>Author:</i> Vicente Fco. Esteve Muñoz	Fecha / <i>Date:</i> 2015
Título / <i>Title:</i> “Estado del arte de los factores que afectan a la durabilidad de las edificaciones”	
Director / <i>Supervisor:</i> Dr. Víctor Yepes Piqueras	
Departamento-Máster / <i>Department-Master:</i> Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos Máster Universitario en Planificación y Gestión en Ingeniería Civil	
Universidad / <i>University:</i> Universidad Politécnica de Valencia	
Palabras clave / <i>Keywords:</i> Building durability, service life of building, building vulnerability, lifetime, life cycle, longevity, factors, performance	

SINOPSIS

La durabilidad de las edificaciones es un tema de especial importancia durante todo el proceso constructivo de cualquier edificación, desde la planificación y diseño hasta la explotación y mantenimiento de las mismas. Dicha durabilidad está influenciada por multitud de factores, el conocimiento de los cuales permite gestionar mejor y modificar la vida útil de las edificaciones, adaptándola a nuestras necesidades. La durabilidad también está estrechamente ligada a aspectos medioambientales, ya que la construcción genera grandes cantidades de contaminación y residuos, y consume grandes cantidades de energía y recursos naturales. Debido a la importancia del sector de la construcción, especialmente durante el siglo XX, y a las cuestiones medioambientales, que adquieren año tras año mayor importancia en la sociedad, durante los últimos años se ha aumentado el interés en investigar y determinar la durabilidad y vida útil de las edificaciones, y de sus elementos y componentes, tanto de edificaciones ya existentes como de futuras edificaciones. Y para ello es necesario el conocimiento y la investigación de los principales factores que la influyen.

En este estudio se establece el estado actual del conocimiento sobre los principales factores que afectan a la durabilidad de las edificaciones, teniendo en cuenta los elementos y componentes que forman parte de ellas, así como las distintas fases del proceso constructivo (diseño, construcción y explotación). También se analiza la relación existente entre la durabilidad y su impacto en el medioambiente, y cómo la durabilidad forma parte de las estrategias de construcción sostenible. Por último el autor aporta sus conclusiones y propone futuras líneas de investigación.

RESUMEN EJECUTIVO

La durabilidad se define de manera generalizada como la capacidad de los edificios para soportar la influencia de determinados agentes y desenvolver el papel para el cual fueron diseñados, durante la vida útil para la cual han sido proyectados. Entre las definiciones relacionadas con la durabilidad, cabe destacar, por un lado, el concepto de rendimiento, dentro del cual el factor de la durabilidad es uno de los factores más importantes, ya que el rendimiento disminuye a lo largo del tiempo, hasta alcanzar el rendimiento mínimo requerido que pone fin a la vida de servicio del componente o edificación. Por otro lado, el concepto de obsolescencia y sus diferentes tipos, ya que es una de las principales causas que pone fin a la vida útil de las edificaciones.

Para determinar la durabilidad de una edificación es necesario identificar y cuantificar cuáles son los factores que afectan a la durabilidad de los elementos y componentes de la edificación. Dichos factores son el objeto de estudio del presente Trabajo Final de Máster, en el cual se ha analizado el estado actual del conocimiento y la relación existente entre la durabilidad y su impacto medioambiental.

El estudio del estado del arte se realizó a través de cinco fases: recopilación preliminar de la información, búsqueda bibliométrica y depuración de artículos, clasificación de las referencias encontradas, análisis y explotación de los resultados, y profundización de los artículos más relevantes. Algunos de los resultados obtenidos más destacados se analizan a continuación:

- De los 2.352 artículos encontrados inicialmente, tras la realización de las correspondientes depuraciones, 215 estaban relacionados con el tema de estudio de la investigación (9% del total), y fueron procesados y analizados.
- SCOPUS fue la base de datos en la que se encontraron mayor número de publicaciones, aportando el 71% de los artículos sobre el total.
- Tras realizar las correspondientes depuraciones, la estrategia de búsqueda más efectiva fue la estrategia que relaciona los factores de durabilidad con los elementos y componentes de una edificación (35% del total), seguida por la estrategia que muestra las generalidades sobre durabilidad (30% del total), y por las estrategias centradas en los factores que afectan a la durabilidad en el proceso de diseño y planificación y en el proceso de explotación y mantenimiento (11% del total en ambos casos).
- La revista científica con mayor número de publicaciones fue "Building Research and Information", representando el 7,91% del total, y el autor con mayor número de publicaciones fue Shohet, I.M., con 5 artículos.
- Al analizar la evolución de la investigación, se observa, a partir de 1995, un crecimiento progresivo de la producción científica referida al tema de estudio. La mayoría de los artículos corresponden a la década comprendida entre el año 2000 y 2010, sin embargo, en la década actual ya se han superado más de la mitad de artículos publicados en la década anterior, por lo que la previsión indica que el ritmo de publicaciones sigue aumentando en la década actual y probablemente superará a las anteriores décadas. En cuanto a la temática de

los artículos, los artículos relacionados con la durabilidad en el diseño, la durabilidad de los componentes y las generalidades son los que primero empiezan a aparecer, mientras que los artículos sobre la durabilidad relacionada con el medio ambiente son los que más tarde aparecen, lo que muestra cómo los factores medioambientales no se han tenido demasiado en cuenta hasta los últimos años, en los que cobran una enorme importancia.

- Europa es el continente del que proceden la mayoría de los artículos referentes al tema de estudio. En cuanto a países, Estados Unidos es el que tiene mayor número de publicaciones (17,67%), seguido por Reino Unido (8,37%), Canadá (8,37%) y China (7,44%).

Tras la realización del análisis bibliométrico se realizó una recapitulación de los aportes más importantes relacionados con los factores que afectan a la durabilidad de las edificaciones, y se aportaron las conclusiones y futuras líneas de investigación. A continuación se resumen los principales aportes obtenidos del estudio.

La durabilidad de una edificación se debe considerar como un conjunto de sistemas en el que cada uno tiene una vida de servicio diferente, debido a que las edificaciones están compuestas tanto por elementos permanentes como por elementos reemplazables. Para la determinación de la vida de servicio de una edificación es necesario identificar y cuantificar en primer lugar los factores que afectan a la durabilidad de los elementos y componentes. De entre los diversos métodos de predicción de vida útil, el más importante es el método de los factores, regulado por la norma ISO 15686.

La durabilidad se debe tener en cuenta desde la fase de planificación y diseño, siendo el diseño uno de los factores más importantes para prolongar la vida útil. Sin embargo, el diseño para la durabilidad no puede asegurarse si no se tienen en cuenta todas las consideraciones a través del ciclo de vida completo de una edificación. La aplicación y uso de la información de la vida útil y del rendimiento durante la fase de diseño permite lograr edificios más eficientes en aspectos de durabilidad, mantenimiento, confort, impacto ambiental y rendimiento funcional. Existen varias herramientas de diseño en las que se tienen en cuenta aspectos de durabilidad, como es el caso del diseño por ciclo de vida (DCV) y del diseño basado en el rendimiento (Performance-Based Design).

En cuanto a la fase de construcción, la ejecución tiene una gran importancia para obtener el rendimiento y la durabilidad de diseño. La calidad de la construcción y mano de obra es un factor clave para la durabilidad, y es necesario realizar una elevada inspección y supervisión. Otros factores clave son la utilización de guías de buenas prácticas y de materiales prefabricados.

En relación a la fase de mantenimiento, la selección de la estrategia de mantenimiento adecuada y la realización de reparaciones pueden extender la vida de servicio y controlar el proceso inevitable de deterioro. Además, para poder realizar una planificación adecuada del mantenimiento, es necesario disponer de información fiable sobre la vida de servicio de los componentes de la edificación.

La vida de servicio de los elementos y componentes está en función de factores intrínsecos, relacionados con el diseño y construcción, y factores extrínsecos,

relacionados con la explotación. Los principales factores que influyen la durabilidad de los componentes de un edificio son la edad, el estado del propietario (público o privado), el ambiente, la humedad, y la calidad de los materiales, instalaciones y construcción. La durabilidad es especialmente importante en la envolvente, en la estructura y en las zonas húmedas de interiores. Dentro de la envolvente, se requiere que las fachadas tengan prestaciones combinadas, más exigentes que para otros elementos, en materia de durabilidad, aislamiento, permeabilidad y estética. En cuanto a la durabilidad de las cubiertas, está enormemente influenciada por las condiciones del clima y de la contaminación del aire. Los factores que afectan a la durabilidad de las estructuras varían en función del tipo de material de la estructura (hormigón armado, madera, acero o fábrica).

Por último, la durabilidad de un edificio y de sus componentes es importante para el medioambiente, para la conservación de los recursos naturales y para la disminución de residuos. Además, la aplicación y utilización de la información de la vida útil en el proceso de diseño logra prever y disminuir los impactos ambientales que pueda causar un proyecto de edificación, ayudando así a la sostenibilidad de la construcción. Existen diversas estrategias que mejoran la sostenibilidad, como la reutilización adaptativa y la reutilización de componentes, la selección de materiales y sistemas que utilicen recursos no perjudiciales para el medioambiente, o la mejora de la durabilidad de las estructuras.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	17
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.2. OBJETO. DELIMITACIÓN. ALCANCE	18
1.3. OBJETIVOS	19
1.3.1. Principales.....	19
1.3.2. Secundarios.....	19
1.4 HIPÓTESIS	19
1.5. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO.....	20
1.6 DEFINICIONES BÁSICAS	20
1.6.1. Durabilidad.....	21
1.6.2. Vida útil.....	21
1.6.3. Fin de la vida útil.....	22
1.6.4. Rendimiento.....	23
1.6.5. Vulnerabilidad.....	24
1.6.6. Mantenibilidad.....	24
2. METODOLOGÍA Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	27
2.1. FASE 1. RECOPIACIÓN PRELIMINAR DE LA INFORMACIÓN.....	27
2.2. FASE 2. BÚSQUEDA BIBLIOMÉTRICA Y DEPURACIÓN DE ARTÍCULOS.....	28
2.3. FASE 3. CLASIFICACIÓN DE LAS REFERENCIAS ENCONTRADAS.....	33
2.4. FASE 4. ANÁLISIS Y EXPLOTACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	35
2.4.1. Referencias encontradas según base de datos.....	35
2.4.2. Autores con mayor número de publicaciones.....	41
2.4.3. Revistas científicas con mayor número de publicaciones.....	42
2.4.4. Evolución de la investigación.....	43
2.4.5. Países de donde proceden las investigaciones.....	47
2.5. FASE 5. PROFUNDIZACIÓN DE LOS ARTÍCULOS MÁS RELEVANTES	50
3. ESTADO DEL ARTE.....	53
3.1. INTRODUCCIÓN	53
3.2. GENERALIDADES SOBRE DURABILIDAD	54
3.2.1. Concepto de rendimiento de una edificación.....	55
3.2.2. Concepto de obsolescencia de una edificación.....	56
3.2.3. Métodos para la predicción de la vida de servicio de una edificación.....	56

3.3. CONSIDERACIONES SOBRE DURABILIDAD EN LA FASE DE DISEÑO.....	62
3.3.1. Información de la vida útil en las fase de planificación y diseño.	63
3.3.2. Planificación de la vida de servicio (Service Life Planning).	64
3.3.3. Diseño por ciclo de vida (DCV).	65
3.3.4. Diseño basado en el rendimiento (Performance-Based Design) de riesgos. ...	66
3.3.5. Reutilización adaptativa y reutilización de componentes en la fase de diseño	68
3.3.6. Factores de diseño que afectan a la durabilidad en interiores de edificaciones.	69
3.3.7. Normativas sobre el factor de la durabilidad en el diseño de edificaciones.	70
3.4. CONSIDERACIONES SOBRE DURABILIDAD EN LA FASE DE EJECUCIÓN.....	76
3.4.1. Factores generales de ejecución que afectan a la durabilidad de las edificaciones.	76
3.4.2. Factores de ejecución que afectan a la durabilidad de las estructuras de hormigón armado.	76
3.4.3. Factores de ejecución que afectan a la durabilidad en construcciones interiores.	79
3.5. CONSIDERACIONES SOBRE DURABILIDAD EN LA FASE DE MANTENIMIENTO	80
3.5.1. Tipos de mantenimiento.....	82
3.5.2. El mantenimiento en las diferentes etapas del proceso constructivo.....	83
3.5.3. Mantenibilidad de edificaciones.	83
3.5.4. Modelos de degradación según tipo de mantenimiento.....	94
3.5.5. Técnicas para seleccionar las estrategias de mantenimiento más efectivas. ..	97
3.5.6. Evaluación de la condición de los edificios.....	97
3.5.7. Diagnóstico y rehabilitación de estructuras de hormigón armado.....	98
3.6. CONSIDERACIONES SOBRE DURABILIDAD DE LOS ELEMENTOS Y COMPONENTES DE UNA EDIFICACIÓN	98
3.6.1. Factores que afectan a la durabilidad de los componentes de una edificación.	98
3.6.2. Condiciones de servicio de los componentes de una edificación.	102
3.6.3. Efectos de la humedad y bio-deterioración en materiales y estructuras de edificación.....	103
3.6.4. Durabilidad de la envolvente.....	104
3.6.5. Durabilidad de las estructuras.....	110
3.6.6. Durabilidad de las zonas húmedas en interiores de edificaciones.....	118

3.7. RELACIÓN ENTRE LA DURABILIDAD Y SU IMPACTO EN EL MEDIOAMBIENTE	121
3.7.1. Introducción. El consumo de la industria de la construcción y sus efectos en el medio ambiente.	121
3.7.2. Diseño para la construcción sostenible.	122
3.7.3. Influencia de los materiales y componentes en la sostenibilidad de edificaciones.	124
3.7.4. Reutilización adaptativa y reutilización de componentes.	124
3.7.5. Sostenibilidad de edificaciones de hormigón.	124
4. ANÁLISIS Y EXPLOTACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.....	129
5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	139
5.1. CONCLUSIONES.....	139
5.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	143
ANEXOS.....	147
ANEXO 1. CONSIDERACIONES SOBRE DURABILIDAD EN LA INSTRUCCIÓN DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL (EHE-08)	147
A.1.1. ESTRATEGIA PARA LA DURABILIDAD ESTABLECIDA POR LA EHE-08..	148
A.1.2. CONSIDERACIONES DE DURABILIDAD EN FASE DE PROYECTO SEGÚN LA EHE-08.....	151
A.1.3. CONSIDERACIÓN DE LA DURABILIDAD EN LA FASE DE EJECUCIÓN...	152
A.1.4. ESTADO LÍMITE DE DURABILIDAD.....	152
ANEXO 2. CONSIDERACIONES SOBRE DURABILIDAD EN EL CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN (CTE)	154
A.2.1 EXIGENCIAS BÁSICAS DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL	155
A.2.2. EFECTOS DEL TIEMPO (DURABILIDAD Y FATIGA).....	158
A2.3. ACCIONES EN LA EDIFICACIÓN (SE-AE).....	159
A.2.4. SEGURIDAD ESTRUCTURAL - CIMIENTOS (SE-C).....	160
A.2.5. SEGURIDAD ESTRUCTURAL - ACERO (SE-A).....	161
A.2.6. SEGURIDAD ESTRUCTURAL - FÁBRICA (SE-F)	161
A.2.7. SEGURIDAD ESTRUCTURAL - MADERA (SE-M).....	162
A.2.8. EXIGENCIAS BÁSICAS DE SEGURIDAD EN CASO DE INCENDIO	164
BIBLIOGRAFÍA.....	167

Lista de figuras y tablas

Figura 1.1. Degradación de las diferentes propiedades de un elemento constructivo. Fuente: Ferreira, 2009.	23
Figura 2.1. Distribución de los artículos según su contribución.	34
Figura 2.2. Distribución de las referencias según base de datos.	36
Figura 2.3. Distribución de las referencias para cada base de datos y para cada estrategia de búsqueda.	37
Figura 2.4. Distribución de las referencias según las estrategias de búsqueda.	38
Figura 2.5. Distribución de las referencias según las estrategias de búsqueda tras realizar la tercera depuración.	40
Figura 2.6. Distribución del número de artículos de acuerdo a su contribución para cada estrategia de búsqueda.	41
Figura 2.7. Evolución del número de artículos por cada año.	45
Figura 2.8. Porcentaje acumulado de artículos para cada año.	45
Figura 2.9. Número de artículos para cada década.	46
Figura 2.10. Número acumulado de artículos para cada año clasificados según la estrategia de búsqueda a la que pertenecen.	47
Figura 2.11. Distribución de los artículos por continentes.	49
Figura 2.12. Número de artículos por países clasificados según su continente.	50
Figura 3.1. Rendimiento a lo largo del tiempo. Fuente: elaboración propia en base a Trinius et al., 2005.	55
Figura 3.2. Proceso de estimación de la vida de servicio a partir de la vida de servicio de referencia. Fuente: Elaboración propia en base a Straub, 2011.	59
Figura 3.3. Ciclo de vida de los edificios incluyendo el ciclo de vida de los materiales. Fuente: Hernández, 2011.	65
Figura 3.4. Esquema del diseño basado en el rendimiento (Performance Based Design). Fuente: elaboración propia en base a Van De Lindt et al., 2009.	66
Figura 3.5. Esquema del concepto de la “Principal Guide for Service Life Planning of Buildings. Fuente: elaboración propia en base a Nireki, 1996.	73
Figura 3.6. Esquema del proyecto para conseguir la mantenibilidad de las edificaciones en Singapur. Fuente: elaboración propia en base a Chew et al., 2004.	84
Figura 3.7. Defectos en fachadas. Fuente: elaboración propia en base a Chew et al., 2004.	86
Figura 3.8. Defectos en zonas húmedas. Fuente: elaboración propia en base a Chew et al., 2004.	87
Figura 3.9. Factores de mantenibilidad. Fuente: elaboración propia en base a Chew et al., 2004.	88
Figura 3.10. Porcentaje de defectos en zonas húmedas. Fuente: elaboración propia en base a Chew y Silva, 2003.	89
Figura 3.11. Relación entre los estados de degradación y las operaciones de mantenimiento. Fuente: Flores-Colen y Brito, 2010.	94
Figura 3.12. Modelos de degradación, para revestimiento de mortero monocapa: sin mantenimiento (izquierda) y con operaciones de limpieza periódicas (derecha). Fuente: Flores-Colen y Brito, 2010.	96

Figura 3.13. Modelos de degradación, para revestimiento de mortero monocapa: con pequeñas operaciones de reparación (izquierda) y con una única operación de reparación importante (derecha). Fuente: Flores-Colen y Brito, 2010.....	96
Figura 3.14. Durabilidad de los materiales de fachada en diferentes zonas. Fuente: elaboración propia en base a Chew et al., 2004.	99
Figura 3.15. Descomposición según los códigos de deterioración para elementos arquitectónicos y de instalaciones en D (Alemania), DK (Dinamarca), F (Francia), GR (Grecia), I (Italia), PL (Polonia), y CH (Suiza). Resultados en orden descendente según código 'd'. Fuente: Balaras et al., 2005.	101
Figura 3.16. Factores que influyen la durabilidad del edificio, ordenados de acuerdo a importancia relativa media para todos los elementos influidos. Fuente: elaboración propia en base a Balaras et al., 2005.	101
Figura 3.17. Patrones de fallo. Fuente: Moubray, 1997.	102
Figura 3.18. Causas de degradación en las estructuras de madera estudiadas. Fuente: elaboración propia en base a Mariño et al., 2009.....	115
Figura 3.19. Frecuencia de defectos identificada. Fuente: elaboración propia en base a Chew, 2005. ...	118
Figura 3.20. Alcance de los defectos. Fuente: elaboración propia en base a Chew, 2005.	119
Figura 3.21. Contribución del diseño, construcción, mantenimiento y materiales en los defectos. Fuente: elaboración propia en base a Chew, 2005.	119
Figura 3.22. Contribución general en la aparición de defectos. Fuente: elaboración propia en base a Chew, 2005.	120
Figura 4.1. Esquema de los principales factores que afectan a la durabilidad de las edificaciones. Fuente: elaboración propia.	130
Figura 4.2. Diagrama de Ishikawa con las principales causas que provocan una baja durabilidad. Fuente: elaboración propia.	131
Figura 4.3. Esquema de las principales ventajas medioambientales que supone la mejora de la durabilidad. Fuente: elaboración propia.....	132
Figura A.1.1. Estrategia de durabilidad establecida en la EHE-08.	150
Figura A.1.2. Comprobación del Estado Límite de Durabilidad.	154
Tabla 2.1. Resultados de las referencias encontradas para cada estrategia de búsqueda y según base de datos.	29
Tabla 2.2. Primera depuración de las referencias encontradas.	31
Tabla 2.3. Segunda depuración de las referencias encontradas. Eliminación de los duplicados utilizando la herramienta refworks.	32
Tabla 2.4. Clasificación de artículos según el nivel de proximidad con el tema. Tercera depuración de las referencias encontradas. Eliminación de las referencias del nivel C.	33
Tabla 2.5. Clasificación de artículos según el nivel de contribución al estudio.	34
Tabla 2.6. Resumen de la búsqueda y depuración de artículos.	35
Tabla 2.7. Número de referencias encontradas en cada base de datos y para cada estrategia de búsqueda.....	36
Tabla 2.8. Resumen de las referencias encontradas para cada estrategia de búsqueda.	38
Tabla 2.9. Resumen de las referencias encontradas para cada estrategia de búsqueda tras realizar la tercera depuración.....	39
Tabla 2.10. Número de artículos de acuerdo a su contribución para cada estrategia de búsqueda.	40

Tabla 2.11. Autores con mayor número de publicaciones respecto a los 215 artículos encontrados.	42
Tabla 2.12. Revistas científicas con mayor número de publicaciones respecto a los 215 artículos encontrados.	43
Tabla 2.13. Evolución anual de la investigación.	44
Tabla 2.14. Procedencia de los artículos.	48
Tabla 3.1. Factores en la norma ISO 15686-1. Fuente: ISO 15686-1, Anexo E (traducción propia).	58
Tabla 3.2. Factores y criterios de diseño. Fuente: Straub, 2011 (traducción propia).	60
Tabla 3.3. Factores y criterios de ejecución. Fuente: Straub, 2011 (traducción propia).	60
Tabla 3.4. Factores y criterios del ambiente interior. Fuente: Straub, 2011 (traducción propia).	61
Tabla 3.5. Factores y criterios del ambiente exterior. Fuente: Straub, 2011 (traducción propia).	61
Tabla 3.6. Factores y criterios de la función y utilización. Fuente: Straub, 2011 (traducción propia).	62
Tabla 3.7. Factores y criterios de mantenimiento. Fuente: Straub, 2011 (traducción propia).	62
Tabla 3.8. Factores que afectan a la durabilidad de zonas húmedas asociados al diseño. Fuente: Chew y Silva, 2003 (traducción propia).	69
Tabla 3.9. Categoría de la vida útil de diseño de edificios. Fuente: BSI, 1992.	71
Tabla 3.10. Categorías de la vida útil de diseño de edificios contenida en la normativa canadiense CSA 478-95. Fuente: Canadian Standards Association, 2007.	71
Tabla 3.11. Resumen de las definiciones encontradas en las normas. Fuente: elaboración propia a partir de las normas BS7543, S478 y Japanese Principal Guide.	74
Tabla 3.12. Sugerencias de vidas de diseño mínimas por componentes. Fuente: ISO 15686, 2000.	75
Tabla 3.13. Factores que afectan a la durabilidad de zonas húmedas asociados a la ejecución. Fuente: Chew y Silva, 2003 (traducción propia).	80
Tabla 3.14. Principales causas de los defectos. Fuente: elaboración propia en base a Chew y Silva, 2003.	90
Tabla 3.15. Desglose de defectos. Fuente: elaboración propia en base a Chew y Silva, 2003.	92
Tabla 3.16. Factores que afectan a la durabilidad de zonas húmedas asociados al mantenimiento y a los materiales. Fuente: Chew y Silva, 2003 (traducción propia).	93
Tabla 3.17. Mecanismos de fallo de la envolvente. Fuente: Mora et al., 2011.	104
Tabla 3.18. Procesos de degradación del hormigón armado según C.E.B.	111
Tabla 3.19. Necesidades de información del producto en diferentes tareas de los procesos de edificación y mantenimiento. Fuente: Hakkinen, 2007 (traducción propia).	123
Tabla 4.1. Factores sobre los que tratan las investigaciones de los principales autores. Fuente: elaboración propia.	134
Tabla 4.2. Resumen de los factores sobre los que tratan las investigaciones de los principales autores. Fuente: elaboración propia.	135
Tabla A.1.1. Vida útil nominal de los diferentes tipos de estructuras. Fuente: EHE-08.	147
Tabla A.2.1. Exigencias básicas correspondientes a cada uno de los requisitos básicos. Fuente: CTE.	155

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria de la construcción ha experimentado un gran crecimiento a lo largo del tiempo, principalmente a partir del siglo XX. Este crecimiento se debe, según un artículo publicado por Metha y Burrows (2001), a que a partir de entonces se produjeron cambios importantes de tipo social, demográfico, tecnológico y ambiental. Estos autores interpretan que tanto los cambios sociales como los tecnológicos son consecuencia de la necesidad de viviendas e infraestructuras, sin embargo los cambios ambientales son fruto de la elevada concentración de gases nocivos en la atmósfera. Una de las principales causas de esta concentración de gases es la industria de la construcción, ya que según varias publicaciones (Metha y Burrows, 2001; Graciela, 2004) para la construcción se utilizan grandes cantidades de cemento y acero, entre otros materiales, los cuales durante su fabricación emiten una gran cantidad de dióxido de carbono a la atmósfera. Por tanto, una de las soluciones a este problema puede ser la optimización y conservación de estos dos materiales. Mehta y Burrows (2001) concluyen en su artículo *“Building durable structures in the 21st century”* que para construir de una manera ambientalmente sostenible, en lugar de resistencia, la práctica constructiva deberá tener consideraciones de durabilidad.

Además de la gran cantidad de emisiones de dióxido de carbono que genera la industria de la construcción, esta industria también consume grandes cantidades de energía y recursos naturales. Han surgido distintas estrategias para lograr un desarrollo sostenible, entre las que se encuentra prolongar la vida útil de las construcciones. En este sentido, algunos autores, como Eperjesi et al. (2011) determinan que prolongar la vida útil es una estrategia que permite reducir el consumo de materiales, y por tanto permite conservar recursos naturales no renovables, disminuir el consumo energético y disminuir la contaminación derivada de los distintos materiales de construcción. Para dichos autores, actualmente el desarrollo sostenible de la construcción se apoya en los siguientes pilares fundamentales:

- el ahorro energético,
- la durabilidad de las construcciones,
- y la preservación del medio ambiente (Eperjesi et al., 2011).

Por tanto, debido a estas cuestiones medioambientales, y a la importancia del sector de la construcción, en los últimos años ha aumentado el interés por determinar la durabilidad y la vida útil de los elementos constructivos de los edificios, así como de sus materiales y componentes. Según el estudio realizado por Moser y Hovde *“Performance based methods for service life prediction”* (Moser y Hovde, 2004), este interés viene determinado por cuestiones medioambientales y por cuestiones

económicas. Las cuestiones medioambientales citadas en dicho estudio son las siguientes:

- La escasez de recursos materiales y energéticos, y el importante consumo de estos recursos por parte del sector de la construcción.
- El impacto medioambiental causado por los edificios (Moser y Hovde, 2004).

Las cuestiones económicas citadas en el estudio nombrado anteriormente son las siguientes:

- El valor total de las construcciones a nivel nacional y el valor de cada construcción específica para sus propietarios.
- Los costes anuales de inspección y mantenimiento y los costes del ciclo de vida (Moser y Hovde, 2004).

En definitiva, los motivos mencionados anteriormente muestran la importancia actual y futura que tiene la consideración de la durabilidad en las construcciones. Por todo ello, para poder determinar la durabilidad y la vida útil de los elementos constructivos de los edificios, así como de sus materiales y componentes, es fundamental conocer todos los factores que la afectan. Dichos factores son imprescindibles para poder utilizar los modelos de predicción de vida útil. Cuanto mayor conocimiento se tenga sobre los factores que afectan a la durabilidad, mayor será la fiabilidad de la predicción de la vida útil.

1.2. OBJETO. DELIMITACIÓN. ALCANCE

El objeto de esta investigación son los factores que pueden afectar a la durabilidad de todo tipo de edificaciones, tanto de uso privado como de uso público.

El alcance del presente trabajo se define teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Desde el punto de vista geográfico: el alcance es mundial, debido a que abarca a todos los países en los que el sector de la construcción está desarrollado y en los que, por tanto, la durabilidad y vida útil de las edificaciones es un tema de especial interés.
- Desde el punto de vista lingüístico: la mayor parte de la investigación se ha desarrollado consultando bibliografía en español e inglés, idiomas en los que se encuentra la mayor parte de la literatura referente al tema de esta investigación.
- En cuanto a legislación, se ha estudiado principalmente la normativa referente a España y a la Unión Europea, aunque también se han consultado normativas de países no pertenecientes a la Unión Europea.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Principales.

El objetivo principal del estudio es:

- Establecer el estado actual del conocimiento sobre los factores principales que afectan a la durabilidad de las edificaciones. Para ello se tendrán en cuenta todos los elementos que forman parte de una edificación, así como las fases de diseño, construcción y explotación de la edificación.

1.3.2. Secundarios.

A su vez, con esta investigación se pretende llegar a una serie de objetivos específicos:

- Realizar una búsqueda bibliométrica sobre el tema de la investigación, utilizando para ello estrategias de búsqueda.
- Identificar y seleccionar las principales bases de datos en las cuales se realizará la búsqueda bibliométrica.
- Realizar un análisis cuantitativo de los resultados obtenidos mediante la elaboración de gráficos y tablas.
- Realizar un análisis cualitativo desarrollando los principales aportes de los artículos de mayor relevancia.
- Establecer el estado del arte a partir de los resultados obtenidos anteriormente.
- Obtener las conclusiones del estudio.
- Proponer futuras líneas de investigación.

1.4 HIPÓTESIS

Mi hipótesis personal se fundamenta en que conociendo todos los factores que afectan a la durabilidad de las edificaciones se puede gestionar mejor y modificar la vida útil de las mismas, adaptándola a nuestras necesidades.

Para poder utilizar cualquier modelo de predicción de vida útil y que sus resultados sean lo más precisos posible es fundamental estudiar y conocer todos los factores que puedan influir en la durabilidad de las edificaciones o de sus componentes, desde su diseño hasta el final de su vida útil. La planificación y predicción de la vida útil está íntimamente relacionada con los procesos de diseño sostenible en edificación, debido a que se tienen en cuenta factores como la

durabilidad y el rendimiento de los componentes constructivos, así como su impacto ambiental.

1.5. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El presente trabajo está dividido en los siguientes capítulos:

- Capítulo 1. Introducción: describe el planteamiento inicial del problema, el objeto, delimitación y alcance, los objetivos principales y secundarios, la hipótesis de partida, un breve resumen del documento y las definiciones básicas.
- Capítulo 2. Metodología y diseño de la investigación: muestra el proceso seguido para la realización de la búsqueda bibliométrica, así como el procesamiento de artículos. Este capítulo también incluye la explotación y análisis cuantitativo de los resultados mediante la utilización de gráficos y tablas.
- Capítulo 3. Estado actual del conocimiento: analiza los principales aportes de los artículos más significativos y de mayor importancia, como resultado de la búsqueda bibliográfica y del análisis cualitativo de los resultados. Dichos aportes se clasifican en diferentes secciones, correspondientes a los diferentes enfoques establecidos al realizar la investigación.
- Capítulo 4. Análisis y explotación de estado del arte: en este capítulo se han elaborado esquemas y tablas a partir de los resultados obtenidos tras la realización del estado del arte.
- Capítulo 5. Conclusiones y futuras líneas de investigación: contiene la interpretación de los resultados, las conclusiones del estudio y las posibles futuras líneas de investigación surgidas tras la realización de este estudio.
- Anexos: resumen las consideraciones sobre durabilidad encontradas en las normas de aplicación en España, la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) y el código técnico de la edificación (CTE).
- La bibliografía presenta el listado de las referencias bibliográficas consultadas para la realización de esta investigación, o que han sido incluidas en el análisis bibliográfico.

1.6 DEFINICIONES BÁSICAS

Para poder hablar sobre los factores que afectan a la durabilidad, es necesario primero definir el concepto de durabilidad según la normativa y según diversos autores, así como el concepto de vida útil, final de vida útil y rendimiento. También se

definen otros conceptos aparecidos en el estudio, como vulnerabilidad y mantenibilidad.

1.6.1. Durabilidad.

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) define la durabilidad de una estructura de hormigón como *“su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural. Una estructura durable debe conseguirse con una estrategia capaz de considerar todos los posibles factores de degradación y actuar consecuentemente sobre cada una de las fases de proyecto, ejecución y uso de la estructura”*.

En la norma ISO 15686-1 se define la durabilidad como *“la capacidad de los edificios o alguna de sus partes para desenvolver el papel para el cual fueron diseñados durante un período específico bajo la influencia de determinados agentes”*.

El concepto de durabilidad también puede ser entendido como la *“habilidad que un edificio o componente de un edificio tiene para alcanzar el rendimiento óptimo de sus funciones en un determinado ambiente o sitio, bajo un determinado tiempo sin realizar trabajos de mantenimiento correctivo ni reparaciones”* (CSA, 2001).

Algunos autores han intentado ofrecer una definición de durabilidad más completa, teniendo en cuenta los efectos actuales del cambio climático. Es el caso de J.M. Mendoza y P. Castro (2009), que definen la durabilidad como *“la capacidad de un material de construcción, elemento o estructura de hormigón de resistir las acciones físicas, químicas, biológicas y ambientales vinculadas al efecto del cambio climático global con su entorno durante un tiempo determinado previsto desde el proyecto, manteniendo su serviceabilidad y conservando su forma original, propiedades mecánicas y condiciones de servicio”*. Se entiende por serviceabilidad como la capacidad de un producto, componente, ensamble o construcción para desempeñar las funciones para las cuales son diseñadas y construidas (ACI, 2000).

1.6.2. Vida útil.

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) define la vida útil de una estructura como el *“período de tiempo, a partir de la fecha en la que finaliza su ejecución, durante el que debe mantenerse el cumplimiento de las exigencias. Durante ese período requerirá una conservación normal, que no implique operaciones de rehabilitación. La vida útil nominal depende del tipo de estructura y debe ser fijada por la Propiedad previamente al inicio del proyecto”*. En esta instrucción, se emplea el

término “vida útil” de forma equivalente a como lo hace el Código Técnico de la Edificación cuando hace referencia al “período de servicio”.

En la norma ISO 15686-1 se define la vida útil de un edificio como *“el período de tiempo después de la instalación o construcción durante el cual un edificio o sus partes cumplen o exceden los requisitos mínimos de rendimiento para lo cual fueron diseñados y construidos”*.

Muchas veces el concepto de vida útil es confundido con el de durabilidad. Según Silva (2001), puede considerarse que la vida útil es la cuantificación de la durabilidad, y por tanto es cada vez más importante que se proyecte y construya teniendo en cuenta criterios de durabilidad para, de ese modo, prolongar la vida útil de las edificaciones.

Algunos autores han propuesto una definición de vida útil o vida de servicio teniendo en cuenta los efectos actuales del cambio climático. Es el caso de J.M. Mendoza y P. Castro (2009), que definen la vida de servicio como el *“período de tiempo durante el cual el desempeño de un material, elemento o estructura de hormigón conserva los requerimientos de proyecto en términos de seguridad (resistencia mecánica y estabilidad, seguridad en caso de incendio, seguridad en uso), funcionalidad (higiene, salud y medio ambiente, protección contra el ruido y ahorro energético y confort térmico) y estéticos (deformaciones, agrietamientos, desconchamientos), con un mínimo de mantenimiento que permita controlar los efectos del cambio climático global en su entorno”*.

1.6.3. Fin de la vida útil.

Es difícil determinar cuándo se produce el final de la vida útil de una edificación. Según autores como Talon et al. (2004) *“el final de la vida útil llega cuando los materiales o componentes de construcción, una vez instalados y construidos, usados y aplicados a una parte del inmueble, ya no responden a los requerimientos de rendimiento; y cuando por sus fallos físicos ya no es conveniente económicamente seguir con un mantenimiento correctivo para dichos componentes”*.

Por su parte, otros autores como Gaspar (2002) definen el final de la vida útil de una construcción como un *“punto en el tiempo en el cual ésta deja de poder asegurar las actividades que en ella se desarrollan, por obsolescencia funcional, falta de rentabilidad económica o degradación física de sus componentes más determinantes”*.

En definitiva, el final de la vida útil se dará cuando los requisitos esenciales dejen de cumplirse. Los requisitos esenciales establecidos en el Código Técnico de la Edificación son:

- Seguridad estructural.
- Seguridad en caso de incendio.
- Seguridad de utilización y accesibilidad.
- Higiene, salud y protección del medio ambiente.
- Protección frente al ruido.
- Ahorro de energía.

En la siguiente gráfica, elaborada por Ferreira (2009), se muestra como el fin de la vida útil está condicionado por criterios de seguridad, funcionalidad y aspecto. La seguridad es el criterio más importante, por lo que tiene un nivel de exigencia superior a los otros dos criterios. A pesar de eso, algunas veces el fin de la vida útil puede verse condicionado sólo por criterios estéticos o funcionales, como muestra la figura (ver figura 1.1):

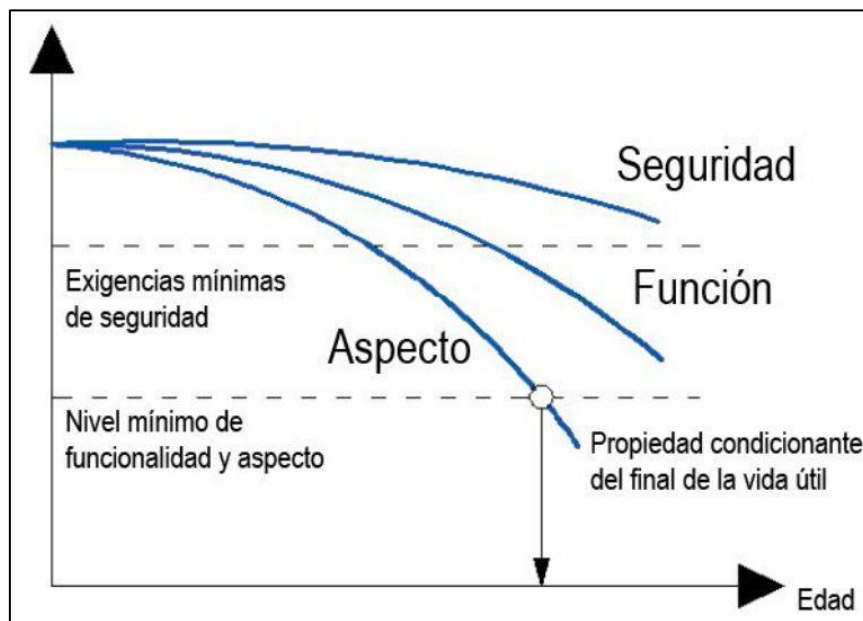


Figura 1.1. Degradación de las diferentes propiedades de un elemento constructivo. Fuente: Ferreira, 2009.

1.6.4. Rendimiento.

El rendimiento, según la definición de Trinius (2005), “es la capacidad del material para cumplir con sus funciones dentro del sistema edificado, y se puede medir tanto cuantitativamente como cualitativamente, dependiendo de los requerimientos de diseño y de las condiciones de la fase de uso, operación y mantenimiento del inmueble”.

Por su parte, el British Standards Institute define el rendimiento de una edificación como el comportamiento de un producto durante su utilización.

Tal como establece Mairteinson (2005), tanto la vida útil como el rendimiento dependerán directamente de los factores de uso del material, no solamente de manera aislada, sino de manera integrada al edificio como parte de un sistema completo.

1.6.5. Vulnerabilidad.

La vulnerabilidad, según es entendida por Monjo Carrió (2007), *“es el conjunto de debilidades (procesos patológicos posibles) que presenta un elemento constructivo al quedar expuesto a las acciones exteriores previsibles durante su vida útil”*. La vulnerabilidad depende de la calidad del elemento constructivo, es decir. De sus características físicas y químicas, así como de la solución constructiva empleada. Puede considerarse la inversa de la durabilidad.

Según desarrolla Monjo Carrió en su artículo *“Durabilidad vs vulnerabilidad”* (2007), la durabilidad de un producto de construcción debe establecerse en función del análisis de su vulnerabilidad, y dicha vulnerabilidad depende de una serie de condiciones objetivas que afectan al elemento constructivo:

- La función constructiva del elemento en el edificio.
- Las acciones externas que actúan sobre el elemento constructivo.
- La calidad del producto (Monjo, 2007).

1.6.6. Mantenibilidad.

La norma ISO/IEC 2382-14 define la mantenibilidad como *“la habilidad de una unidad funcional, bajo unas condiciones de uso dadas, para ser mantenidas, o restauradas a un estado en el cual puedan realizar sus funciones requeridas, cuando el mantenimiento es ejecutado bajo condiciones establecidas y utilizando procedimientos y recursos prescritos”*.

Por su parte, los autores M. Y. L. Chew y N. Silva expresan el término mantenibilidad como la habilidad de lograr el rendimiento óptimo a través de la vida útil del edificio con un mínimo coste de ciclo de vida (Chew y Silva, 2003).

2. METODOLOGÍA Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

2. METODOLOGÍA Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

En este apartado, se describe la secuencia de actividades realizadas y el método utilizado para la obtención de la información y la realización de la búsqueda bibliométrica. Dicha búsqueda es necesaria para la realización del análisis cuantitativo de los artículos científicos publicados, así como para la realización del análisis cualitativo de tales artículos. Para ello, la búsqueda se ha estructurado en diversas fases, que se desarrollan a continuación.

- Fase 1. Recopilación preliminar de la información.
- Fase 2. Búsqueda bibliométrica y depuración de artículos.
- Fase 3. Clasificación de las referencias encontradas.
- Fase 4. Análisis y explotación de los resultados.
- Fase 5. Profundización de los artículos más relevantes.

2.1. FASE 1. RECOPIACIÓN PRELIMINAR DE LA INFORMACIÓN.

En primer lugar, se realizó una búsqueda preliminar de artículos de revistas, libros, tesis doctorales, tesis de fin de máster, proyectos de fin de carrera, conferencias e informes de investigación relacionados con el tema de la investigación.

Esta búsqueda preliminar se realizó con el fin de ampliar los conocimientos sobre la durabilidad de las edificaciones y los factores que la afectan, así como para poder definir mejor las palabras clave y las estrategias de búsqueda que se emplearían en la búsqueda bibliométrica.

Para la realización de dicha búsqueda se utilizaron principalmente las siguientes palabras clave: “vida útil”, “periodo de servicio”, “durabilidad” y “edificaciones” para la búsqueda de literatura en español, y sus correspondientes traducciones al inglés para la búsqueda de literatura en inglés.

La búsqueda se realizó en un primer término a través de “Google académico” y posteriormente se amplió en bases de datos científicas, como “Scopus” y “Web of Science”. También se realizó una búsqueda de la normativa y la legislación referente a la durabilidad y vida útil de las edificaciones aplicable en España, como es el caso del Código Técnico de la Edificación (CTE) y de la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08), y aplicable a nivel europeo, como es el caso de las normas EN.

2.2. FASE 2. BÚSQUEDA BIBLIOMÉTRICA Y DEPURACIÓN DE ARTÍCULOS.

En segundo lugar, se realizó la búsqueda bibliométrica, utilizando para ello dos de las principales bases de datos debido a su importancia científica, y de las que se tiene acceso a través de la Universidad Politécnica de Valencia:

- SCOPUS: las búsquedas fueron realizadas en “título del artículo, resumen y palabras clave” (“article title, abstract, keywords”).
- Web of Science (WOS): las búsquedas fueron realizadas en “tema” (“topic”).

El periodo de búsqueda escogido para la realización de la búsqueda es desde el año 1960 hasta el año actual. Para su elección se ha utilizado como criterio el año inicial más restrictivo, correspondiente a la base de datos SCOPUS que permite realizar búsquedas desde 1960 (WOS permite realizar búsquedas desde 1900).

Las estrategias de búsqueda utilizadas para la búsqueda bibliométrica son las siguientes:

- Estrategia de búsqueda nº 1: su finalidad es encontrar los artículos que presenten los factores que afectan a la durabilidad en relación a la fase de diseño y planificación de una edificación.
- Estrategia de búsqueda nº 2: pretende encontrar los artículos que muestren los factores que afectan a la durabilidad en relación a la fase de construcción y ejecución de una edificación.
- Estrategia de búsqueda nº 3: busca encontrar las referencias que presenten los factores que afectan a la durabilidad relacionados con la fase de explotación, mantenimiento y conservación de una edificación.
- Estrategia de búsqueda nº 4: su objetivo es analizar los factores que afectan a la durabilidad de los diversos elementos y componentes que forman parte de una edificación.
- Estrategia de búsqueda nº 5: muestra la relación que existe entre la durabilidad de las edificaciones y los aspectos medioambientales.
- Estrategia de búsqueda nº 6: presenta los factores que afectan a la totalidad de las fases del proceso diseño-construcción-explotación de una edificación, así como las generalidades sobre durabilidad y el análisis de los factores desde un punto de vista general. Se ha utilizado para completar y aumentar el contenido de las anteriores estrategias de búsqueda.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las palabras clave y estrategias de búsqueda utilizadas para la realización de la búsqueda bibliométrica, con el número de resultados encontrados (ver tabla 2.1). Las principales palabras clave utilizadas son: “building durability”, “service life of building”, “building vulnerability”, “lifetime”, “life cycle”, “longevity”, etc...

2. METODOLOGÍA

ESTRATEGIAS DE BÚSQUEDA Y PALABRAS CLAVE	SCOPUS (Title, Abstract, Keywords)	Web Of Science (Topic)	Total
ESTRATEGIA 1			
"building durability" AND ("design" OR "planning" OR "project")	56	8	64
"building vulnerability" AND ("design" OR "planning" OR "project")	67	26	93
"building service life" AND ("design" OR "planning" OR "project")	18	3	21
"service life of building" AND ("design" OR "planning" OR "project")	37	14	51
"building design" AND ("service life" OR "durability" OR "vulnerability" OR "lifetime" OR "life cycle")	137	39	176
"building project" AND ("service life" OR "durability" OR "vulnerability" OR "lifetime" OR "life cycle")	142	34	176
"building planning" AND ("service life" OR "durability" OR "vulnerability" OR "lifetime" OR "life cycle")	17	2	19
[("building durability" OR "building vulnerability" OR "building service life" OR "service life of building") AND ("design" OR "planning" OR "project")] AND [("building design" OR "building project" OR "building planning") AND ("service life" OR "durability" OR "vulnerability" OR "lifetime" OR "life cycle")]	474	126	600
ESTRATEGIA 2			
"building durability" AND ("execution" OR "management" OR "construction")	61	9	70
"building vulnerability" AND ("execution" OR "management" OR "construction")	76	21	97
"service life of building" AND ("execution" OR "management" OR "construction")	31	9	40
"building service life" AND ("execution" OR "management" OR "construction")	21	6	27
"building construction" AND ("durability" OR "vulnerability" OR "lifetime" OR "service life")	323	66	389
[("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("execution" OR "management" OR "construction")] AND ["building construction" AND ("durability" OR "vulnerability" OR "lifetime" OR "service life")]	512	111	623
ESTRATEGIA 3			
"building durability" AND ("maintenance" OR "use" OR "conservation" OR "utilization" OR "maintainability")	54	7	61
"building vulnerability" AND ("maintenance" OR "use" OR "conservation" OR "utilization" OR "maintainability")	32	12	44
"service life of building" AND ("maintenance" OR "use" OR "conservation" OR "utilization" OR "maintainability")	60	19	79
"building service life" AND ("maintenance" OR "use" OR "conservation" OR "utilization" OR "maintainability")	26	6	32
("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("maintenance" OR "use" OR "conservation" OR "utilization" OR "maintainability")	172	44	216
ESTRATEGIA 4			
"building durability" AND ("structure" OR "concrete structure" OR "concrete" OR "steel" OR "deck" OR "facade" OR "partitions" OR "installations" OR "wood" OR "wooden")	172	11	183
"building vulnerability" AND ("structure" OR "concrete structure" OR "concrete" OR "steel" OR "deck" OR "facade" OR "partitions" OR "installations" OR "wood" OR "wooden")	100	36	136
"service life of building" AND ("structure" OR "concrete structure" OR "concrete" OR "steel" OR "deck" OR "facade" OR "partitions" OR "installations" OR "wood" OR "wooden")	33	14	47
"building service life" AND ("structure" OR "concrete structure" OR "concrete" OR "steel" OR "deck" OR "facade" OR "partitions" OR "installations" OR "wood" OR "wooden")	12	0	12
("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("structure" OR "concrete structure" OR "concrete" OR "steel" OR "deck" OR "facade" OR "partitions" OR "installations" OR "wood" OR "wooden")	317	61	378
ESTRATEGIA 5			
"building durability" AND ("environment" OR "sustainable")	28	7	35
"building vulnerability" AND ("environment" OR "sustainable")	13	7	20
"service life of building" AND ("environment" OR "sustainable")	22	5	27
"building service life" AND ("environment" OR "sustainable")	6	1	7
("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("environment" OR "sustainable")	69	20	89
ESTRATEGIA 6			
"building durability" AND ("longevity" OR "service life" OR "lifetime" OR "life cycle" OR "performance" OR "vulnerability" OR "serviciability" OR "factors")	91	7	98
"building vulnerability" AND ("longevity" OR "service life" OR "lifetime" OR "life cycle" OR "durability" OR "performance" OR "serviciability" OR "factors")	16	10	26
"service life of building" AND ("longevity" OR "lifetime" OR "life cycle" OR "performance" OR "durability" OR "vulnerability" OR "serviciability" OR "factors")	47	23	70
"building performance" AND ("longevity" OR "service life" OR "lifetime" OR "life cycle" OR "durability" OR "vulnerability" OR "serviciability" OR "factors")	157	80	237
"building" AND "durability factors"	12	3	15
("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building performance") AND ("longevity" OR "service life" OR "lifetime" OR "life cycle" OR "performance" OR "durability" OR "vulnerability" OR "serviciability" OR "factors")	323	123	446
SUBTOTAL	1867	485	
TOTAL			2352

Tabla 2.1. Resultados de las referencias encontradas para cada estrategia de búsqueda y según base de datos.

Después de la búsqueda inicial, sin más restricciones que las establecidas inicialmente, se obtuvieron un total de 2.352 resultados.

Una vez realizada una primera búsqueda general de artículos, se realizó una primera depuración de los artículos encontrados teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Área de estudio: se tuvieron en cuenta aquellas áreas que estuviesen relacionadas con el sector de la construcción y de la edificación, y también aquellas áreas relacionadas con el estudio de los materiales, excluyendo el resto de áreas.
- Idioma: la búsqueda se limitó a los artículos en inglés, por ser el idioma en el que se encuentran la mayoría de los artículos científicos, y español.
- Tipo de documento: artículos y revisiones publicados en revistas científicas.

Tras aplicar los parámetros anteriores, esta primera depuración dio como resultado un total de 1.239 referencias, que se resumen en la siguiente tabla (ver tabla 2.2).

Los artículos obtenidos tras la realización de la primera depuración fueron exportados a la herramienta de gestión de referencias *refworks* para su organización y manipulación. Mediante esta herramienta informática se pudo realizar una segunda depuración, consistente en la eliminación de los artículos duplicados (tanto los duplicados exactos como los duplicados casi exactos). Tras la realización de esta segunda depuración quedaron como resultado un total de 538 referencias, que se presentan en la siguiente tabla (ver tabla 2.3).

2. METODOLOGÍA

ESTRATEGIAS DE BÚSQUEDA Y PALABRAS CLAVE	SCOPUS (Title, Abstract, Keywords)	Web Of Science (Topic)	Total
ESTRATEGIA 1			
"building durability" AND ("design" OR "planning" OR "project")	28	7	35
"building vulnerability" AND ("design" OR "planning" OR "project")	29	10	39
"building service life" AND ("design" OR "planning" OR "project")	15	3	18
"service life of building" AND ("design" OR "planning" OR "project")	15	13	28
"building design" AND ("service life" OR "durability" OR "vulnerability" OR "lifetime" OR "life cycle")	61	27	88
"building project" AND ("service life" OR "durability" OR "vulnerability" OR "lifetime" OR "life cycle")	45	29	74
"building planning" AND ("service life" OR "durability" OR "vulnerability" OR "lifetime" OR "life cycle")	5	2	7
[("building durability" OR "building vulnerability" OR "building service life" OR "service life of building") AND ("design" OR "planning" OR "project")] AND [("building design" OR "building project" OR "building planning") AND ("service life" OR "durability" OR "vulnerability" OR "lifetime" OR "life cycle")]	198	91	289
ESTRATEGIA 2			
"building durability" AND ("execution" OR "management" OR "construction")	31	9	40
"building vulnerability" AND ("execution" OR "management" OR "construction")	28	11	39
"service life of building" AND ("execution" OR "management" OR "construction")	14	7	21
"building service life" AND ("execution" OR "management" OR "construction")	13	6	19
"building construction" AND ("durability" OR "vulnerability" OR "lifetime" OR "service life")	133	41	174
[("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("execution" OR "management" OR "construction")] AND ["building construction" AND ("durability" OR "vulnerability" OR "lifetime" OR "service life")]	219	74	293
ESTRATEGIA 3			
"building durability" AND ("maintenance" OR "use" OR "conservation" OR "utilization" OR "maintainability")	47	7	54
"building vulnerability" AND ("maintenance" OR "use" OR "conservation" OR "utilization" OR "maintainability")	10	3	13
"service life of building" AND ("maintenance" OR "use" OR "conservation" OR "utilization" OR "maintainability")	40	16	56
"building service life" AND ("maintenance" OR "use" OR "conservation" OR "utilization" OR "maintainability")	22	6	28
("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("maintenance" OR "use" OR "conservation" OR "utilization" OR "maintainability")	119	32	151
ESTRATEGIA 4			
"building durability" AND ("structure" OR "concrete structure" OR "concrete" OR "steel" OR "deck" OR "facade" OR "partitions" OR "installations" OR "wood" OR "wooden")	76	8	84
"building vulnerability" AND ("structure" OR "concrete structure" OR "concrete" OR "steel" OR "deck" OR "facade" OR "partitions" OR "installations" OR "wood" OR "wooden")	41	23	64
"service life of building" AND ("structure" OR "concrete structure" OR "concrete" OR "steel" OR "deck" OR "facade" OR "partitions" OR "installations" OR "wood" OR "wooden")	17	12	29
"building service life" AND ("structure" OR "concrete structure" OR "concrete" OR "steel" OR "deck" OR "facade" OR "partitions" OR "installations" OR "wood" OR "wooden")	8	0	8
("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("structure" OR "concrete structure" OR "concrete" OR "steel" OR "deck" OR "facade" OR "partitions" OR "installations" OR "wood" OR "wooden")	142	43	185
ESTRATEGIA 5			
"building durability" AND ("environment" OR "sustainable")	13	7	20
"building vulnerability" AND ("environment" OR "sustainable")	8	5	13
"service life of building" AND ("environment" OR "sustainable")	11	4	15
"building service life" AND ("environment" OR "sustainable")	6	1	7
("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("environment" OR "sustainable")	38	17	55
ESTRATEGIA 6			
"building durability" AND ("longevity" OR "service life" OR "lifetime" OR "life cycle" OR "performance" OR "vulnerability" OR "serviciability" OR "factors")	40	6	46
"building vulnerability" AND ("longevity" OR "service life" OR "lifetime" OR "life cycle" OR "durability" OR "performance" OR "serviciability" OR "factors")	12	7	19
"service life of building" AND ("longevity" OR "lifetime" OR "life cycle" OR "performance" OR "durability" OR "vulnerability" OR "serviciability" OR "factors")	27	20	47
"building performance" AND ("longevity" OR "service life" OR "lifetime" OR "life cycle" OR "durability" OR "vulnerability" OR "serviciability" OR "factors")	75	71	146
"building" AND "durability factors"	5	3	8
("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building performance") AND ("longevity" OR "service life" OR "lifetime" OR "life cycle" OR "performance" OR "durability" OR "vulnerability" OR "serviciability" OR "factors")	159	107	266
SUBTOTAL	875	364	
TOTAL			1239

Tabla 2.2. Primera depuración de las referencias encontradas.



ESTRATEGIAS DE BÚSQUEDA Y PALABRAS CLAVE	SUBTOTAL
ESTRATEGIA 1	
[("building durability" OR "building vulnerability" OR "building service life" OR "service life of building") AND ("design" OR "planning" OR "project")] AND [("building design" OR "building project" OR "building planning") AND ("service life" OR "durability" OR "vulnerability" OR "lifetime" OR "life cycle")]	105
ESTRATEGIA 2	
[("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("execution" OR "management" OR "construction")] AND ["building construction" AND ("durability" OR "vulnerability" OR "lifetime" OR "service life")]	38
ESTRATEGIA 3	
("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("maintenance" OR "use" OR "conservation" OR "utilization" OR "maintainability")	31
ESTRATEGIA 4	
("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("structure" OR "concrete structure" OR "concrete" OR "steel" OR "deck" OR "facade" OR "partitions" OR "installations" OR "wood" OR "wooden")	114
ESTRATEGIA 5	
("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("environment" OR "sustainable")	53
ESTRATEGIA 6	
("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building performance") AND ("longevity" OR "service life" OR "lifetime" OR "life cycle" OR "performance" OR "durability" OR "vulnerability" OR "serviciability" OR "factors")	197
TOTAL	538

Tabla 2.3. Segunda depuración de las referencias encontradas. Eliminación de los duplicados utilizando la herramienta reworks.

2.3. FASE 3. CLASIFICACIÓN DE LAS REFERENCIAS ENCONTRADAS.

A continuación, se procedió a la lectura de los resúmenes, conclusiones, y se hizo una revisión general de las referencias resultantes tras la realización de las depuraciones, con el objetivo de identificarlas y clasificarlas según su nivel de proximidad con el tema de la investigación. Se clasificaron en 3 niveles de adecuación con el tema, desde el nivel A, con una alta adecuación; el nivel B, medianamente relacionado; y el nivel C, con escasa o nula adecuación con el tema. Se descartaron aquellos documentos del nivel C, cuyo nivel de proximidad con el tema era muy bajo o nulo y no ofrecían un aporte significativo al estudio, y se realizó una lectura del resto de los documentos.

Tras realizar esta tercera depuración, eliminando los artículos correspondientes al nivel C, el número de referencias o artículos a analizar queda reducido a 215 (ver tabla 2.4). Con estos 215 artículos se realizó un análisis cuantitativo, cuyos resultados se presentan en la siguiente fase.

CLASIFICACIÓN DE ARTÍCULOS SEGÚN EL NIVEL DE PROXIMIDAD CON EL TEMA		
NIVEL	DESCRIPCIÓN	
A	Muy relacionado	73
B	Medianamente relacionado	142
C	Poco o nada relacionado	323
TOTAL		538
Total referencias tras la eliminación del Nivel C		215

Tabla 2.4. Clasificación de artículos según el nivel de proximidad con el tema. Tercera depuración de las referencias encontradas. Eliminación de la referencias del nivel C.

Una vez realizada una primera clasificación según el grado de aproximación con el tema, se realizó una segunda clasificación según el nivel de contribución e importancia del aporte del artículo en relación al tema de la investigación. Se clasificaron en tres niveles de importancia, desde el nivel 1, con una alta importancia del aporte sobre el tema, hasta el nivel 3, con una baja o nula importancia del aporte sobre el tema (ver tabla 2.5).

CLASIFICACIÓN DE ARTÍCULOS SEGÚN EL NIVEL DE CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO		
NIVEL	DESCRIPCIÓN	
1	Alta contribución	51
2	Mediana contribución	98
3	Baja contribución	66
TOTAL		215

Tabla 2.5. Clasificación de artículos según el nivel de contribución al estudio.

La siguiente figura muestra la distribución de los artículos según su contribución por porcentajes:

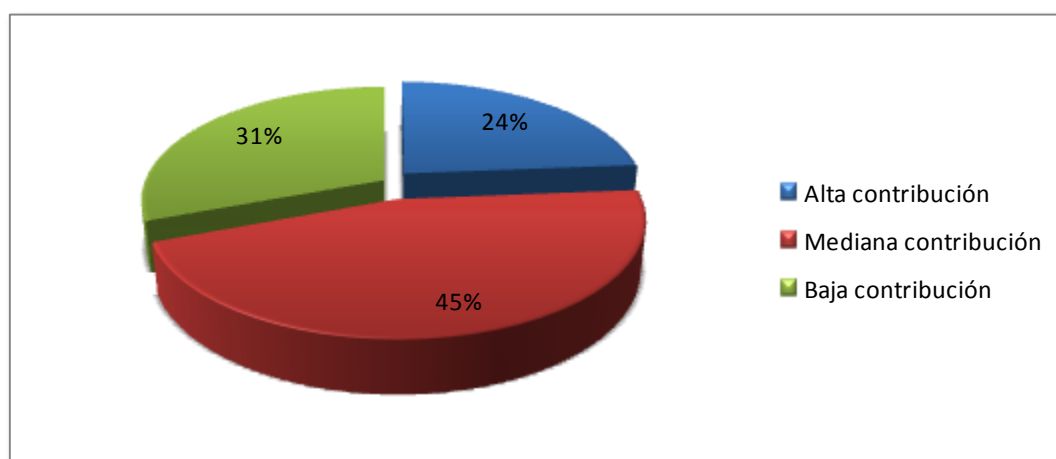


Figura 2.1. Distribución de los artículos según su contribución.

Esta segunda clasificación sirvió para identificar aquellos artículos más relevantes y que merecían una mayor profundización en su lectura. A partir de la lectura profunda de los artículos más relevantes y de la revisión del resto de artículos seleccionados tras realizar la depuración, se procedió a analizar los resultados, que se muestran en la siguiente fase.

Por último, la tabla 2.6 muestra un resumen general de la búsqueda y la depuración de los artículos.

BÚSQUEDA Y DEPURACIÓN DE ARTÍCULOS	
Búsqueda bibliométrica inicial	2352
Depuración 1 (Tipo de documento, área relacionada e idioma)	1239
Depuración 2 (Eliminación de referencias duplicadas)	538
Depuración 3 (Eliminación de referencias correspondientes al nivel C según proximidad con el tema)	215

Tabla 2.6. Resumen de la búsqueda y depuración de artículos.

2.4. FASE 4. ANÁLISIS Y EXPLOTACIÓN DE LOS RESULTADOS.

En esta fase se realiza un análisis cuantitativo de los artículos seleccionados para la realización del estudio. Después de haber realizado la búsqueda y la depuración de artículos desarrollados en las fases anteriores, los 215 artículos resultantes fueron utilizados para la realización de dicho análisis.

El análisis cuantitativo incluye aspectos como el número de artículos encontrados según la base de datos utilizada y según la estrategia de búsqueda empleada, el número de artículos por cada autor, revistas científicas con mayor número de publicaciones, años de publicación, etc...

2.4.1. Referencias encontradas según base de datos.

En este apartado se muestra el número de artículos encontrados en cada base de datos y para cada estrategia de búsqueda utilizada. Para poder analizar estos datos es necesario utilizar los resultados obtenidos antes de eliminar los artículos duplicados (antes de realizar la segunda depuración). De lo contrario, estaríamos eliminando artículos de una de las bases de datos, por lo que el resultado del análisis no se correspondería con la realidad.

Como muestra la tabla 2.7, Scopus fue la base de datos en la que se encontró un mayor número de resultados, aportando el 71% de los artículos sobre el total.

BASE DE DATOS	ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA	NÚMERO DE ARTÍCULOS	SUBTOTAL	% PARCIAL SOBRE EL TOTAL DE ARTÍCULOS	% SOBRE EL TOTAL DE ARTÍCULOS
Web Of Science (WOS)	WOS 1	91	364	7%	29%
	WOS 2	74		6%	
	WOS 3	32		3%	
	WOS 4	43		3%	
	WOS 5	17		1%	
	WOS 6	107		9%	
SCOPUS	SCO 1	198	875	16%	71%
	SCO 2	219		18%	
	SCO 3	119		10%	
	SCO 4	142		11%	
	SCO 5	38		3%	
	SCO 6	159		13%	
TOTAL		1239	1239	100%	100%

Tabla 2.7. Número de referencias encontradas en cada base de datos y para cada estrategia de búsqueda.

Las figuras 2.2 y 2.3 representan la distribución de las referencias según las referencias totales para cada base de datos, y según las referencias de forma individualizada para cada estrategia y para cada base de datos.

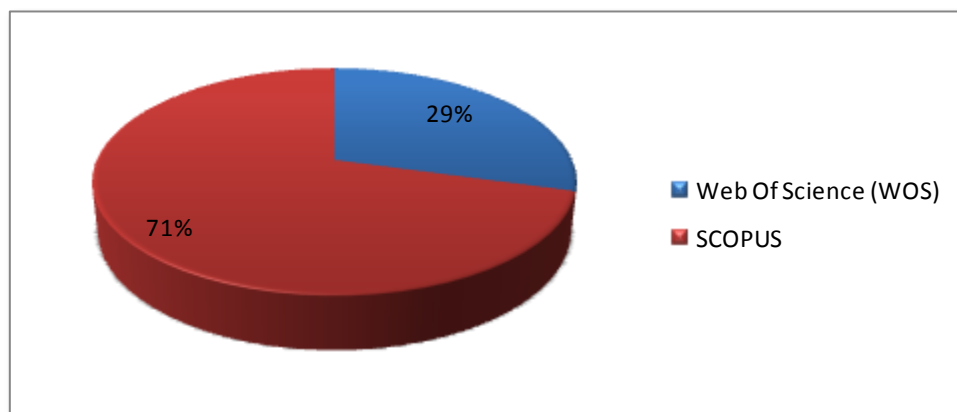


Figura 2.2. Distribución de las referencias según base de datos.

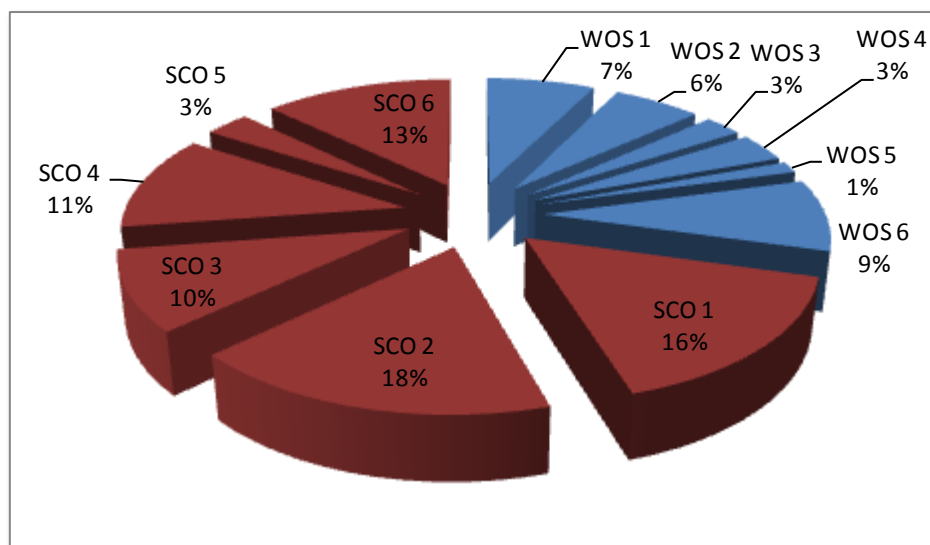


Figura 2.3. Distribución de las referencias para cada base de datos y para cada estrategia de búsqueda.

La estrategia de búsqueda con la que se obtuvo un mayor número de resultados fue la estrategia número 2 (correspondiente al 24% de los artículos). Dicha estrategia relaciona los factores que afectan a la durabilidad con la fase de construcción y ejecución de una edificación.

A esta estrategia le siguen muy de cerca la estrategia de búsqueda número 1 (con el 23%), que relaciona los factores que afectan a la durabilidad con el proceso de diseño y planificación de una edificación, y la estrategia número 6 (con el 21%), que muestra las generalidades sobre durabilidad.

Por otro lado, las estrategias menos efectivas en cuanto a número de resultados fueron la estrategia 4 (con el 15%), que relaciona los factores de durabilidad con los elementos y componentes de una edificación, la estrategia 3 (con el 12%), que relaciona los factores de durabilidad con el proceso de explotación y mantenimiento de una edificación, y por último la estrategia 5 (con el 4%), que relaciona los factores de durabilidad con su implicación en el medioambiente.

El análisis de las estrategias de búsqueda queda resumido en la siguiente tabla (tabla 2.8) y en la figura 2.4.

ESTRATEGIA	PALABRAS CLAVE DE LA BÚSQUEDA	NÚMERO DE ARTÍCULOS	% SOBRE EL TOTAL DE ARTÍCULOS
Estrategia 1	[("building durability" OR "building vulnerability" OR "building service life" OR "service life of building") AND ("design" OR "planning" OR "project")] AND [("builging design" OR " building project" OR "building planning") AND ("service life" OR "durability" OR "vulnerability" OR "lifetime" OR "life cycle")]	289	23%
Estrategia 2	[("building durability" OR ""building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("execution" OR "management" OR "construction")] AND ["building construction" AND ("durability" OR "vulnerability" OR "lifetime" OR "service life")]	293	24%
Estrategia 3	("building durability" OR ""building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("maintenance" OR "use" OR "conservation" OR "utilization" OR "maintainability")	151	12%
Estrategia 4	("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("structure" OR "concrete structure" OR "concrete" OR "steel" OR "deck" OR "facade" OR "partitions" OR "installations" or "wood" or "wooden")	185	15%
Estrategia 5	("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("environment" OR "sustainable")	55	4%
Estrategia 6	("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building performance") AND ("longevity" OR "service life" OR "lifetime" OR " life cycle" OR "performance" OR "durability" OR vulnerability" OR "serviciability" OR "factors")	266	21%
TOTAL		1239	100%

Tabla 2.8. Resumen de las referencias encontradas para cada estrategia de búsqueda.

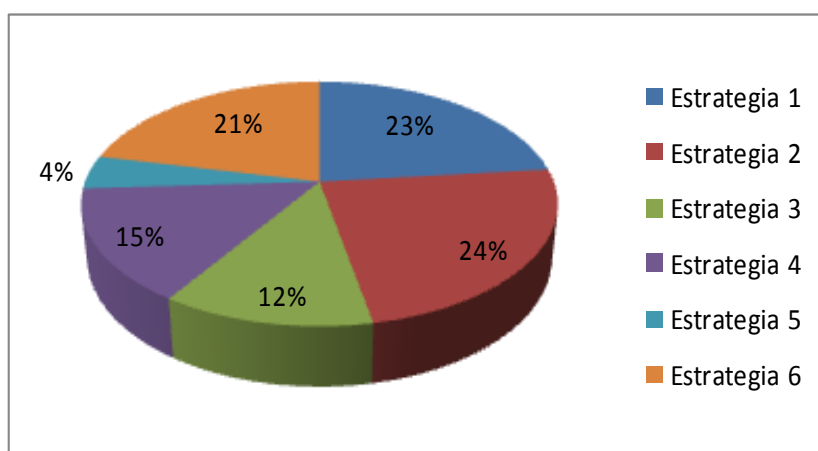


Figura 2.4. Distribución de las referencias según las estrategias de búsqueda.

2. METODOLOGÍA

También se han analizado los resultados obtenidos una vez realizada la eliminación de los artículos duplicados, así como la eliminación de los artículos correspondientes al nivel C según la clasificación por nivel de proximidad con el tema de estudio (tras la segunda y tercera depuración). Dichos resultados han sido analizados según la estrategia de búsqueda a la que corresponden y según la clasificación por el nivel de contribución al estudio.

La siguiente tabla 2.9 y figura 2.5 muestran el resumen de este análisis. Como se puede observar, de los 215 artículos finalmente seleccionados, la estrategia de búsqueda número 4 (elementos y componentes), con un 35%, es la que mayor cantidad de artículos aporta al estudio, seguida por la estrategia 6 (generalidades), con un 30%. Tanto la estrategia número 1 (diseño) como la estrategia número 3 (explotación y mantenimiento) aportaron el 11% de artículos cada una de ellas. Por otra parte, las estrategias de búsqueda que finalmente aportan menos artículos a la investigación fueron la estrategia 5 (medioambiente), con el 7%, y la estrategia 2 (ejecución), con el 5%.

ESTRATEGIA	PALABRAS CLAVE DE LA BÚSQUEDA	NÚMERO DE ARTÍCULOS	% SOBRE EL TOTAL DE ARTÍCULOS
Estrategia 1	[("building durability" OR "building vulnerability" OR "building service life" OR "service life of building") AND ("design" OR "planning" OR "project")] AND [("building design" OR "building project" OR "building planning") AND ("service life" OR "durability" OR "vulnerability" OR "lifetime" OR "life cycle")]	24	11%
Estrategia 2	[("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("execution" OR "management" OR "construction")] AND ["building construction" AND ("durability" OR "vulnerability" OR "lifetime" OR "service life")]	11	5%
Estrategia 3	("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("maintenance" OR "use" OR "conservation" OR "utilization" OR "maintainability")	23	11%
Estrategia 4	("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("structure" OR "concrete structure" OR "concrete" OR "steel" OR "deck" OR "facade" OR "partitions" OR "installations" OR "wood" OR "wooden")	76	35%
Estrategia 5	("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("environment" OR "sustainable")	16	7%
Estrategia 6	("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building performance") AND ("longevity" OR "service life" OR "lifetime" OR "life cycle" OR "performance" OR "durability" OR "vulnerability" OR "serviciability" OR "factors")	65	30%
TOTAL		215	100%

Tabla 2.9. Resumen de las referencias encontradas para cada estrategia de búsqueda tras realizar la tercera depuración.

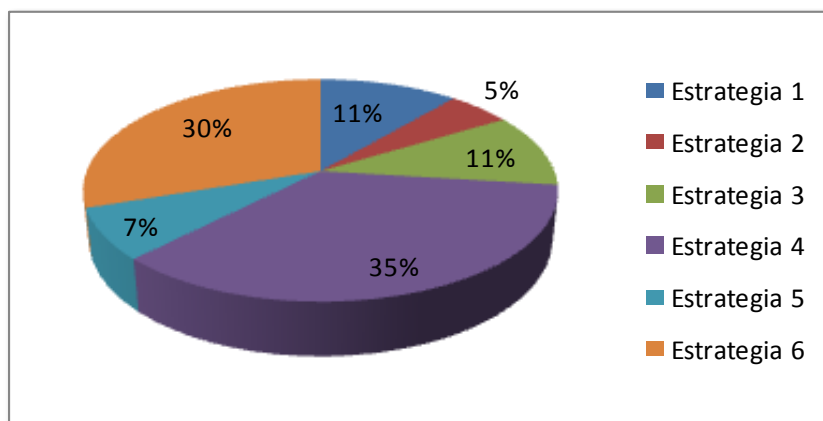


Figura 2.5. Distribución de las referencias según las estrategias de búsqueda tras realizar la tercera depuración.

Por último, la tabla 2.10 y la figura 2.6 muestran los resultados y el análisis según la clasificación por el nivel de proximidad al estudio y para cada estrategia de búsqueda.

ESTRATEGIA	PALABRAS CLAVE DE LA BÚSQUDA	ALTA CONTRIBUCIÓN	MEDIA CONTRIBUCIÓN	BAJA CONTRIBUCIÓN
Estrategia 1	[("building durability" OR "building vulnerability" OR "building service life" OR "service life of building") AND ("design" OR "planning" OR "project")] AND [("building design" OR "building project" OR "building planning") AND ("service life" OR "durability" OR "vulnerability" OR "lifetime" OR "life cycle")]	6	11	7
Estrategia 2	[("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("execution" OR "management" OR "construction")] AND ["building construction" AND ("durability" OR "vulnerability" OR "lifetime" OR "service life")]	2	5	4
Estrategia 3	[("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("maintenance" OR "use" OR "conservation" OR "utilization" OR "maintainability")]	7	9	7
Estrategia 4	[("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("structure" OR "concrete structure" OR "concrete" OR "steel" OR "deck" OR "facade" OR "partitions" OR "installations" OR "wood" OR "wooden")]	15	34	27
Estrategia 5	[("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building service life") AND ("environment" OR "sustainable")]	4	9	3
Estrategia 6	[("building durability" OR "building vulnerability" OR "service life of building" OR "building performance") AND ("longevity" OR "service life" OR "lifetime" OR "life cycle" OR "performance" OR "durability" OR "vulnerability" OR "serviciability" OR "factors")]	17	30	18
SUBTOTAL		51	98	66
TOTAL		215		

Tabla 2.10. Número de artículos de acuerdo a su contribución para cada estrategia de búsqueda.

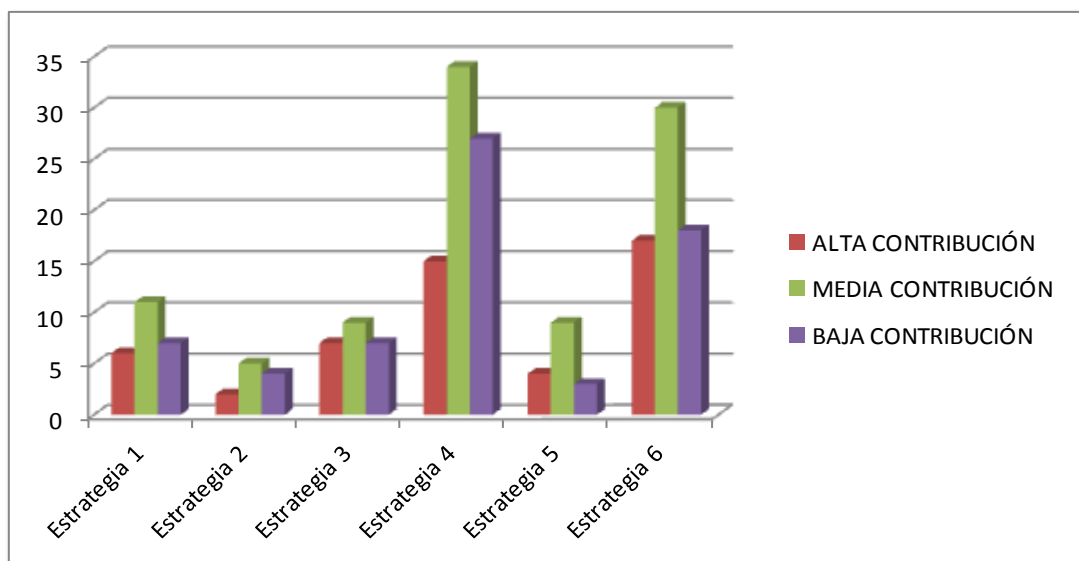


Figura 2.6. Distribución del número de artículos de acuerdo a su contribución para cada estrategia de búsqueda.

2.4.2. Autores con mayor número de publicaciones.

A partir de la búsqueda bibliométrica realizada se ha analizado cuáles son los autores con mayor número de publicaciones sobre el tema de estudio de esta investigación.

La tabla 2.11 muestra los autores que más artículos han publicado con respecto al total de las 215 referencias identificadas en la búsqueda bibliométrica, considerando solamente aquellos autores con dos o más artículos.

El autor con más publicaciones es Shohet, I. M., con 5 artículos, seguido por los autores Chew, M.Y.L., Kvande, T., Liso, K.R., y Soronis, G., con 4 artículos cada uno, y Thue, J.V. con 3 artículos. El resto de los autores únicamente tienen 1 o 2 artículos.



Autores	Nº de referencias	% Parcial sobre el total de referencias	Autores	Nº de referencias	% Parcial sobre el total de referencias
Shohet, I.M.	5	2,33%	Hempel, S.	2	0,93%
Chew, M.Y.L.	4	1,86%	Jernberg, P.	2	0,93%
Kvande, T.	4	1,86%	Kumar, S.	2	0,93%
Liso, K.R.	4	1,86%	Lacasse, M.A.	2	0,93%
Soronis, G.	4	1,86%	Lair, J.	2	0,93%
Thue, J.V.	3	1,40%	Li, Y.	2	0,93%
Arditi, D.	2	0,93%	Mailvaganam, N.P.	2	0,93%
Boissier, D.	2	0,93%	Mechtcherine, V.	2	0,93%
Brandt, E.	2	0,93%	Ojanen, T.	2	0,93%
Butler, M.	2	0,93%	Paciuk, M.	2	0,93%
Cole, I.	2	0,93%	Re Cecconi, F.	2	0,93%
Collins, P.G.	2	0,93%	Ries, R.	2	0,93%
De Brito, J.	2	0,93%	Rudbeck, C,	2	0,93%
Ellingwood, B.R.	2	0,93%	Sasic Kalagasidis, A.	2	0,93%
Flores-Colen, I.	2	0,93%	Tan, S.S.	2	0,93%
Granju, J.L.	2	0,93%			

Tabla 2.11. Autores con mayor número de publicaciones respecto a los 215 artículos encontrados.

2.4.3. Revistas científicas con mayor número de publicaciones.

Los 215 artículos identificados en la búsqueda bibliométrica fueron encontrados en una gran cantidad de revistas científicas.

La tabla 2.12 muestra las revistas en las cuales se ha publicado un mayor número de artículos con respecto al total de las 215 referencias identificadas en la búsqueda bibliométrica, considerando solamente aquellas revistas con más de dos publicaciones.

La revista científica con mayor número de publicaciones corresponde a "Building Research and Information", con un total de 17 artículos y representando el 7,91% del total, seguida por "Construction and Building Materials" y "Building and Environment" con 13 y 12 artículos respectivamente. El resto de las revistas científicas varían desde 1 hasta 5 publicaciones cada una.

Revistas	Nº de referencias	% Parcial sobre el total de referencias
Building Research and Information	17	7,91%
Construction and Building Materials	13	6,05%
Building and Environment	12	5,58%
Construction Management and Economics	5	2,33%
Materials and Structures/Materiaux et Constructions	5	2,33%
ASTM Special Technical Publication	4	1,86%
Journal of Structural Engineering	4	1,86%
Applied Mechanics and Materials	3	1,40%
Betonwerk Fertigteil Tech	3	1,40%
Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting	3	1,40%
Construction Specifier	3	1,40%
Engineering Structures	3	1,40%
Journal of ASTM International	3	1,40%
Journal of Construction Engineering and Management	3	1,40%
Journal of Infrastructure Systems	3	1,40%
Journal of Performance of Constructed Facilities	3	1,40%

Tabla 2.12. Revistas científicas con mayor número de publicaciones respecto a los 215 artículos encontrados.

2.4.4. Evolución de la investigación.

La tabla 2.13 y la figura 2.7 muestran la cantidad de artículos publicados año tras año desde 1980 hasta el año actual. Se puede observar como desde 1980 hasta el año 1995 se publicaron pocos artículos y de forma esporádica, constituyendo tan solo un 10,7% sobre el total de los artículos procesados (en este período de tiempo cabe destacar los años 1985 y 1990 por su producción científica). A partir del año 1995 se observa un crecimiento progresivo de la producción científica referida al tema del estudio hasta la actualidad. Es importante destacar la gran cantidad de artículos correspondientes a los últimos 10 años. Desde 2005 hasta la actualidad se han publicado más del 50% de los artículos procesados.



AÑO	NÚMERO DE ARTÍCULOS	NÚMERO ACUMULADO	%	% ACUMULADO	ARTÍCULOS POR DÉCADA	% ARTÍCULOS POR DÉCADA
1980	0	0	0,0%	0,0%	8	4%
1981	0	0	0,0%	0,0%		
1982	0	0	0,0%	0,0%		
1983	1	1	0,5%	0,5%		
1984	0	1	0,0%	0,5%		
1985	5	6	2,3%	2,8%		
1986	0	6	0,0%	2,8%		
1987	1	7	0,5%	3,3%		
1988	0	7	0,0%	3,3%		
1989	1	8	0,5%	3,7%		
1990	6	14	2,8%	6,5%	44	20%
1991	1	15	0,5%	7,0%		
1992	3	18	1,4%	8,4%		
1993	2	20	0,9%	9,3%		
1994	3	23	1,4%	10,7%		
1995	0	23	0,0%	10,7%		
1996	3	26	1,4%	12,1%		
1997	4	30	1,9%	14,0%		
1998	5	35	2,3%	16,3%		
1999	17	52	7,9%	24,2%		
2000	1	53	0,5%	24,7%	100	47%
2001	5	58	2,3%	27,0%		
2002	8	66	3,7%	30,7%		
2003	7	73	3,3%	34,0%		
2004	12	85	5,6%	39,5%		
2005	10	95	4,7%	44,2%		
2006	16	111	7,4%	51,6%		
2007	11	122	5,1%	56,7%		
2008	9	131	4,2%	60,9%		
2009	21	152	9,8%	70,7%		
2010	17	169	7,9%	78,6%	63	29%
2011	17	186	7,9%	86,5%		
2012	19	205	8,8%	95,3%		
2013	10	215	4,7%	100,0%		
TOTAL	215		100,0%		215	100%

Tabla 2.13. Evolución anual de la investigación.

2. METODOLOGÍA

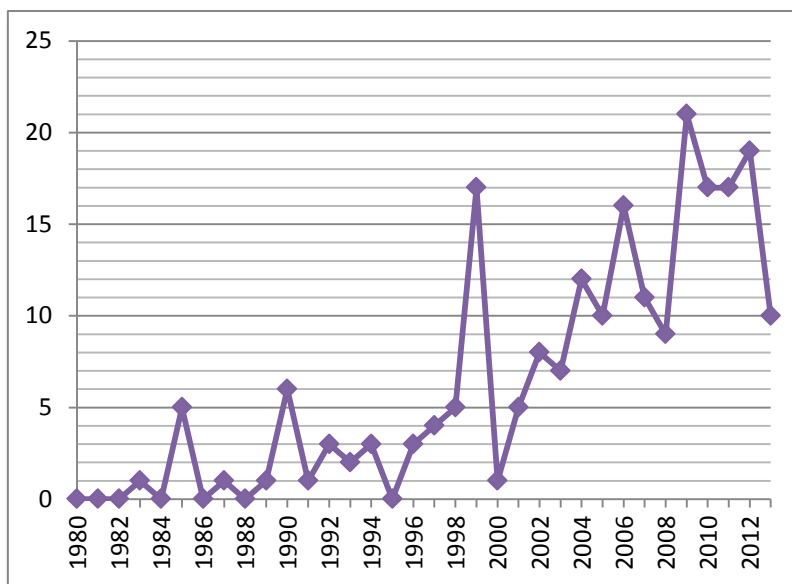


Figura 2.7. Evolución del número de artículos por cada año.

En la figura 2.8, en la que se expresa el porcentaje acumulado de artículos para cada año, se puede observar como el ritmo de publicaciones hasta el año 1995 se mantiene muy bajo, y a partir de este año aumenta de forma progresiva incrementándose año tras año.

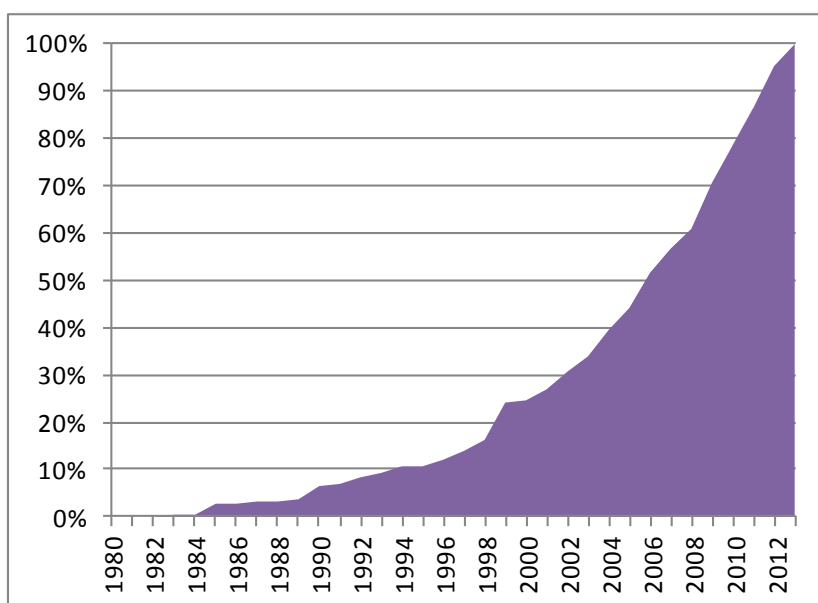


Figura 2.8. Porcentaje acumulado de artículos para cada año.

Al analizar la cantidad de artículos por década, se observa como en los años 80 la producción es mínima, y a partir de la década de los 90 aumenta la cantidad de artículos, siendo la década de 2000-2009 donde se encuentran más artículos. Sin embargo cabe destacar que en el período comprendido entre 2010 y la actualidad, en tan solo cuatro años, ya se ha superado más de la mitad de artículos que en la década anterior, por lo que la previsión indica que el ritmo de publicaciones sobre el tema sigue aumentando en la década actual y probablemente superará, en cuanto a cantidad se refiere, a las anteriores décadas (ver figura 2.9).

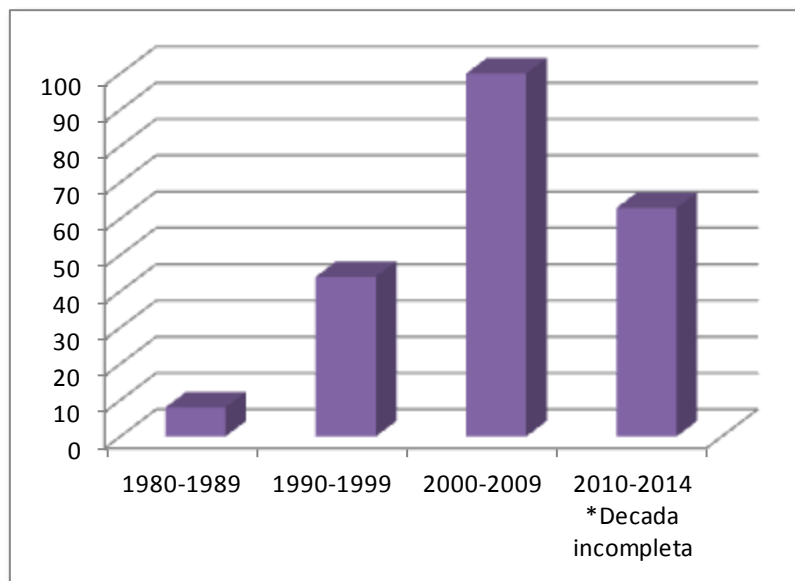


Figura 2.9. Número de artículos para cada década.

En la figura 2.10, en la que se muestran la cantidad acumulada de artículos por año clasificados según la estrategia a la que corresponden, se pueden observar los siguientes aspectos. Los artículos relacionados con la durabilidad en la fase de diseño, la durabilidad de los componentes y las generalidades (estrategias 1, 4 y 6, respectivamente) son los artículos que empiezan a aparecer en los primeros años. Más tarde empiezan a surgir los artículos relacionados con la durabilidad en la fase de ejecución y de explotación y mantenimiento (estrategias 2 y 3, respectivamente). Por último, los artículos sobre la durabilidad relacionada con el medio ambiente (estrategia 5) son los que más tarde aparecen, algo que muestra cómo los factores medioambientales no se han tenido demasiado en cuenta hasta los últimos años, en los que cobran una enorme importancia.

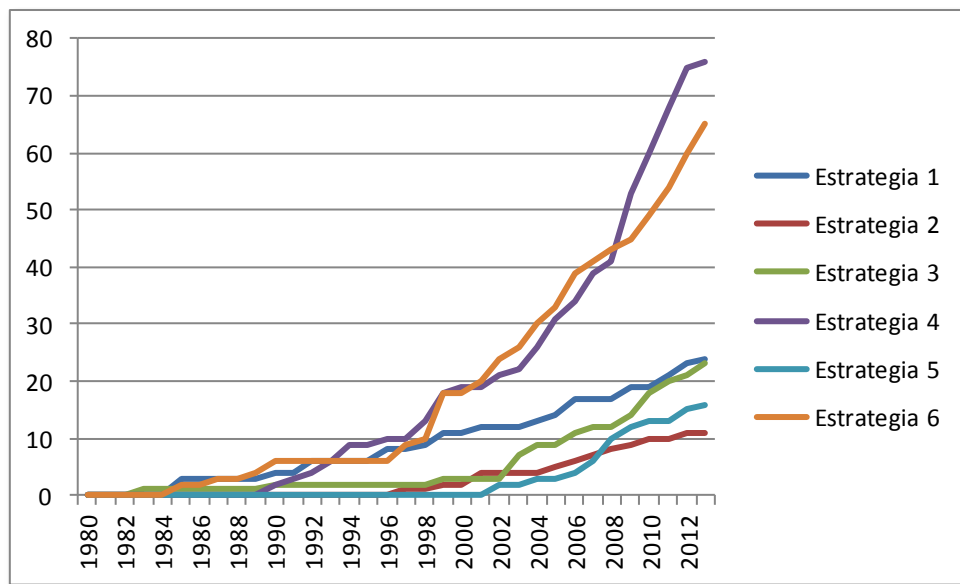


Figura 2.10. Número acumulado de artículos para cada año clasificados según la estrategia de búsqueda a la que pertenecen.

2.4.5. Países de donde proceden las investigaciones.

En esta sección se ha analizado cuál es el origen de los artículos, y la cantidad de artículos procedentes de cada uno de los países y continentes. Para realizar esta clasificación, el origen de los artículos se ha establecido en función de la institución a la que pertenecen los autores de dichos artículos.

Los resultados de este análisis se muestran en la siguiente tabla 2.14.



CONTIENENTE	PAÍS	NÚMERO DE ARTÍCULOS	% PAÍS	% CONTINENTE
EUROPA	REINO UNIDO	18	8,37%	46,05%
	ALEMANIA	11	5,12%	
	HOLANDA	10	4,65%	
	SUECIA	9	4,19%	
	FRANCIA	9	4,19%	
	NORUEGA	6	2,79%	
	ITALIA	6	2,79%	
	ESPAÑA	5	2,33%	
	FINLANDIA	5	2,33%	
	PORTUGAL	4	1,86%	
	REPÚBLICA CHECA	4	1,86%	
	SUIZA	2	0,93%	
	DINAMARCA	2	0,93%	
	TURQUÍA	2	0,93%	
	GRECIA	1	0,47%	
	BÉLGICA	1	0,47%	
	CROACIA	1	0,47%	
	ESLOVENIA	1	0,47%	
BULGARIA	1	0,47%		
ISLANDIA	1	0,47%		
AMÉRICA	EE.UU.	38	17,67%	27,91%
	CANADÁ	18	8,37%	
	MÉXICO	1	0,47%	
	CHILE	1	0,47%	
	ARGENTINA	1	0,47%	
	PUERTO RICO	1	0,47%	
ASIA	CHINA	16	7,44%	20,47%
	INDIA	6	2,79%	
	ISRAEL	6	2,79%	
	JAPON	5	2,33%	
	SINGAPUR	4	1,86%	
	IRÁN	2	0,93%	
	MALASIA	1	0,47%	
	ARABIA SAUDI	1	0,47%	
	EMIRATOS ÁRABES	1	0,47%	
	KUWAIT	1	0,47%	
	COREA DEL SUR	1	0,47%	
OCEANÍA	AUSTRALIA	7	3,26%	3,72%
	NUEVA ZELANDA	1	0,47%	
ÁFRICA	MARRUECOS	1	0,47%	0,93%
	GHANA	1	0,47%	
	NO ESPECIFICA	2	0,93%	0,93%
TOTAL		215	100%	100%

Tabla 2.14. Procedencia de los artículos.

2. METODOLOGÍA

En la figura 2.11 se puede observar que Europa es el continente del que proceden la mayoría de los artículos correspondientes al tema de este estudio, con un 46,05% sobre el total de los artículos procesados. A éste le siguen los continentes de América, con un 27,91%, y Asia, con un 20,47%. El resto de continentes (Oceanía y África) tienen una aportación muy baja, con un 3,72% y 0,93% respectivamente.

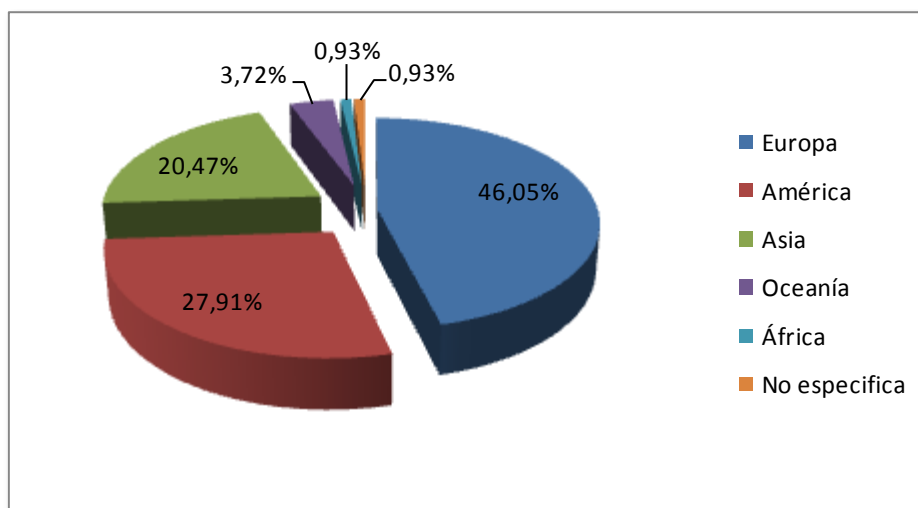


Figura 2.11. Distribución de los artículos por continentes.

En la figura 2.12 se muestran cuales son los países de cada continente de los que proceden mayor número de artículos. En el caso de Europa, cabe destacar Reino Unido, que aporta el 8,37% del total de los artículos, seguido de Alemania y Holanda (5,12% y 4,65% respectivamente). Para el caso de América, destaca principalmente Estados Unidos, 17,67% del total de artículos, seguido por Canadá con el 8,37%. En Asia podemos destacar a China, país del cual proceden el 7,44% de los artículos. Por último, en Oceanía solo podemos destacar a Australia con un 3,26%, mientras que en África la aportación es prácticamente irrelevante.

En general, los países con mayor producción científica son Estados Unidos (17,67%), seguido por Reino Unido y Canadá (ambos con un 8,37%), y China (7,44%).

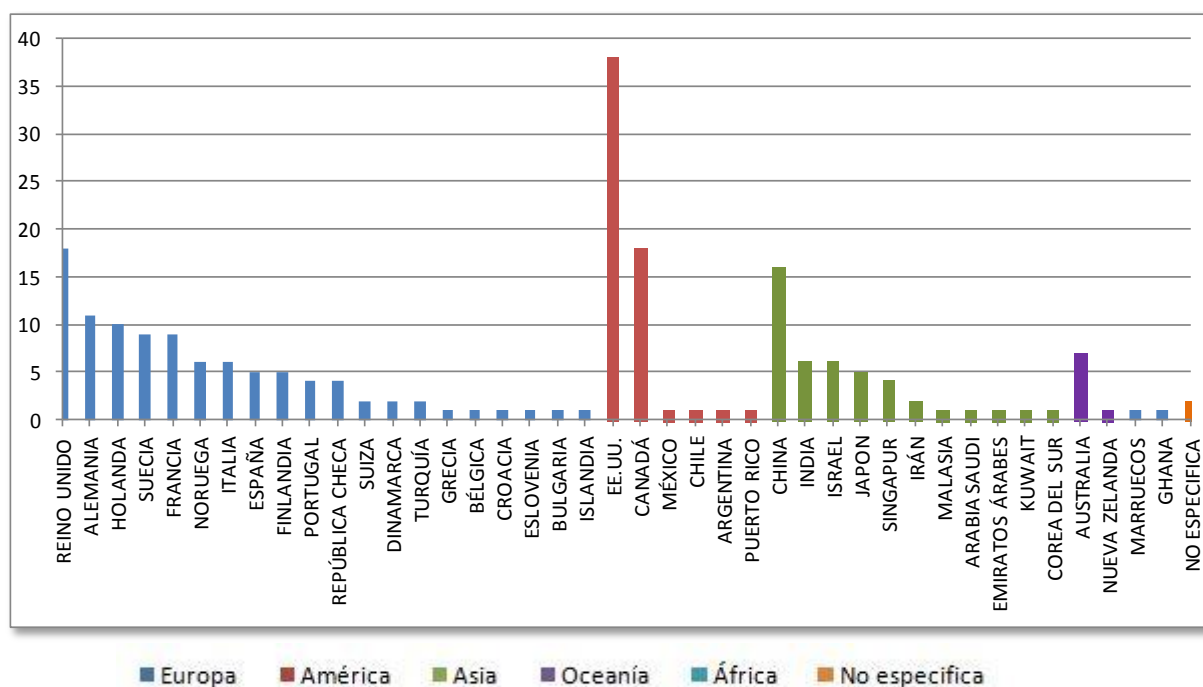


Figura 2.12. Número de artículos por países clasificados según su continente.

2.5. FASE 5. PROFUNDIZACIÓN DE LOS ARTÍCULOS MÁS RELEVANTES

En el siguiente capítulo se realiza una recapitulación de los aportes más importantes relacionados con los factores que afectan a la durabilidad de las edificaciones. Teniendo en cuenta la clasificación de los artículos por proximidad con el tema de estudio y por grado de importancia, y con base en la información obtenida en cada una de las fases de esta investigación, se presenta el estado del arte sobre el tema de objeto de la presente tesis de máster.

3. ESTADO DEL ARTE

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. INTRODUCCIÓN

Para la realización del estado del arte, o estado actual del conocimiento, se han analizado los artículos más relevantes y de mayor proximidad con el tema de la investigación, así como aquellos que aportan aspectos importantes a la investigación. De cada uno de estos artículos se obtuvieron sus ideas principales, conclusiones, y la metodología utilizada.

Una vez analizados dichos artículos, se ha clasificado la información obtenida en seis áreas temáticas, coincidiendo con las seis estrategias de búsqueda utilizadas en la búsqueda bibliométrica. Estas áreas han servido para dividir este capítulo en seis secciones:

1. Generalidades sobre durabilidad.

En esta primera sección se trata de una manera generalizada el término de durabilidad de las edificaciones, y se amplían conceptos que están relacionados con la durabilidad. También se desarrollan brevemente los métodos para la predicción de la vida de servicio de las edificaciones.

2. Consideraciones sobre durabilidad en la fase de diseño.

Esta sección incluye los factores que afectan a la durabilidad durante el proceso de diseño de una edificación. Se aborda la planificación y la utilización de la información de vida útil durante la fase de diseño, así como el diseño por ciclo de vida y el diseño basado en el rendimiento. También se desarrollan los procesos de reutilización adaptativa y reutilización de componentes, y se resumen las normas más importantes que tienen en cuenta la durabilidad en la fase de diseño.

3. Consideraciones sobre durabilidad en la fase de ejecución.

En esta sección se estudian los factores que afectan a la durabilidad durante el proceso de ejecución de una edificación, centrándose en las construcciones con estructura de hormigón armado y en las construcciones interiores de las edificaciones.

4. Consideraciones sobre durabilidad en la fase de mantenimiento.

En esta sección se incluyen los factores que afectan a la durabilidad durante la fase de mantenimiento de una edificación. Se exponen los diferentes tipos de mantenimiento, las implicaciones de mantenimiento en las diferentes etapas del proceso constructivo, y cuáles son las técnicas para seleccionar la mejor estrategia de mantenimiento. También se desarrolla el concepto de mantenibilidad y los diferentes modelos de degradación según el tipo de mantenimiento, así como el diagnóstico y la evaluación de la condición de los edificios.

5. Consideraciones sobre durabilidad de los elementos y componentes de una edificación.

Esta sección contiene los factores que afectan a la durabilidad de los distintos elementos y componentes que forman parte de una edificación. Además se estudian los principales sistemas constructivos en los que la durabilidad es especialmente importante. Dichos sistemas son la envolvente, incluyendo fachadas y cubiertas, las estructuras, incluyendo estructuras de hormigón armado, madera, acero y fábrica, y las zonas húmedas de interiores de edificaciones.

6. Relación entre la durabilidad y su impacto en el medioambiente.

En esta última sección se trata la relación existente entre la durabilidad de las edificaciones y su influencia en el medioambiente. También se expone la importancia del diseño en la construcción sostenible y la influencia de los materiales y componentes en la sostenibilidad de las edificaciones.

Por último, tras clasificar la información obtenida de los artículos en las diferentes áreas temáticas, los artículos también fueron ordenados según su año de publicación, lo que permite evaluar cada contribución teniendo en cuenta el año en la que fue realizada.

3.2. GENERALIDADES SOBRE DURABILIDAD

Para hablar de durabilidad es imprescindible conocer de antemano las definiciones de durabilidad y vida útil, así como la determinación del momento en el que se produce el final de la vida útil. Dichas definiciones se presentan en el apartado 1.6 del capítulo 1 (“Definiciones básicas”), en el que también se incluyen las definiciones de rendimiento, vulnerabilidad y mantenibilidad. Aunque en dicho apartado aparece la definición de rendimiento, el concepto de rendimiento se amplía en el siguiente apartado (3.2.1. “Concepto de rendimiento de una edificación”).

Por otra parte, según varias de las investigaciones consultadas, cuando nos referimos a la vida útil de una edificación es necesario separar los elementos permanentes (como por ejemplo la estructura) de los elementos que se pueden reemplazar (como por ejemplo sistemas eléctricos, mecánicos o de comunicación). Por tanto, como apunta el autor V. Straka (2006) es necesario considerar una edificación como una serie de sistemas en el que cada uno tiene una vida útil diferente.

Dicho autor recalca que los factores más importantes para prolongar la vida útil de un edificio son un buen diseño, flexibilidad, adaptabilidad y valor del edificio (Straka, 2006).

3.2.1. Concepto de rendimiento de una edificación.

La durabilidad es un factor importante que no puede ser ignorado cuando consideramos el rendimiento de las edificaciones (Nireki, 1996). En varias investigaciones, como la realizada por W. Trinius y C. Sjöström (2005), se demuestra que en los edificios modernos, el rendimiento normalmente disminuye a lo largo del tiempo. El ritmo de disminución del rendimiento depende de la combinación específica de un conjunto de influencias. En las normativas se ha desarrollado un método de los factores (ISO 15686-1) en el cual se identifican y cuantifican estas influencias. El método de los factores considera aspectos como son la calidad del diseño y la construcción, el nivel de mantenimiento, la exposición al uso, el desgaste del material o componente, y la influencia del medioambiente. Debido a estas influencias, la vida de servicio esperada de los materiales, componentes y edificios completos varía de un caso a otro (Trinius y Sjöström, 2005). Dicho método de los factores se define y desarrolla en el apartado 3.2.3.1. (*"Método de los factores"*).

En la figura 3.1, extraída del artículo de W. Trinius y C. Sjöström (2005), se muestra una superposición entre la disminución del rendimiento de un componente a lo largo del tiempo y su rendimiento requerido, donde se puede identificar la extensión resultante de la duración esperada de la vida de servicio de los componentes.

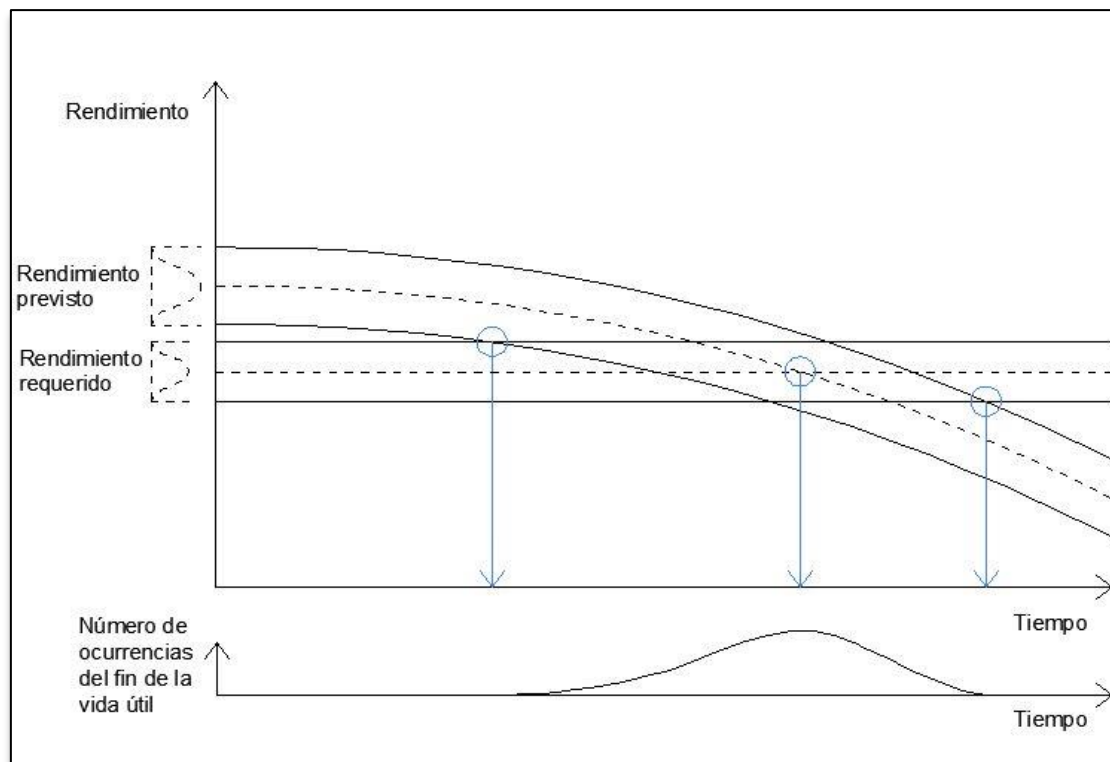


Figura 3.1. Rendimiento a lo largo del tiempo. Fuente: elaboración propia en base a Trinius et al., 2005.

El autor analiza en la figura 3.1. las siguientes variables (Trinius y Sjöström, 2005):

- Se asume que el nivel de rendimiento requerido es constante a lo largo del tiempo; en realidad la línea podría ser discontinua o incrementarse en el tiempo
- La disminución del rendimiento a lo largo del tiempo podría ser o no una curva continua.
- El rendimiento podría ser interrumpido de forma repentina, por ejemplo, debido a daños de acciones inesperadas.
- Los valores medidos del rendimiento aparecerán como una distribución.

La distribución del rendimiento y vida de servicio muestra más a menudo distribuciones asimétricas, pero para su simplificación, W. Trinius y C. Sjöström (2005) expresan que ocasionalmente puede ser aceptable asumir una distribución normal.

3.2.2. Concepto de obsolescencia de una edificación.

Aparte del deterioro, según los autores R. Mora et al. (2011) una de las principales causas que provoca el fin de la vida de servicio es la obsolescencia. Ésta puede ser:

- Obsolescencia técnica (por ejemplo, disponibilidad de tecnologías más eficientes)
- Obsolescencia económica (por ejemplo, no disponer de más presupuesto para operar)
- Obsolescencia funcional (por ejemplo, cambio en los requerimientos funcionales)
- Obsolescencia estética.

3.2.3. Métodos para la predicción de la vida de servicio de una edificación.

Existen numerosas investigaciones en las que se han desarrollado diferentes métodos para la determinación de la vida de servicio de una edificación. En la mayoría de ellos, el primer paso necesario es identificar y cuantificar los factores que afectan a la durabilidad de los elementos y componentes de una edificación, y es por eso que dichas investigaciones y dichos métodos son de utilidad para este estudio.

La predicción de la vida de servicio de un edificio y de sus componentes es una tarea muy compleja, ya que cada edificio es diferente en términos de utilización, tipo de construcción, calidad y ambiente. Los autores D. Kumar et al. (2010) exponen los tres tipos de métodos que han sido desarrollados para la predicción de la vida de servicio:

- Métodos probabilísticos: en estos métodos generalmente se considera la degradación como un proceso estocástico, por lo que se predice una distribución de probabilidad con un intervalo de confianza asociado. Estos métodos son bastante complejos y no son fáciles de utilizar.
- Métodos de ingeniería: es una combinación del método probabilístico y del método de los factores. Se logra utilizando factores con la función de densidad de probabilidad para cada uno de ellos. Las distribuciones de densidad ayudan a reducir los errores, pero añaden una complejidad similar a la de los métodos probabilísticos.
- Métodos deterministas: estos métodos son fáciles de utilizar, ya que únicamente necesitan conocer la influencia de diferentes factores sobre la vida de servicio. El método de los factores es un método determinista, el cual se desarrolla en el siguiente apartado (3.2.3.1). El principal problema para la utilización de este método es que no existen normas o estándares reconocibles para la obtención precisa o exacta de la vida de servicio de referencia de los componentes.

En cuanto a la vida de servicio de referencia, existen diferentes métodos para predecirla, tales métodos pueden ser pruebas a largo plazo, pruebas aceleradas o modelos analíticos. Los modelos y metodologías para la predicción de la vida de servicio de los componentes de una edificación pueden ser clasificados en tres categorías (Shohet y Paciuk, 2006):

- Modelos analíticos: identifican los mecanismos de desgaste, los modelizan, los simulan y determinan la vida de servicio utilizando criterios límite de rendimiento.
- Modelos estadísticos: utilizan métodos probabilísticos y estadísticos para la evaluación y predicción del rendimiento y de la probabilidad de fallos.
- Métodos empíricos: evalúa la vida de servicio con referencia a experiencias previas con construcciones iguales o similares, y con similar ocupación o exposición climática.

La exactitud de la predicción de la vida de servicio de los componentes afecta fuertemente a la efectividad y a la calidad de la estrategia de la planificación y ejecución del mantenimiento, algo que se verá en el apartado 3.5 de este capítulo (“Consideraciones sobre durabilidad en la fase de mantenimiento”).

3.2.3.1. Método de los factores.

El método de los factores es un método de predicción de la vida de servicio, establecido y regulado por la norma ISO 15686, el cual modifica la vida de servicio de referencia a través de unos factores que tienen en cuenta las condiciones específicas de utilización. El método de los factores no proporciona una certeza sobre la vida de

servicio, simplemente da una estimación empírica basada en la información disponible. Los factores utilizados en dicho método son los siguientes:

- a) Calidad de los componentes
- b) Nivel de diseño
- c) Nivel de ejecución del trabajo
- d) Ambiente interior
- e) Ambiente exterior
- f) Condiciones de utilización
- g) Nivel de mantenimiento

En la siguiente tabla 3.1, extraída de la norma ISO 15686-1, se resumen dichos factores, los agentes involucrados y algunos ejemplos para cada factor.

AGENTES	FACTORES	CONDICIÓN RELEVANTE (EJEMPLOS)
Agente relacionado con la característica de calidad intrínseca	A	Calidad de los componentes (fabricación, almacenamiento, transporte, materiales, capa protectora (aplicada en fábrica))
	B	Nivel de diseño (incorporación, protección por el resto de la estructura)
	C	Nivel de ejecución del trabajo (gestión del emplazamiento, nivel de mano de obra, condiciones climáticas durante la ejecución de los trabajos)
Medioambiente	D	Ambiente interior (ambiente agresivo, ventilación, condensación)
	E	Ambiente exterior (elevación del edificio, condiciones microambientales, factores climáticos, etc.)
Condiciones de operación	F	Condiciones de utilización (impacto mecánico, categoría de usuarios, desgaste)
	G	Nivel de mantenimiento (calidad y frecuencia del mantenimiento, accesibilidad para el mantenimiento)

Tabla 3.1. Factores en la norma ISO 15686-1. Fuente: ISO 15686-1, Anexo E (traducción propia).

El método de los factores ofrece la posibilidad de realizar correcciones a la vida de servicio de referencia, utilizando estos factores. Cada factor tiene un valor de defecto de 1.0; los valores mayores a éste extienden la vida útil mientras que los

valores inferiores reducen la vida útil. Al multiplicar todos los factores a la vida de servicio de referencia se obtiene como resultado la vida de servicio estimada:

$$ESL = RSL * a * b * c * d * e * f * g$$

donde:

ESL (Estimated Service Life): vida de servicio estimada.

RSL (Reference Service Life): vida de servicio de referencia.

La siguiente figura, extraída del artículo publicado por A. Straub (2011), muestra como puede ser deducida la vida de servicio estimada de un componente de edificación a partir de la vida de referencia (ver figura 3.2)

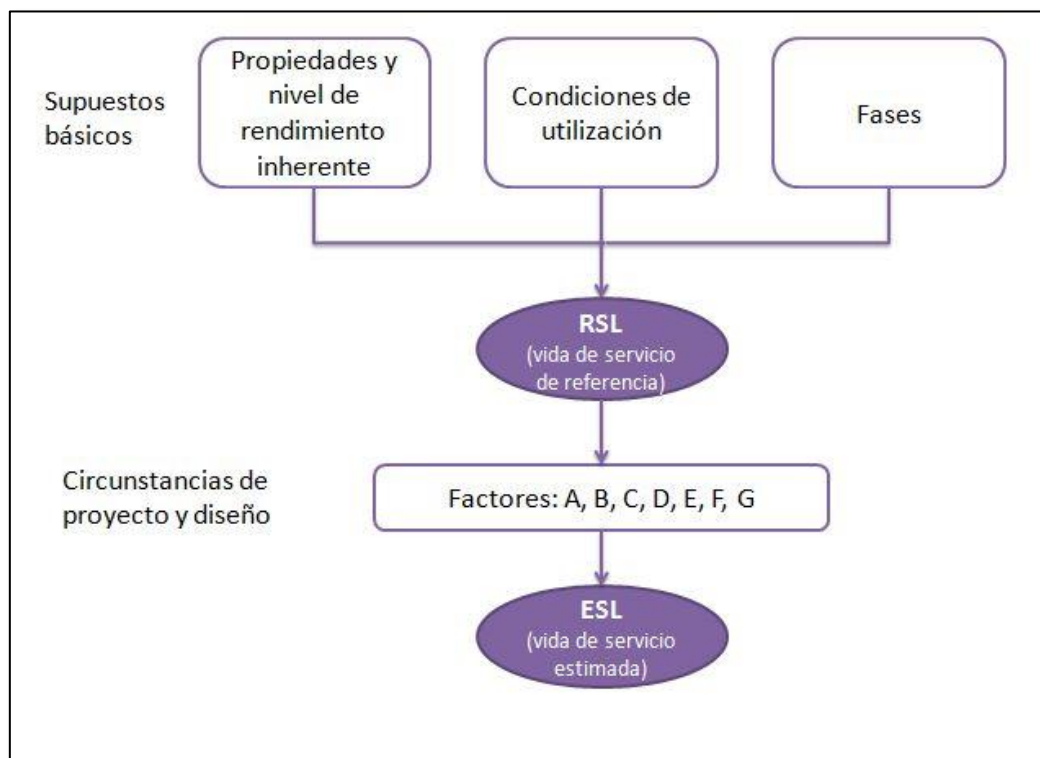


Figura 3.2. Proceso de estimación de la vida de servicio a partir de la vida de servicio de referencia.
Fuente: Elaboración propia en base a Straub, 2011.

En dicho artículo (Straub, 2011) se han analizado los factores y criterios que afectan a cada factor a la hora de estimar la vida de servicio de un componente o edificación. A continuación el autor resume los posibles criterios y especificaciones existentes para cada factor:

- Factor A, calidad de los componentes: en primer lugar, la vida de servicio de referencia de los productos de edificación está basada en las propiedades y

nivel de rendimiento inherente de dichos productos. Estas propiedades y nivel de rendimiento determinan si el rendimiento requerido o deseado puede ser logrado.

- Factor B, nivel de diseño: los productos de edificación son seleccionados durante la fase de diseño, durante la cual se determina como estarán expuestos durante su vida útil (ver tabla 3.2).

CRITERIOS	ESPECIFICACIONES
Posicionamiento	Exposición, protección frente a la intemperie, drenaje, orientación, altura
Detalles	Conexiones
Previsión para el mantenimiento	Accesibilidad, espacio para trabajar
Compatibilidad de materiales	Idoneidad de la combinación de materiales
Dimensionamiento	Construcción, subdivisión, excesos

Tabla 3.2. Factores y criterios de diseño. Fuente: Straub, 2011 (traducción propia).

- Factor C, nivel de ejecución del trabajo: la construcción y ejecución de la edificación puede afectar a la vida de servicio de los productos de edificación. (ver tabla 3.3). La referencia habitual es la producción “in situ”, pero métodos como la prefabricación, en la que la producción se realiza bajo condiciones controladas, pueden incrementar la vida de servicio. La ejecución se lleva a cabo de acuerdo a unas reglas (procesos, procedimientos e instrumentos) que aseguran la calidad.

CRITERIOS	ESPECIFICACIONES
Producción	Prefabricación, “in situ”, condiciones de trabajo, método de ejecución y exposición durante la ejecución
Disciplina en cuanto a reglas de construcción y experiencia	Sistemas de calidad, supervisión, competencias, personal experto y con experiencia
Seguimiento de los cambios	Registro (para el mantenimiento)
Transporte y almacenamiento	-

Tabla 3.3. Factores y criterios de ejecución. Fuente: Straub, 2011 (traducción propia).

3. ESTADO DEL ARTE

- Factor D, ambiente interior: la vida de servicio de los productos de edificación utilizados en interiores está sujeta a las condiciones del clima interior (ver tabla 3.4).

CRITERIOS	ESPECIFICACIONES
Humedad	Extensión, variaciones, condensación, puentes térmicos
Temperatura	Temperatura del aire, variaciones
Sustancias químicas	Por ejemplo: CO ₂ , carbonos, cloruros
Flujos de aire	En relación a la contaminación
Agentes biológicos	Presencia y prevención de agentes
Luz	En relación a la decoloración y envejecimiento

Tabla 3.4. Factores y criterios del ambiente interior. Fuente: Straub, 2011 (traducción propia).

- Factor E, ambiente exterior: la vida de servicio de los productos de edificación utilizados en exteriores está sujeta a las condiciones del clima exterior (ver tabla 3.5).

CRITERIOS	ESPECIFICACIONES
Humedad	Duración, variaciones, asociado con la orientación del edificio
Temperatura	Temperatura del aire, variaciones, protección
Sustancias químicas	Por ejemplo: CO ₂ , hollín
Agentes biológicos	Presencia y prevención de agentes
Suelo	Variaciones
Cargas externas	Vibraciones de carreteras o ferrocarriles cercanos, fábricas, etc.
Luz	En relación a la decoloración y envejecimiento

Tabla 3.5. Factores y criterios del ambiente exterior. Fuente: Straub, 2011 (traducción propia).

- Factor F, condiciones de utilización: la función y utilización del edificio puede acortar o extender la vida de servicio de los productos de edificación (ver tabla 3.6).

CRITERIOS	ESPECIFICACIONES
Intensidad	Función del edificio, público/privado, comercial/residencial
Cargas	Variaciones, sobrecargas
Tipo de uso	Uso incorrecto, vandalismo

Tabla 3.6. Factores y criterios de la función y utilización. Fuente: Straub, 2011 (traducción propia).

- Factor G, Nivel de mantenimiento: el mantenimiento, tanto predictivo como correctivo, puede ser de una gran influencia para prolongar la vida de servicio (ver tabla 3.7).

CRITERIOS	ESPECIFICACIONES
Planificación del mantenimiento	Implementación del mantenimiento preventivo en la programación
Disciplina en cuanto a reglas de mantenimiento y experiencia	Calidad del sistema de mantenimiento, supervisión, calidad de materiales, competencias, personal de mantenimiento experto y con experiencia
Seguimiento de los cambios	Registro para el mantenimiento
Disponibilidad de piezas de repuesto	-

Tabla 3.7. Factores y criterios de mantenimiento. Fuente: Straub, 2011 (traducción propia).

3.3. CONSIDERACIONES SOBRE DURABILIDAD EN LA FASE DE DISEÑO

La fase de planificación y diseño es la fase inicial de todo proyecto constructivo, y por tanto las consideraciones de durabilidad se deben de tener en cuenta y planificar desde esta fase inicial.

El autor V. Straka destaca el diseño como el factor más importante para prolongar la vida útil de una edificación (Straka, 2006). Para dicho autor, algunas de las consideraciones de diseño más importantes son: el diseño arquitectónico de la

forma del edificio y de la superficie expuesta al ambiente exterior, ya que dicho diseño influye en el rendimiento de los componentes de la envolvente, y el diseño para permitir un fácil reemplazamiento de los componentes.

El autor T. Nireki (1996) destaca que la vida de servicio de las edificaciones está influenciada por la consideración de la durabilidad y de la vida útil a través de todas las fases, desde la planificación, diseño, construcción, explotación, mantenimiento y hasta la demolición. Por tanto, dicho autor concluye que el diseño para la durabilidad o el diseño para la vida de servicio no puede asegurarse si no se tienen en cuenta todas las consideraciones a través del ciclo de vida completo de una edificación (Nireki, 1996).

3.3.1. Información de la vida útil en las fase de planificación y diseño.

El autor S. Hernández (2011) presenta en su artículo la importancia de la aplicación y uso de la información de la vida útil, del rendimiento y de la durabilidad de los componentes constructivos en la planificación y diseño de proyectos de edificación. Concluye que dicha información es de gran utilidad en las fases de pre-diseño y diseño de una edificación, principalmente porque a través de su estudio y de su utilización adecuada se pueden lograr edificios más eficientes en aspectos de durabilidad, mantenimiento, confort, impacto ambiental y rendimiento funcional en todos sus sistemas a través de todo su ciclo de vida.

Hernández (2011) determina que la información de la vida útil, del rendimiento y de la durabilidad de los componentes constructivos se utiliza en la etapa de pre-diseño, en la cual se establecen las primeras referencias de vida de servicio de forma general, y en la etapa de diseño, en la cual se estiman valores de vida útil calculados por distintos métodos de predicción. Estos valores son más aproximados a la realidad y generan especificaciones y detalles de diseño y construcción para el ciclo de vida del edificio. Algunos de los métodos que se pueden utilizar para la estimación de dichos valores son:

- Método de los factores
- Información de materiales especificada en normas técnicas o por los fabricantes de los materiales
- Información sobre pruebas físicas de degradación en laboratorio sobre materiales y pruebas de simulación de la degradación de los materiales.

Según S. Hernández (2011), la vida útil y durabilidad de los materiales y componentes de construcción deben ser evaluadas y estimadas una vez están instalados, construidos y perteneciendo a un sistema constructivo (estando el material ya aplicado o utilizado en el sistema completo edificado), y no de forma aislada, individual o por separado.

Por último, Hernández (2011) establece que para poder planificar y diseñar un edificio es esencial conocer cuáles son las necesidades del cliente, y así posteriormente poder determinar y detallar las especificaciones correspondientes al rendimiento del sistema completo (edificio) y las especificaciones de diseño de los componentes y materiales constructivos.

Para la toma de decisiones en materia de diseño, se debe de tener en cuenta los siguientes aspectos (Hernández, 2011):

- El tiempo de vida de diseño
- El tiempo de vida útil
- El rendimiento de vida de diseño de los sistemas y subsistemas del edificio
- La durabilidad
- Tipo de mantenimiento conveniente
- Costes por ciclo de vida del edificio
- Impactos ambientales que causará el inmueble en su vida de servicio

3.3.2. Planificación de la vida de servicio (Service Life Planning).

En cuanto a la planificación, los autores W. Trinius y C. Sjöström (2005) abordan el concepto de planificación de la vida de servicio, el cual tiene como objetivo permitir a los planificadores diseñar edificios que cumplan o excedan los objetivos identificados en el proyecto y los requisitos de rendimiento. Dichos autores establecen que los planificadores deben considerar y reunir los requisitos de rendimiento y las propiedades de rendimiento en diferentes niveles (nivel superior y niveles inferiores). El objeto de un sistema de nivel superior (como por ejemplo un edificio) abarca a los objetos de sistemas de niveles inferiores (como por ejemplo componentes y materiales), pero la aplicación de requisitos en el nivel superior decide sus funcionalidades definitivas. Los requisitos se originan desde el sistema de nivel superior. Los autores concluyen que el rendimiento y la funcionalidad del sistema de nivel superior es sustancialmente diferente a la suma de las funcionalidades de los sistemas de niveles inferiores (Trinius y Sjöström, 2005).

El concepto de planificación de la vida de servicio extrae su justificación desde la creencia básica de que los edificios deben cumplir los requisitos esenciales establecidos durante toda su vida de servicio. Por tanto, W. Trinius y C. Sjöström (2005) definen el final de la vida de servicio cuando ya no se puede proporcionar más la funcionalidad requerida por el edificio o por los componentes principales.

Por último, W. Trinius y C. Sjöström disponen que para diseñar un edificio que cumpla los requisitos establecidos, el equipo de diseñadores tendrá que descomponer los requisitos al nivel en el cual se han de tomar las decisiones. Además, deben prestarse las garantías necesarias para garantizar que la elección de los materiales es

apropiada para la elección de los componentes y para los requisitos globales de utilización del edificio (Trinius y Sjöström, 2005).

3.3.3. Diseño por ciclo de vida (DCV).

El autor S. Hernández (2011) define el diseño por ciclo de vida como una herramienta que permite diseñar con base a etapas definidas y que permite medir y planificar el periodo de vida útil y de rendimiento de un edificio y de sus componentes y materiales de construcción, durante todo su ciclo de vida. Esta herramienta también permite medir, planear y mitigar los impactos ambientales durante el ciclo de vida de un edificio.

En la siguiente figura se muestra un esquema general realizado por el autor S. Hernández, en cual se muestra el ciclo de vida de los edificios incluyendo el ciclo de vida de los materiales (ver figura 3.3).

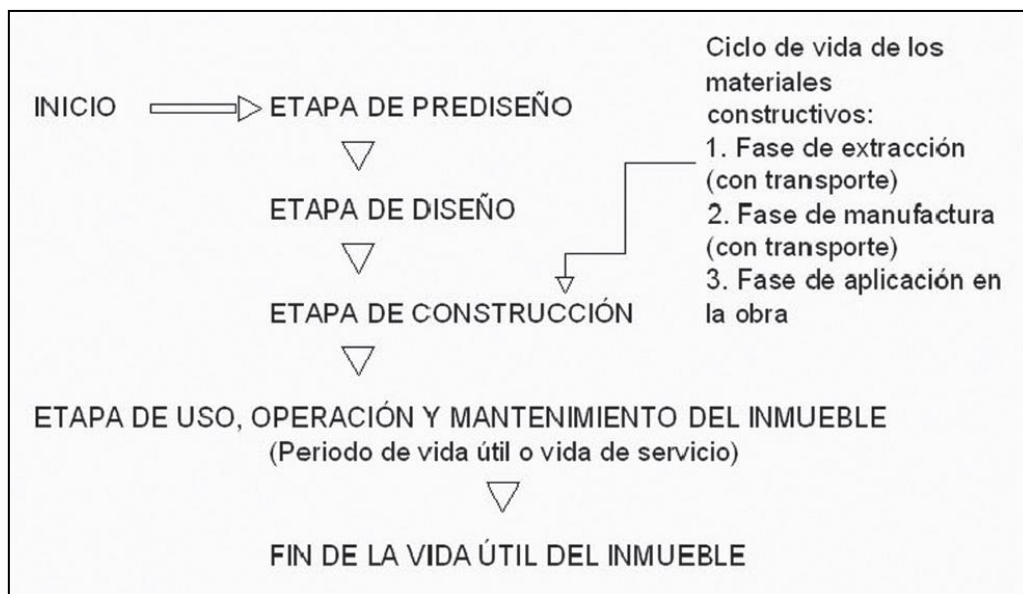


Figura 3.3. Ciclo de vida de los edificios incluyendo el ciclo de vida de los materiales. Fuente: Hernández, 2011.

Como se puede observar en la figura 3.3, el ciclo de vida de los materiales constructivos es independiente del ciclo de vida del edificio, conteniendo sus propias fases, pero se integra al ciclo de vida del edificio en la etapa de construcción y termina hasta la última etapa correspondiente al fin de la vida útil.

3.3.4. Diseño basado en el rendimiento (Performance-Based Design) de riesgos.

En el trabajo realizado por los autores J.W. Van De Lindt et al. (2009) se describe el proceso a seguir para el diseño basado en el rendimiento (Performance-Based Design) de riesgos. Según los autores, cada riesgo debe ser caracterizado de una manera suficientemente significativa para que pueda ser aplicado al análisis y diseño. Una vez el riesgo es caracterizado, se deben definir los descriptores cuantificables de rendimiento, que permitan un análisis para determinar si los objetivos de rendimiento se cumplen. Los valores de los descriptores de rendimiento se compararan con los valores obtenidos de un modelo numérico cuya complejidad debe ser descrita para cada riesgo. Finalmente se verifican las medidas de rendimiento y cómo el análisis puede ser extendido al diseño. La siguiente figura muestra un esquema de este proceso (ver figura 3.4).

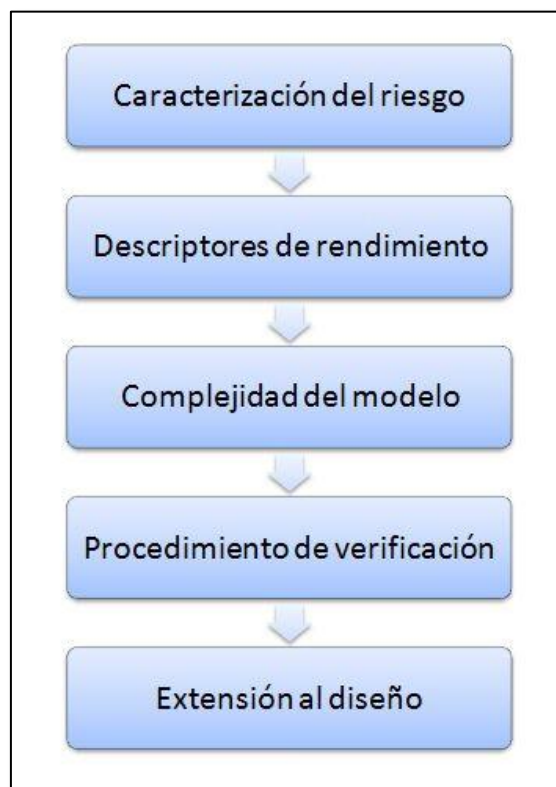


Figura 3.4. Esquema del diseño basado en el rendimiento (Performance Based Design). Fuente: elaboración propia en base a Van De Lindt et al., 2009.

3.3.4.1. Diseño basado en el rendimiento (Performance-Based Design) en estructuras.

Los autores J.W. van de Lindt et al. (2009) han analizado el estado actual del diseño basado en el rendimiento (PBD) en estructuras de madera para la durabilidad, así como para riesgos naturales como terremotos, viento, nieve e inundaciones. La información extraída de sus investigaciones se puede extrapolar a estructuras de diferentes materiales utilizados en edificación. A continuación se resumen sus investigaciones.

- Diseño basado en el rendimiento para la durabilidad:

Casi todos los factores de durabilidad en las edificaciones de madera están vinculados a la humedad, por lo que todos los descriptores de rendimiento deberían estar relacionados con el nivel de humedad (Van de Lindt et al., 2009).

- Diseño sísmico basado en el rendimiento:

El diseño sísmico basado en las expectativas de rendimiento está siendo realizado actualmente por la comunidad de investigadores, pero no todavía por la comunidad de profesionales de las edificaciones de madera (Van de Lindt et al., 2009).

- Diseño basado en el rendimiento para viento:

El riesgo producido por el viento se expresa por la distribución de probabilidad de su velocidad para un tiempo estándar promedio, por la exposición y por la elevación. La mayoría de fallos ocurren en el nivel de los componentes y del subconjunto. A causa de la falta de estadísticas, los vientos huracanados son simulados estadísticamente a partir de modelos climáticos. El modelo tiene que identificar la continuidad en el revestimiento, la variabilidad en la calidad de la fijación del revestimiento, y cómo es afectada la resistencia de los conectores a presiones negativas (Van de Lindt et al., 2009).

- Diseño basado en el rendimiento para nieve:

La aparición de un fallo parcial de la cubierta que comprometa la integridad estructural o el colapso completo del sistema de cubierta debería ser utilizado como el estado límite para proporcionar la prevención al colapso y asegurar la integridad estructural. Realizar modelos para la carga de nieve de cubiertas es complicado debido a la geometría y tipo de la cubierta, los deslizamientos de nieve y el comportamiento del sistema. Las condiciones de exposición y la orientación del edificio también afectan. Otro factor a considerar es el efecto de las condiciones térmicas sobre la carga de nieve y la acumulación de hielo. Además, el efecto de la lluvia sobre la nieve no puede ser ignorado, ya que el peso de la nieve puede incrementarse drásticamente cuando la lluvia satura la nieve (Van de Lindt et al., 2009).

- Diseño basado en el rendimiento para inundaciones:



El riesgo de inundaciones necesita ser caracterizado, al menos, en los siguientes tres aspectos: profundidad de inundación, velocidad del agua, y duración de la inundación. La profundidad de inundación es el factor más determinante porque determinará qué componentes de la edificación son afectados por la inundación. Los otros dos factores están más correlacionados con el grado de daño a los diversos componentes. Otro factor que debería ser incluido son los contaminantes contenidos en el agua.

3.3.5. Reutilización adaptativa y reutilización de componentes en la fase de diseño.

La reutilización adaptativa y la reutilización de componentes son procesos que permiten alargar la vida de las edificaciones. Mediante el proceso conocido como reutilización adaptativa, el edificio puede ser destinado a un propósito alternativo. Con la reutilización de componentes, algunos de los componentes pueden ser procesados para su reutilización en otros proyectos o para la creación de otros materiales (Straka, 2006).

El autor V. Straka (2006) establece que para prolongar la vida de una edificación y de sus componentes mediante la reutilización adaptativa o la reutilización de componentes es esencial tener en cuenta la planificación espacial y la selección de sistemas durante la fase de diseño. Destaca la importancia de considerar las implicaciones de diseño de algunos elementos, principalmente de la estructura, para proporcionar flexibilidad a la utilización del edificio y la posibilidad de que éste pueda tener usos alternativos.

En la investigación realizada por V. Straka (2006) se analizan las estrategias de diseño para los elementos estructurales de una edificación, su envolvente y sus sistemas mecánicos, eléctricos y de comunicación. A continuación se resumen las ideas extraídas más importantes.

En primer lugar, los elementos estructurales son adecuados para la reutilización adaptativa, ya que la estructura puede ser adaptada y renovada para nuevos usos, y también para la reutilización de componentes, que pueden ser utilizados en una nueva construcción. Según esto, la estrategia de diseño debe tener en cuenta principalmente factores relacionados con los detalles de conexión entre elementos estructurales, para que puedan ser desmontados fácilmente (Straka,2006).

En lo que respecta a la envolvente, la estrategia de diseño para la envolvente del edificio debe comprender: un análisis de los sistemas alternativos, criterios de selección, fácil acceso para mantenimiento y reemplazamiento, y desarrollo de un plan de mantenimiento (Straka,2006).

Por último, los sistemas mecánicos, eléctricos y de comunicación son, con diferencia, los que tienen una vida útil más corta, por lo que la estrategia de diseño

debe permitir un fácil acceso para mantenimiento, reemplazamiento y cambios en la tecnología (Straka, 2006).

3.3.6. Factores de diseño que afectan a la durabilidad en interiores de edificaciones.

Los autores M.Y.L. Chew y N. Silva discuten en su artículo (Chew y Silva, 2003) sobre los factores de diseño que afectan a la durabilidad y mantenibilidad de edificios, centrándose en las zonas húmedas de edificios residenciales. Identifican 11 factores principales asociados al diseño que afectan a la durabilidad y mantenibilidad de los edificios, y que se muestran en la tabla (ver tabla 3.8).

El principal factor que identifican es la impermeabilización inadecuada. Para evitar defectos en la impermeabilización, indican que se han de seguir las buenas prácticas constructivas, cubriendo el suelo entero de una zona húmeda con membranas impermeabilizantes y solapándolas hacia arriba en cada una de las paredes. Además los diseñadores deben proporcionar detalles precisos sobre la impermeabilización y la disposición de las tuberías en las zonas críticas (Chew y Silva, 2003).

Por último, los autores identifican como causas de la humedad los diseños defectuosos de drenaje de tuberías y de conductos de aire acondicionado y circulación de aire (Chew y Silva, 2003).

ORIGEN	FACTORES SECUNDARIOS
Diseño	Provisión inadecuada de membranas impermeabilizantes contra la penetración
	Provisión inadecuada de membranas impermeabilizantes en juntas (muros y suelos)
	Existencia de penetraciones en losas
	Provisión insuficiente de juntas de movimiento
	Existencia de tuberías embebidas
	Provisión insuficiente de la capa protectora por encima de la membrana impermeabilizante y por debajo de las tuberías embebidas
	Provisión inadecuada de drenaje por debajo de la bañera
	Provisión inadecuada de la circulación del aire
	Selección deficiente del material
	Diseño deficiente de los conductos de aire acondicionado
	Diseño deficiente de juntas entre el muro y la bañera

Tabla 3.8. Factores que afectan a la durabilidad de zonas húmedas asociados al diseño. Fuente: Chew y Silva, 2003 (traducción propia).

3.3.7. Normativas sobre el factor de la durabilidad en el diseño de edificaciones.

El diseño de una edificación siempre empieza con un proceso de planificación previa que incluye la selección de los materiales y la determinación de sus posiciones relativas en una construcción para producir un edificio o una parte de él. El autor G. Soronis (1996) expone cómo las consideraciones sobre durabilidad en el diseño de una edificación exigen tener un conocimiento extenso y un entendimiento de la vida de servicio de los materiales en su entorno de servicio. Por eso, concluye que hay una enorme necesidad de normas que traten sobre el factor de durabilidad en el diseño de una edificación.

El objetivo de las normas es exponer un procedimiento para el diseño de edificaciones con una vida de servicio específica. Esta vida de servicio se espera que se cumpla sin mayores problemas, si se sigue el plan de mantenimiento acordado. En consecuencia, el trabajo de estandarización no se basa solo en conocimientos puramente científicos, sino que también en conocimientos empíricos (Soronis, 1996).

La predicción de la vida de servicio y la exigencia para la durabilidad han sido tratadas en numerosos países, en sus normas y códigos de construcción. Las normas internacionales y guías principales más conocidas son las de Reino Unido, Japón y Canadá, que a continuación se desarrollan, así como las normas ISO 15686 (Soronis, 1996; Rudbeck, 2002; Nireki, 1996).

3.3.7.1. *British Standard BS7543.*

En Reino Unido existe la norma BS7543, publicada en 1992, en la cual se definen los conceptos de vida de servicio, vida de servicio requerida, vida de servicio prevista y vida de diseño. En dicha norma se discute el límite de durabilidad en relación al nivel aceptable de deterioro y se dan recomendaciones para la vida de diseño de edificios según su periodo de servicio (ver tabla 3.9).

La norma también establece que los requisitos de durabilidad varían en función del tipo de edificio, y que dichos requisitos dependen del uso del edificio, del presupuesto disponible y del mantenimiento que se vaya a realizar. Se dividen los componentes del edificio en tres niveles: reemplazable, mantenible o para toda la vida, más el nivel de mantenimiento requerido.

Por último, la norma realiza una categorización para los efectos de fallos en edificios y componentes que va desde la A hasta la H. Las categorías A-D corresponden a fallos que ponen en peligro la vida y la salud, mientras que las categorías E-H corresponden a fallos que no tienen impacto en las personas y que principalmente se relacionan con consideraciones económicas.

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO	VIDA ÚTIL DE DISEÑO
1	Temporales	Periodo de hasta 10 años
2	Vida corta	Mínimo 10 años
3	Vida media	Mínimo 30 años
4	Vida normal	Mínimo 60 años
5	Vida larga	Mínimo 120 años

Tabla 3.9. Categoría de la vida útil de diseño de edificios. Fuente: BSI, 1992.

3.3.7.2. Canadian Standard S478.

En Canadá existe la norma S478, en la cual se definen los conceptos de vida de servicio, vida de servicio prevista y vida de diseño. La durabilidad y la garantía de calidad son enfatizadas como una consideración esencial en cada fase de una edificación. Además ofrece una guía para el mantenimiento, en la que se sugieren como mínimo tres categorías que describen el nivel de mantenimiento necesario: poco o nada, significativo y excesivo.

Dicha norma establece la relación entre la vida útil de diseño de un edificio o de un elemento constructivo y la durabilidad de sus materiales. La vida útil de diseño del edificio ofrece la base para la determinación de la vida útil de diseño de los elementos constructivos (ver tabla 3.10). Según esta norma, los requisitos de durabilidad varían de un edificio a otro en función del uso previsto, del coste, y de la frecuencia, dificultad y accesibilidad del mantenimiento, sustitución y reparación.

La norma también hace una categorización del 1 al 8 de los efectos de fallos. Las categorías 1-5 corresponden a fallos que no tienen impacto en las personas y que principalmente se relacionan con consideraciones económicas, y las categorías 6-8 corresponden a fallos que ponen en peligro la vida y la salud.

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO	VIDA ÚTIL DE DISEÑO
1	Temporales	Periodo de hasta 10 años
2	Vida corta	Mínimo 10 años
3	Vida media	Mínimo 25 años
4	Vida larga	Mínimo 50 años
5	Permanentes	Mínimo 100 años

Tabla 3.10. Categorías de la vida útil de diseño de edificios contenida en la normativa canadiense CSA 478-95. Fuente: Canadian Standards Association, 2007.



3.3.7.3. Japanese Principal Guide.

El Instituto de Arquitectura de Japón publicó una edición en inglés de la “Principal Guide for Service Life Planning of Buildings”, la cual se parece a la norma británica y a la norma canadiense vistas anteriormente, pero con la diferencia de que ésta incluye las responsabilidades de toda la gente que interviene en la durabilidad de la edificación. Además, considera aspectos sobre la flexibilidad y obsolescencia de la edificación.

En esta guía se recomiendan y se describen las especificaciones de mantenimiento de partes de elementos, componentes y servicios de edificaciones que se refieren a reparación, renovación, inspección y cuidado.

En la norma se establece que el valor de referencia para la vida de servicio prevista debe de ser ajustado por el diseñador teniendo en cuenta factores como la calidad de los materiales utilizados, el nivel de diseño o el nivel de ejecución de los trabajos.

En la siguiente figura, se ilustra un esquema del concepto de esta guía (ver figura 3.5).

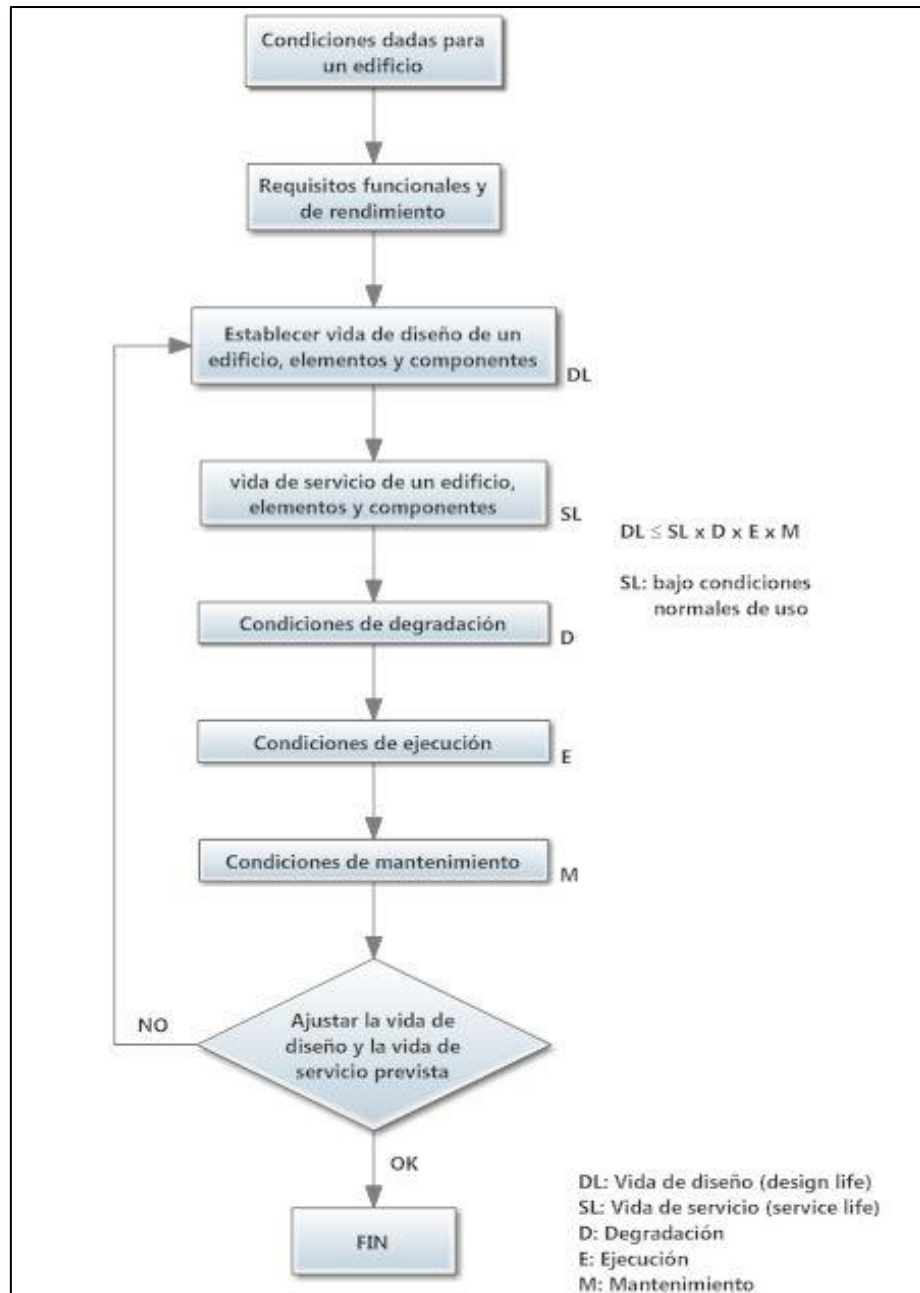


Figura 3.5. Esquema del concepto de la "Principal Guide for Service Life Planning of Buildings. Fuente: elaboración propia en base a Nireki, 1996.

3.3.7.4. Conceptos de las normas BS7543, S478 y Japanese Principal Guide.

A continuación se muestra una tabla resumen con las definiciones encontradas en las tres normas anteriores (ver tabla 3.11).



	British Standard BS7543	Canadian Standard S478	Japanese Principal Guide
Vida de servicio	Periodo hasta el punto en el cual el rendimiento se deteriora hasta un nivel inaceptable definido	Periodo durante el cual el edificio o cualquiera de sus componentes funcionan sin costes imprevistos o interrupciones por mantenimiento y reparación	-
Vida de servicio requerida	Vida de servicio en la cual se cumplen los requisitos de los usuarios, que son los mimos que para el cliente	-	-
Vida de servicio prevista	Estimación de la vida de servicio	Vida de servicio estimada a partir de rendimientos registrados	Determinada como el valor más pequeño de los valores previstos por la vida de servicio, obtenido sobre bases físicas de deterioro y obsolescencia
Vida de diseño	Propuesta por el diseñador de acuerdo con el cliente, pretende respaldar las especificaciones de rendimiento del cliente	Vida de servicio especificada por el diseñador de acuerdo con las expectativas y requisitos de el propietario de la edificación	Vida de diseño planificada de un edificio, sus componentes, y el mantenimiento necesario especificada por el diseñador

Tabla 3.11. Resumen de las definiciones encontradas en las normas. Fuente: elaboración propia a partir de las normas BS7543, S478 y Japanese Principal Guide.

3.3.7.5. Estandarización internacional (ISO).

Las normas ISO 15686 son un conjunto de normas internacionales que tratan específicamente la planificación de la vida útil y cuyo objetivo es garantizar que la vida útil estimada de un edificio, con una ubicación específica y con un mantenimiento planificado, no supera la vida de diseño. Este documento presenta los principios genéricos que pueden ser aplicados para estimar la vida esperada de un edificio de cualquier tipo para ser construido en cualquier ambiente.

El diseñador tiene que asegurar que la vida de servicio del edificio y la vida de servicio de sus componentes es mayor que la vida de diseño correspondiente.

La norma se divide en cinco partes:

3. ESTADO DEL ARTE

1. Parte I: presenta los principios generales para evaluar si la vida de servicio esperada será igual o mayor que la vida de diseño.
2. Parte II: detalla los métodos que pueden ser utilizados para determinar la vida esperada.
3. Parte III: presenta información sobre la garantía de calidad, mantenimiento y rendimiento.
4. Parte IV: proporciona referencias de normas relevantes y bibliografía, así como un glosario.
5. Parte V: recomienda formatos para la utilización de datos y la generación de informes.

En la parte 1 de dicha norma se presenta una tabla con valores de vida de diseño mínima para elementos constructivos e instalaciones (ver tabla 3.12). Esta tabla sugiere valores de vida mínima de diseño de algunos componentes e instalaciones del edificio en función de la vida de diseño que se establezca para el mismo, basándose en la facilidad de reposición y en la accesibilidad para el mantenimiento. La norma destaca que la vida útil de un edificio está limitada por la degradación de sus componentes no reemplazables.

VIDA DE DISEÑO DEL EDIFICIO	VIDA DE DISEÑO MÍNIMA DE COMPONENTES			VIDA DE DISEÑO MÍNIMA DE INSTALACIONES
	Inaccesible o estructural	Reposición cara o difícil	Fácil de reponer	
Ilimitada	Ilimitado	100 años	40 años	25 años
150 años	150 años	100 años	40 años	25 años
100 años	100 años	100 años	40 años	25 años
60 años	60 años	60 años	40 años	25 años
25 años	25 años	25 años	25 años	25 años
15 años	15 años	15 años	15 años	15 años
10 años	10 años	10 años	10 años	10 años

Tabla 3.12. Sugerencias de vidas de diseño mínimas por componentes. Fuente: ISO 15686, 2000.

3.4. CONSIDERACIONES SOBRE DURABILIDAD EN LA FASE DE EJECUCIÓN

3.4.1. Factores generales de ejecución que afectan a la durabilidad de las edificaciones.

Durante la fase de construcción, la durabilidad puede verse perjudicada debido a una ejecución incorrecta, por lo que la ejecución tiene una gran importancia para obtener el rendimiento y la durabilidad de diseño. De forma generalizada, el principal factor que afecta a la durabilidad en la fase de ejecución es la calidad tanto de la construcción como de la mano de obra. Éste es un factor clave para la durabilidad, y es necesario realizar una elevada inspección y supervisión que permita controlar la calidad y asegurar que se cumplirán los requisitos de rendimiento y durabilidad establecidos durante la fase de diseño.

Además de la inspección y supervisión, la utilización de guías de buenas prácticas también permite mejorar la calidad de la ejecución. Por otra parte, la tecnología de los materiales prefabricados, sobretodo en el caso del hormigón, es una innovación que puede mejorar la calidad inherente de las construcciones.

A continuación se desarrollan los factores que afectan a la construcción de edificios con estructuras de hormigón armado y a las construcciones interiores de las edificaciones.

3.4.2. Factores de ejecución que afectan a la durabilidad de las estructuras de hormigón armado.

La durabilidad de las estructuras de hormigón puede verse perjudicada debido a una ejecución incorrecta. En el artículo escrito por M. R. Geiker (2012), el autor habla sobre la importancia de la ejecución para obtener el rendimiento y la durabilidad de diseño. En dicho artículo establece que la durabilidad del hormigón puede verse mermada debido a un proceso incorrecto de vertido, compactación, acabado y/o curado, todos ellos factores relacionados con la ejecución del trabajo. Los posibles resultados negativos son la falta de relleno de las formas del encofrado, falta de homogeneidad, espesor insuficiente del recubrimiento de hormigón y/o grietas.

Una de las conclusiones que presenta el autor M. R. Geiker (2012) es que el impacto de la ejecución del trabajo varía entre distintos tipos de hormigón. Además, el diseño de la mezcla debería incluir una valoración de la estabilidad y del desarrollo de las características del hormigón en las condiciones anticipadas de ejecución, aplicando los métodos de ejecución que van a ser utilizados in situ, así como una evaluación de la resistencia del hormigón a variaciones naturales en la composición de la mezcla y

en la ejecución. Por último, el autor concluye que las simulaciones numéricas pueden ayudar a la valoración y la optimización combinada del diseño estructural, materiales y ejecución.

En Europa, la ejecución de estructuras de hormigón armado está regulada por la norma EN 13670, y los requisitos para la ejecución del mantenimiento y reparación están regulados por la parte 10 de la norma EN 1504.

3.4.2.1. Impacto de la mezcla en las propiedades del hormigón.

El método de mezclar utilizado deberá asegurar un uso óptimo de los recursos y una calidad constante del hormigón. Además, dicho método de mezclar, como la intensidad o la programación, puede afectar a las propiedades del hormigón fresco, del endurecimiento del hormigón y del hormigón endurecido. La mezcla de hormigón debe ser optimizada teniendo en cuenta los requisitos contrapuestos de calidad y productividad (Geiker, 2012).

3.4.2.2. Impacto del vertido en la homogeneidad.

El hormigón auto-compactante y el hormigón reforzado con fibras son dos tipos de hormigón que proporcionan posibles oportunidades para mejorar la durabilidad y el rendimiento, y por tanto la sostenibilidad. Por un lado, el hormigón auto-compactante tiene propiedades especiales mientras está en estado fresco, y fluye dentro del encofrado y alrededor de las armaduras rellenando todos los espacios. Por tanto, en contraposición con el hormigón convencional, este tipo de hormigón no necesita vibración, lo cual mejora notablemente la homogeneidad y la calidad del hormigón. Por otro lado, el hormigón reforzado con fibras puede ser utilizado en algunos elementos estructurales sin la utilización de los refuerzos convencionales. Dicho hormigón proporciona una mejora de la durabilidad, debido a que las fibras de acero tienen una resistencia a la corrosión mucho mayor que los hormigones convencionales, y además es mucho menos probable que las fibras corroídas causen la fisuración del hormigón que lo envuelve. Pero con estos dos tipos de hormigón se han de tener ciertas precauciones. El hormigón auto-compactante debe de ser lo suficientemente fluido para que rellene completamente el encofrado, y al mismo tiempo tiene que ser lo suficientemente estable para que no se produzca disgregación. El hormigón reforzado con fibras debe de ser vertido buscando optimizar la orientación de las fibras y el rendimiento mecánico (Geiker, 2012).

3.4.2.3. Impacto de la temperatura y la humedad en la porosidad.

La calidad de los 30-70 mm. exteriores del hormigón (el recubrimiento) es especialmente importante para la durabilidad, ya que limita la penetración de sustancias agresivas y protege la armadura de refuerzo.

El autor M. R. Geiker (2012) analiza cómo afecta la temperatura y la humedad del curado a la porosidad del hormigón:

- Incrementar la duración del curado mejora la resistencia a la penetración de cloruros y reduce la profundidad de la zona afectada. Los efectos de un curado deficiente en la corrosión a través del tiempo pueden ser significantes, especialmente para pequeños espesores de recubrimiento.
- La temperatura afecta al desarrollo de la estructura porosa de los materiales cementosos, debido a que las reacciones se producen más rápidamente cuanto mayor es la temperatura, dando como resultado pastas menos homogéneas.
- La temperatura puede también alterar el equilibrio de unión de las fases sólidas del cemento y afectar el volumen sólido, y por tanto la porosidad.
- Además de la temperatura, la humedad afecta el desarrollo de la porosidad.

3.4.2.4. Limitación del agrietamiento.

Las grietas pueden afectar al rendimiento general, a la apariencia y a la durabilidad de una estructura. Con el aumento de la temperatura de curado se reduce la resistencia y la tendencia al agrietamiento se incrementa. Según M. R. Geiker (2012), el impacto de las grietas depende de:

- La morfología de la grieta
- La exposición
- Las propiedades de los materiales
- La configuración geométrica

El agrietamiento del hormigón a edades tempranas es un fenómeno complejo y que debe ser limitado. Para el mismo autor anterior (Geiker, 2012), dicho fenómeno depende de:

- Efectos térmicos
- Tensiones y deformaciones propias
- El secado
- Mitigación de la tensión
- Detalles estructurales y ejecución

3.4.2.5. Inclusión de aire para la resistencia a las heladas

La inclusión de aire se utiliza para mejorar la resistencia a las heladas del hormigón. El aire es incluido durante la mezcla del hormigón fresco, y es estabilizado mediante aditivos. La estructura resultante con huecos de aire en la mezcla fresca de hormigón depende entre otros factores de, según el autor (Geiker, 2012), la composición del hormigón, el procesamiento por lotes, la mezcla, y por la posible contaminación por hidrocarburos de la mezcla. La estructura con huecos de aire en el hormigón endurecido depende del transporte, la colocación y compactación, el acabado y la presión.

3.4.3. Factores de ejecución que afectan a la durabilidad en construcciones interiores.

Los autores M.Y.L. Chew y N. Silva (2003) discuten en su artículo sobre los factores que afectan a la construcción interior, centrándose en las zonas húmedas de los edificios residenciales. Identifican la calidad de la construcción y mano de obra como un factor clave, donde es necesario realizar una elevada inspección y supervisión. Los autores también identifican 16 factores que contribuyen a la calidad defectuosa de la construcción, y que se muestran en la siguiente tabla (ver tabla 3.13). Por último, los autores señalan cómo la tecnología del hormigón prefabricado es una innovación que puede mejorar la calidad inherente de las construcciones, además de de la utilización de guías de buenas prácticas.



ORIGEN	FACTORES SECUNDARIOS
Ejecución	Mano de obra deficiente en la aplicación de membranas impermeabilizantes
	Mano de obra deficiente en el hormigonado de suelos (compactación, curado, etc.)
	Dejar amplias oberturas para las tuberías durante el vertido de suelos
	Perforación de losas del suelo para las tuberías
	Inclinación insuficiente de los suelos hacia el sumidero
	Mano de obra deficiente en la nivelación de la capa de pavimento
	Conexión inadecuada entre sumidero y tuberías de descarga
	Preparación deficiente de la capa para el pintado
	Mano de obra deficiente en el fijado de tuberías
	Espesor inadecuado del recubrimiento de hormigón
	Mano de obra deficiente en el fijado de bañeras
	Mezcla deficiente de la capa de pavimento
	Mezcla deficiente del material utilizado como 'cama'
	Lechada deficiente
	Alto contenido de sales en la arena utilizada en los sustratos
Preparación deficiente de la superficie para azulejos	

Tabla 3.13. Factores que afectan a la durabilidad de zonas húmedas asociados a la ejecución. Fuente: Chew y Silva, 2003 (traducción propia).

3.5. CONSIDERACIONES SOBRE DURABILIDAD EN LA FASE DE MANTENIMIENTO

Durante la vida de servicio los edificios se deterioran y llegan a convertirse en obsoletos, debido entre otras causas a los efectos del clima, la utilización y el desgaste. El deterioro empieza en el mismo momento en el que terminan de ser construidos (Flores-Colen y Brito, 2010). El mantenimiento y las reparaciones

garantizan la prolongación de la vida útil, logrando evitar el deterioro y, finalmente, su destrucción (Arencibia, 2007). Por tanto, la vida útil está estrechamente ligada al mantenimiento de una edificación.

El British Standards Institute define el mantenimiento de un edificio como *“el trabajo acometido para mantener, restaurar o mejorar cada parte del edificio, sus servicios y sus alrededores, con las normas actualmente aceptadas, y para sostener la utilidad y el valor del edificio”* (British Standards Institute, 1984). En resumen, el mantenimiento es el conjunto de operaciones y cuidados necesarios para que los edificios e instalaciones puedan seguir funcionando adecuadamente (Arencibia, 2007).

Los edificios pueden fallar por numerosas razones: fallos de diseño, fallos de construcción, fallos de mantenimiento, fallos de materiales o fallos de utilización. En su artículo, los autores I. Flores-Colen y J. Brito (2010) hacen énfasis en los fallos de mantenimiento, que se pueden descomponer en dos partes:

- Mantenimiento que ha sido llevado a cabo incorrectamente.
- No se ha realizado ningún mantenimiento durante toda la vida del edificio. Éste último es el más común.

En el estudio llevado a cabo en Hong Kong en el año 2000 por K. C. Lam (2009), se reveló que aproximadamente el 40% de los fallos de mantenimiento estaban relacionados con el diseño, el 30% estaban relacionados con la construcción o instalación y el 30% restante estaban relacionados con la gestión del mantenimiento.

Investigaciones como la de los autores M. Y. L. Chew et al. (2004) y I. Flores-Colen y J. Brito (2010) establecen que el proceso inevitable de deterioro puede ser controlado y que la vida de servicio de los edificios puede ser extendida si son mantenidos adecuadamente. Por su parte, los autores I. Flores-Colen y J. Brito (2010) concluyen que las estrategias de mantenimiento son esenciales para controlar las primeras fases de degradación y para prevenir el fallo de los elementos del edificio. Además, la selección de las estrategias apropiadas y con mejor relación efectividad-coste pueden minimizar la disminución en el rendimiento de los edificios durante su ciclo de vida completo.

Para poder realizar adecuadamente la planificación de las tareas de mantenimiento, es necesario disponer de información fiable sobre la vida de servicio de los componentes de edificación. Si la durabilidad de los materiales es conocida, se puede identificar el intervalo de tiempo para el mantenimiento y reparación de los componentes de las edificaciones. Según el autor A. Straub (2011) existe una falta de referencias fiables sobre datos de vidas de servicio de los productos de construcción, y en su artículo realiza una revisión de los catálogos de vida de servicio realizados en Holanda, así como la publicación de un nuevo catálogo basándose en el método de los factores.

Por último, los costes de mantenimiento representan la mayor parte del coste total en la vida completa de un edificio. Según el autor J. J. Griffin (1993), el coste

inicial, correspondiente al diseño y construcción, podría representar únicamente alrededor del 25% del coste total, mientras que los costes de mantenimiento y operación supondrían del 50% al 80% del coste durante su vida de servicio.

3.5.1. Tipos de mantenimiento.

En general, existen dos tipos principales de mantenimiento (Arencibia, 2007):

- **Mantenimiento preventivo:** previene cualquier inconveniente que pueda suceder durante la vida útil de las edificaciones. Este tipo de mantenimiento ofrece la posibilidad de ser programado en el tiempo, permitiendo, por tanto, ser evaluado económicamente.
- **Mantenimiento correctivo:** su finalidad es corregir aquellos errores que ya presenta la edificación. Este tipo de mantenimiento responde a situaciones inesperadas, que no han sido previstas.

Aparte de la clasificación general del tipo de mantenimiento visto anteriormente, a lo largo del tiempo se han propuesto diferentes tipos de clasificaciones atendiendo a diversos factores. Entre ellas mencionamos la presentada en el artículo publicado por I. Flores-Colen y J. Brito (2010), donde los autores presentan tres tipos de mantenimiento:

- **Mantenimiento preventivo:** mantenimiento programado o predefinido en intervalos regulares para asegurar el buen rendimiento continuado de los componentes. Este tipo de mantenimiento reduce los trabajos no planificados y permite la estimación de los costes generales.
- **Mantenimiento predictivo:** mantenimiento que realiza una predicción de rendimientos y una planificación de inspecciones de rendimiento. Esta estrategia de mantenimiento es adecuada para elementos cuya condición y rendimiento puede ser supervisado adecuadamente.
- **Mantenimiento reactivo:** está asociado con la corrección de anomalías inesperadas y es casi siempre un procedimiento de emergencia.

Las estrategias de mantenimiento preventivas y predictivas son clasificadas como mantenimiento proactivo, el cual previene los problemas antes de que ocurran.

La comparación de cada estrategia de mantenimiento depende fuertemente de la relación rendimiento-degradación, del nivel mínimo de calidad, de la vida de servicio y de la frecuencia de las operaciones de mantenimiento (Flores-Colen y Brito, 2010).

3.5.2. El mantenimiento en las diferentes etapas del proceso constructivo.

En el artículo publicado por J.M. Arencibia se habla sobre la influencia que tienen cada uno de los periodos del proceso constructivo sobre el mantenimiento de una edificación. El autor plantea que las correcciones de mantenimiento, cuanto antes sean ejecutadas, serán más durables, efectivas, más fáciles de ejecutar y mucho más económicas (Arencibia, 2007). A continuación se muestran los cuatro períodos en los que el autor H. do Lago ha dividido el proceso constructivo en función de su influencia con el mantenimiento (do Lago, 1979):

- Proyecto: medidas de mantenimiento tomadas a nivel de diseño durante la fase de proyecto con el fin de aumentar la protección y la durabilidad de la edificación.
- Ejecución: medidas de mantenimiento tomadas durante la ejecución propiamente dicha, y que no estaban previstas en el proyecto inicial.
- Mantenimiento preventivo: medidas de mantenimiento tomadas con antelación y previsión durante el período de uso de la edificación.
- Mantenimiento correctivo: medidas de mantenimiento tomadas para el diagnóstico, corrección y protección de la edificación cuando ya presenta manifestaciones patológicas durante su fase de uso.

3.5.3. Mantenibilidad de edificaciones.

El concepto de mantenibilidad queda definido en el apartado 1.6 “Definiciones básicas” del capítulo 1 de esta investigación. Para gestionar mejor y aumentar la calidad del mantenimiento, conocer los factores que influyen en la mantenibilidad y la evaluación del nivel de mantenibilidad son dos fundamentos importantes e indispensables (Chew et al., 2004). La Universidad Nacional de Singapur y la Autoridad de Construcción de Edificios (Building Construction Authority) de Singapur elaboraron un proyecto para mejorar la mantenibilidad de las edificaciones en Singapur (ver figura 3.6). El proyecto incluye una librería online de defectos, un manual de materiales y un sistema de clasificación de la mantenibilidad. Los dos principales elementos que han estudiado en este proyecto son las fachadas y las zonas húmedas.

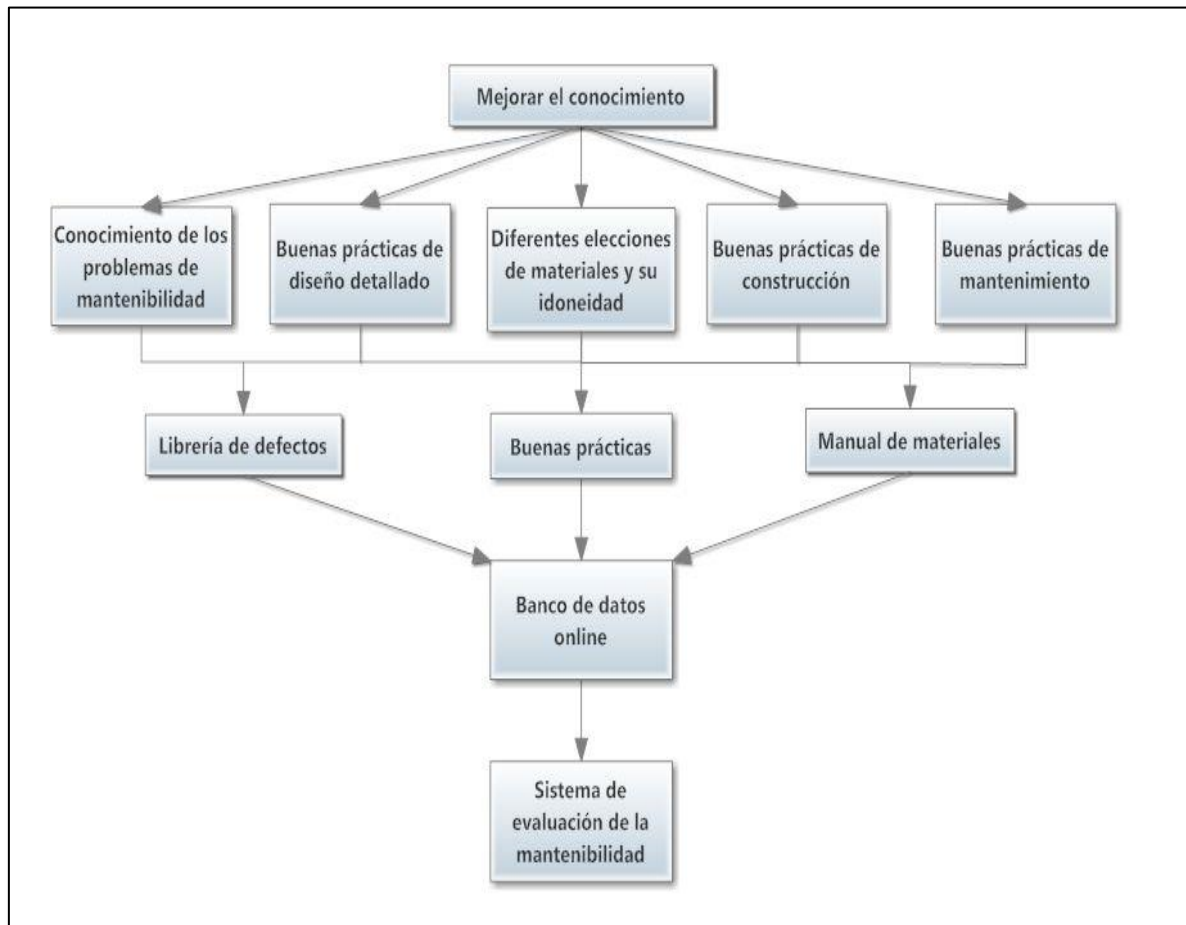


Figura 3.6. Esquema del proyecto para conseguir la mantenibilidad de las edificaciones en Singapur.
Fuente: elaboración propia en base a Chew et al., 2004.

El artículo publicado por M. Y. L. Chew et al. (2004) presenta los puntos más importantes de dicho proyecto, resumidos a continuación. El artículo también propone que la mantenibilidad de las edificaciones debe estar integrada con la gestión de la calidad durante el diseño y la construcción y con el análisis de costes del ciclo de vida, para lograr mejores resultados. Los puntos más importantes del proyecto en el caso de la industria de la construcción de Singapur son los siguientes:

- Librería online de defectos: presenta los defectos comunes en los elementos de fachada y zonas húmedas de las edificaciones. Proporciona una plataforma para evaluar problemas futuros relacionados con los elementos de los edificios (Ver figuras 3.7 y 3.8).
- Manual de materiales: reúne información sobre selección de materiales y su sostenibilidad. Se centra en varios rendimientos bajo condiciones climáticas ambientales, incluidos durabilidad, sostenibilidad y facilidad de limpieza de los materiales. Es importante tener en cuenta que los mismos materiales rinden de forma diferente en distintas condiciones climáticas. Esta guía

proporciona referencias comprensivas para los agentes que participan en la industria de la construcción y les permite seleccionar los materiales más apropiados que permitan aumentar el rendimiento a largo plazo de los edificios a través de su vida útil.

- Sistema de clasificación de la mantenibilidad: se propone un modelo de mantenibilidad de fachadas y zonas húmedas que permite la comparación de varias alternativas de diseño, materiales, construcción y mantenimiento, así como para lograr soluciones óptimas que permitan minimizar el coste de mantenimiento del ciclo de vida. Se consideran los siguientes factores (en la figura 3.9 se detalla una descomposición de estos factores):
 - Diseño (estanqueidad, adaptación de tensiones, control del flujo de agua, accesibilidad, rendimiento del material)
 - Construcción (calidad)
 - Mantenimiento (calidad)
 - Medio ambiente y utilización
 - Perfil del edificio

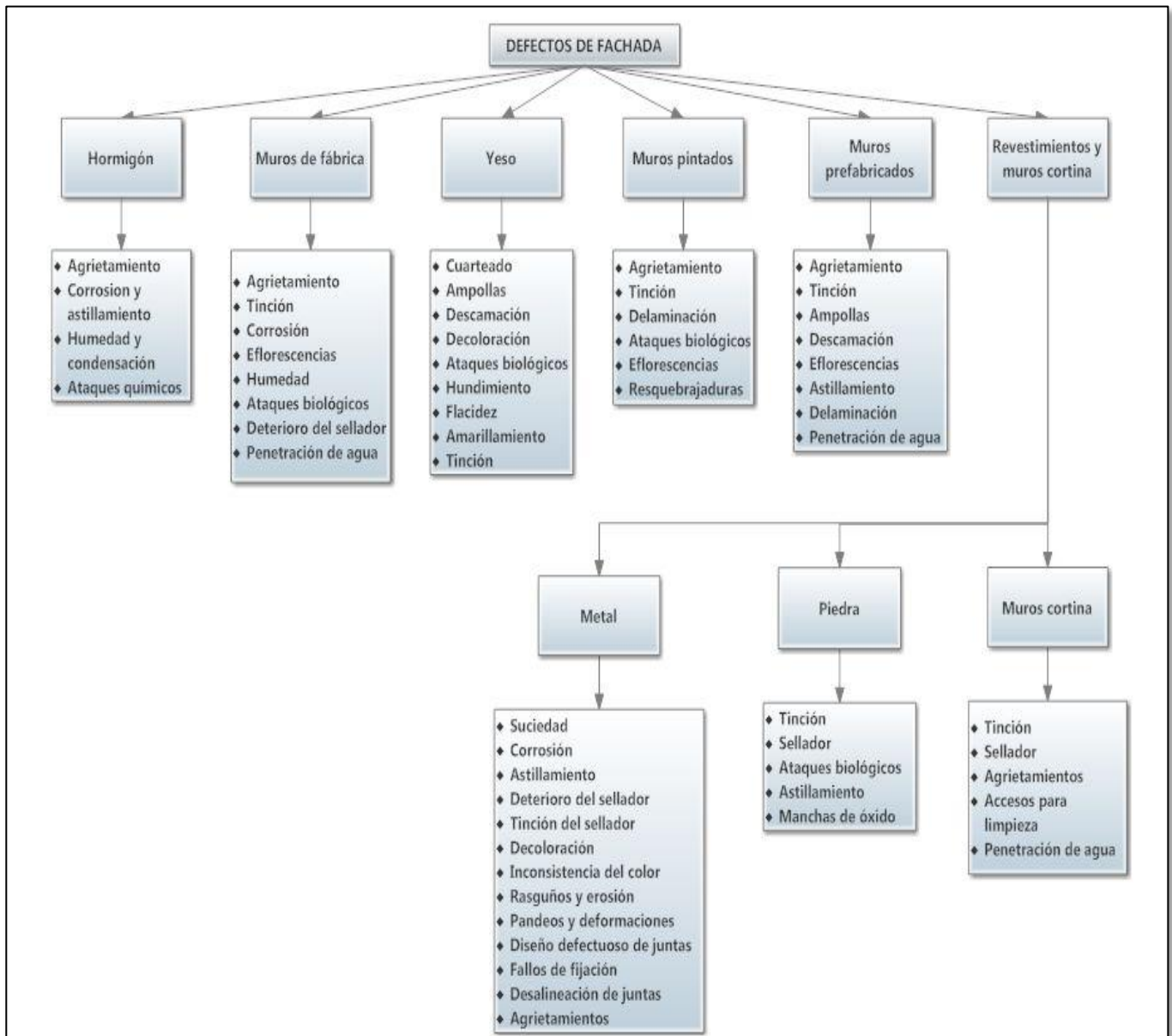


Figura 3.7. Defectos en fachadas. Fuente: elaboración propia en base a Chew et al., 2004.

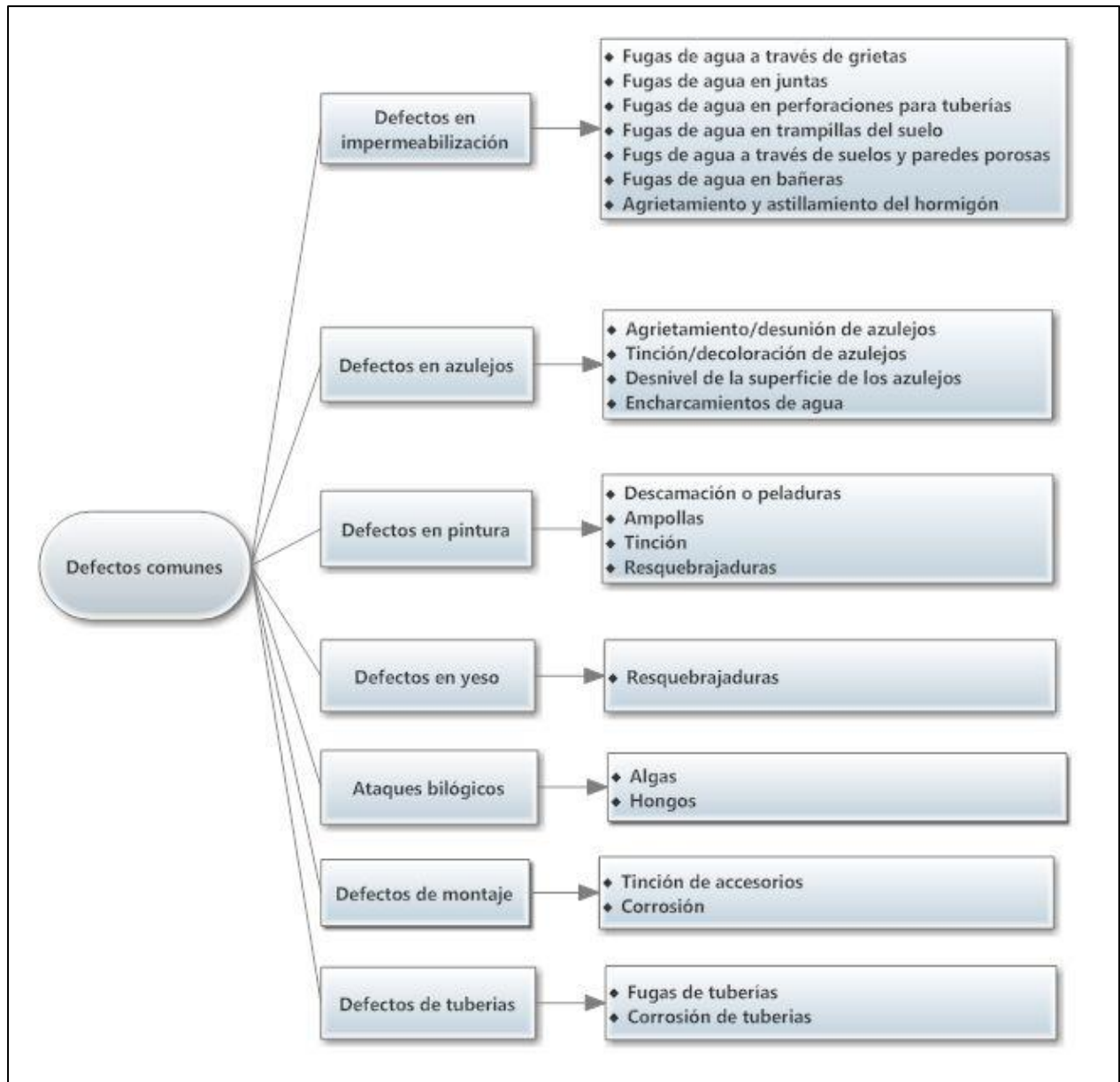


Figura 3.8. Defectos en zonas húmedas. Fuente: elaboración propia en base a Chew et al., 2004.

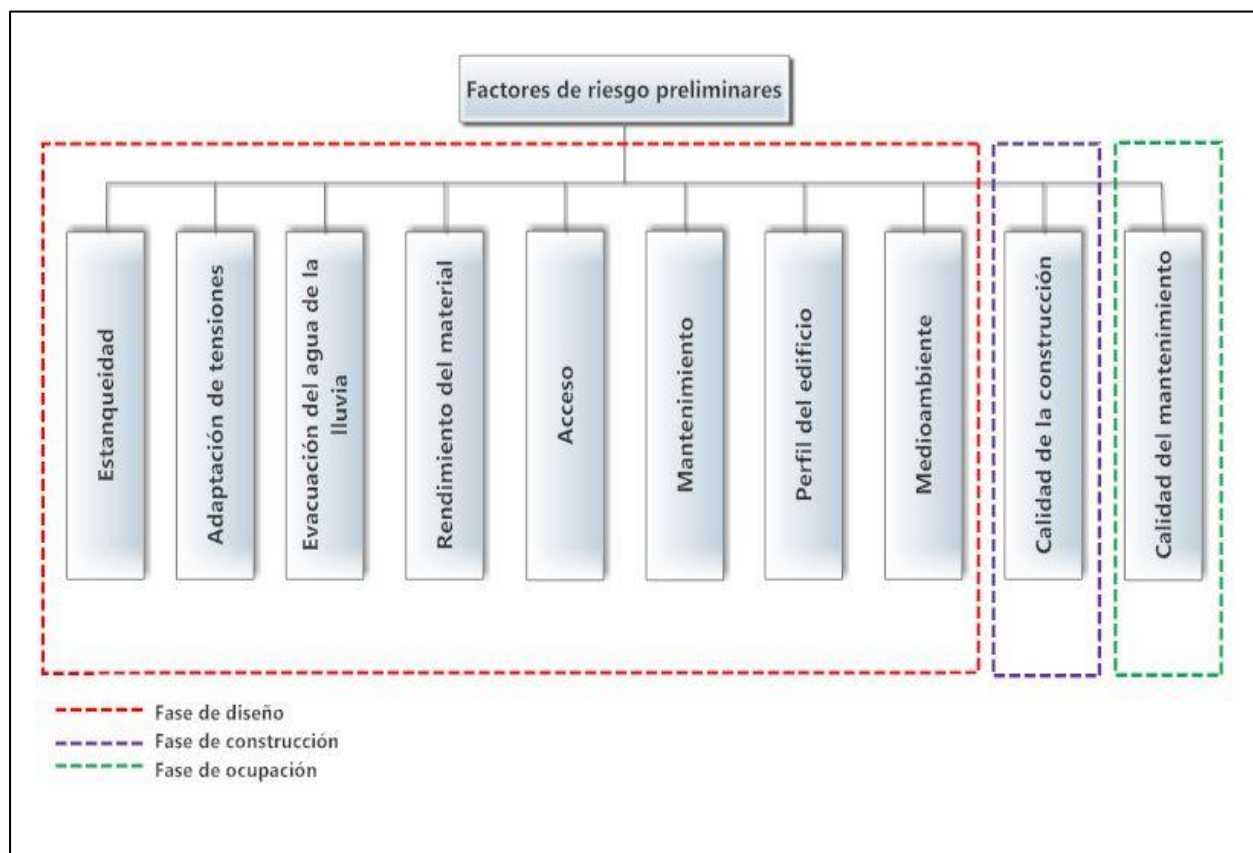


Figura 3.9. Factores de mantenibilidad. Fuente: elaboración propia en base a Chew et al., 2004.

3.5.3.1. Mantenibilidad de las zonas húmedas.

Los autores M. Y. L. Chew y N. Silva realizaron una búsqueda para identificar los principales problemas relacionados con la mantenibilidad de las zonas húmedas en edificios residenciales, así como de los factores que afectan al mantenimiento de edificios (Chew y Silva, 2003). Para ello estudiaron 222 casos correspondientes a 67 edificios situados en Singapur. Los casos se clasificaron en 8 categorías que se resumen a continuación (goteras, defectos de pintura, fugas y corrosión en tuberías, desprendimiento y agrietamiento del hormigón, crecimiento de hongos y algas, encharcamiento de agua, manchas y decoloración de baldosas, y agrietamiento y despegue de baldosas). Los resultados mostraron que en la mayoría de casos estudiados, las fugas de agua fueron el principal defecto encontrado (36%), seguido por los defectos de pintura (27%) y los defectos en tuberías (10%) (ver figura 3.10).

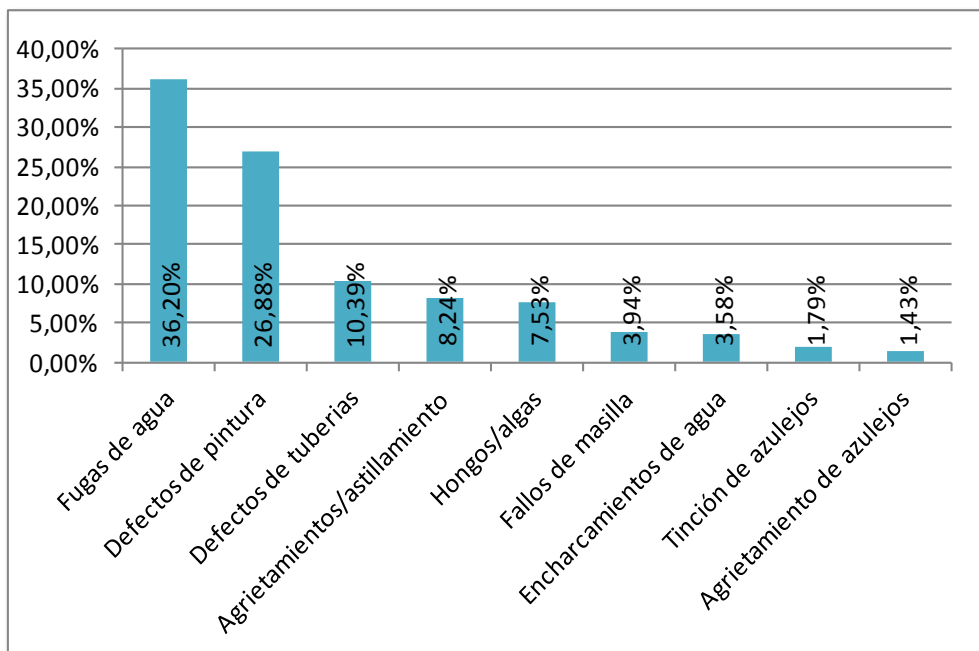


Figura 3.10. Porcentaje de defectos en zonas húmedas. Fuente: elaboración propia en base a Chew y Silva, 2003.

Las principales causas de estos defectos fueron identificadas en la tabla 3.14 y el análisis detallado de estos defectos se muestra en la tabla 3.15. Los autores concluyen que estos defectos son causados por la baja calidad de la ejecución de los trabajos, diseños insuficientes o inadecuados de detalles, malas prácticas de mantenimiento (incluyendo programas inefectivos de limpieza, reparación y mantenimiento) y bajo rendimiento del material. El bajo rendimiento de los materiales utilizados en zonas húmedas puede ser el motivo de un rápido deterioro, dependiendo de su exposición. Las características de los materiales y los requisitos de mantenimiento deben de ser considerados desde la fase de diseño (Chew y Silva, 2003).

En cuanto a los programas de mantenimiento, los autores concluyen que las malas prácticas en dichos programas, la falta de un sistema de mantenimiento, un largo tiempo de respuesta y presupuestos limitados son los principales factores para la ineficacia de estos programas. Parámetros de diseño, construcción y mantenimiento son consideraciones fundamentales para mejorar la mantenibilidad de las zonas húmedas, desde la fase de diseño (Chew y Silva, 2003).

Defecto	Diseño defectuoso	Construcción interior	Mantenimiento	Material/ medioambiente
Fugas de agua de techos y paredes	•	•	•	•
Tinción o decoloración:				
Azulejos		•	•	
Placas de techo	•	•	•	•
Defectos de pintura	•	•		•
Agrietamiento y astillamiento del hormigón	•	•	•	
Agrietamiento y desunión de azulejos		•		
Crecimiento de hongos y algas	•	•	•	•
Fugas de tuberías y corrosión		•	•	•

Tabla 3.14. Principales causas de los defectos. Fuente: elaboración propia en base a Chew y Silva, 2003.

El conocimiento de las patologías de edificación y la previsión de defectos durante la fase de utilización del edificio pueden llevar a un mantenimiento y renovación menos frecuente y más apropiado, ayudando a alargar la vida de servicio y durabilidad de los componentes (Costanzo. 2006).

El autor E. Costanzo expone en su artículo las ventajas de la creación de un archivo sobre patologías de edificación a partir de casos de peritajes y consultorías, y propone un protocolo para la recolección de los datos de campo (Costanzo. 2006).

Las categorías en las que se clasifican los defectos encontrados en el artículo de Chew y Silva se resumen a continuación, así como sus causas principales (Chew y Silva, 2003):

- Goteras: sus causas incluyen discontinuidades o incompatibilidad del forjado (debido principalmente a penetración de tuberías y juntas), disposición o tratamiento inadecuado de las juntas de movimiento, e impermeabilización inadecuada (diseño y aplicación inefectivo de las membranas impermeabilizantes).
- Defectos de pintura: los principales defectos incluyen formación de ampollas, peladuras, descamación, erosión, eflorescencias, y crecimiento de hongos y algas. La principal causa es la filtración de agua debido a la aplicación inadecuada de membranas impermeabilizantes alrededor de penetraciones de tuberías, juntas y paredes, en zonas de ducha y baño.
- Fugas y corrosión en tuberías: La mayoría de tuberías en edificios viejos son de hierro fundido y los problemas de corrosión son comunes. El oxígeno disuelto y las sustancias ácidas crean un ambiente que favorecen la corrosión.

3. ESTADO DEL ARTE

- Desprendimiento y agrietamiento del hormigón: el desprendimiento y agrietamiento del hormigón debido a la carbonatación es significativo, sobre todo en edificios viejos. La porosidad, el hormigón permeable debido a un hormigonado defectuoso y el espesor insuficiente del recubrimiento contribuyen a una rápida carbonatación. Las filtraciones de agua a través de las juntas, penetraciones y grietas empeoran la gravedad del defecto.
- Crecimiento de hongos y algas: esta deterioración biológica afecta comúnmente a placas de techo fabricadas con materiales porosos y a superficies pintadas y otras zonas de retención de humedad. Estos organismos prosperan donde hay gran cantidad de humedad y nutrientes, o en zonas sin luz solar.
- Encharcamientos: la zona del baño es comúnmente afectada debido a falta de previsión del drenaje adecuado para fugas de agua por tuberías defectuosas y a través de juntas.
- Manchas y decoloración de baldosas: en general, las sales solubles contenidas en el cemento o arena para la fijación de las baldosas, seguido de la cristalización de dichas sales, provocan la formación de un residuo blanco sobre la superficie de las baldosas.
- Agrietamiento y despegue de baldosas: las principales causas de agrietamiento son la contracción y la alta porosidad del hormigón, debido a una mezcla defectuosa de la pasta para la fijación de las baldosas.



Defecto	Tipo	%
Fugas de agua en techos y paredes	Penetración	39,60
	Juntas	34,65
	Grietas	13,86
	Pared interna	4,95
	Pared externa	3,96
	Losa	2,97
Defectos de pintura	Ampollas	37,33
	Peladuras	29,33
	Tinción	17,33
	Descamación	9,33
	Erosión	4,00
	Eflorescencias	2,67
Fugas de agua, corrosión y defectos de pintura de una tubería	Fugas-juntas	72,41
	Corrosión	20,69
	Ampollas en la pintura	6,90
Agrietamientos y astillamientos	Astillamiento-losa (debajo de bañeras y duchas)	46,67
	Asrtillamiento-penetración	40,00
	Astillamiento-vigas	13,33
	Agrietamiento-penetración	50,00
	Agrietamiento-losa	37,50
	Agrietamiento-vigas	12,5
Hongos y algas	Crecimiento de hongos-placas de techo	52,38
	Crecimiento de hongos-pintura	33,33
	Crecimiento de algas-pintura	9,52
	Crecimiento de algas-placas de techo	4,76
Encharcamiento	Debajo de bañeras	60,00
	Suelo	40,00

Tabla 3.15. Desglose de defectos. Fuente: elaboración propia en base a Chew y Silva, 2003.

3.5.3.1.1. Factores de mantenimiento y materiales que afectan a la durabilidad en interiores de edificaciones.

A continuación se resumen los factores de mantenimiento y materiales, identificados por los autores Chew y Silva, que afectan a la durabilidad y

mantenibilidad de edificios, centrándose en las zonas húmedas de edificios residenciales (ver tabla 3.16).

ORIGEN	FACTORES SECUNDARIOS
Mantenimiento	Limpieza
	Reparaciones inefectivas
	Programa de mantenimiento deficiente
Materiales	Utilización de tuberías de hierro fundido
	Rendimiento deficiente de placas de techo porosas
	Rendimiento deficiente de las propiedades de la pintura frente a la humedad y al crecimiento de algas y hongos

Tabla 3.16. Factores que afectan a la durabilidad de zonas húmedas asociados al mantenimiento y a los materiales. Fuente: Chew y Silva, 2003 (traducción propia).

3.5.3.2. *Mantenimiento de fachadas.*

La fachada es un elemento clave de un edificio ya que influencia la seguridad, el confort y la estética del mismo. El rendimiento general de la fachada depende de los rendimientos de sus componentes. La base de los principales problemas actuales de las fachadas de los edificios son, según I. Flores-Colen y J. Brito (2010):

- El diseño deficiente de los detalles constructivos
- Una mala elección de los materiales de fachada
- La aplicación inadecuada de dichos materiales
- La no existencia de mantenimiento

3.5.3.2.1. Operaciones de mantenimiento en fachadas y procedimientos urgentes.

Las operaciones de mantenimiento implican diferentes técnicas, como pueden ser limpieza, reparaciones localizadas, reemplazamientos localizados, protección o inspecciones. Los autores I. Flores-Colen y J. Brito (2010) analizan estas operaciones a continuación.

- La limpieza, casi siempre subestimada y frecuentemente abandonada, es la operación más relevante en la prevención de anomalías, principalmente en la

evolución de manchas y la acumulación de otros depósitos sobre la superficie exterior.

- Las inspecciones deben tener su propia metodología y ser sostenidas por técnicas de diagnóstico adecuadas que evalúen el estado de degradación de cada elemento.
- Las reparaciones localizadas y operaciones de reemplazamiento pretenden resolver ciertas anomalías que aparecen en áreas localizadas para prevenirlas de la extensión al resto del revestimiento de la fachada. Estas operaciones deben ser realizadas después de analizar y corregir las causas de la anomalía, para evitar que reaparezcan.

Por último, los procedimientos urgentes incluyen operaciones temporales para minimizar los efectos de situaciones urgentes, como por ejemplo la colocación de andamios para proteger a los usuarios de la caída de revestimientos (Flores-Colen y Brito, 2010).

3.5.4. Modelos de degradación según tipo de mantenimiento

En la siguiente figura, extraída del artículo publicado por los autores I. Flores-Colen y J. Brito (2010), se muestra como las operaciones de mantenimiento afectan al comportamiento de los elementos a lo largo del tiempo, modificando los modelos de degradación, los valores de la vida de servicio, y además, los costes de mantenimiento.

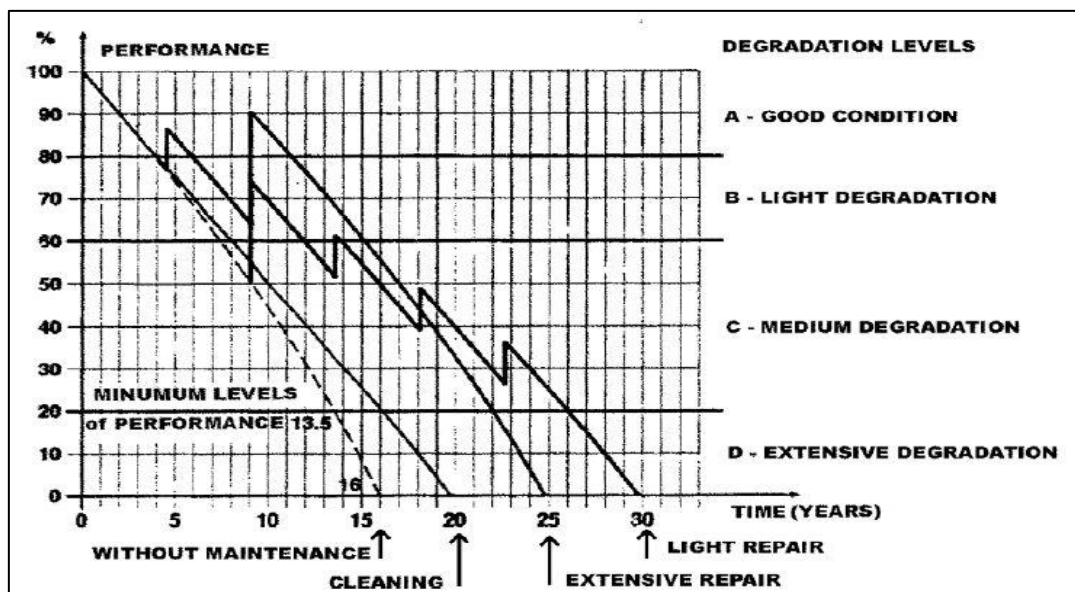


Figura 3.11. Relación entre los estados de degradación y las operaciones de mantenimiento. Fuente: Flores-Colen y Brito, 2010.

Dichos autores (Flores-Colen y Brito, 2010), han estudiado cuatro tipos de modelos de rendimiento-degradación teniendo en cuenta el tipo de mantenimiento aplicado. Los modelos se han simulado para un revestimiento de mortero monocapa:

- Modelo I: modelo de rendimiento-degradación sin mantenimiento. La curva de degradación corresponde a una expresión polinómica de grado 2 o superior. El final de la vida de servicio se alcanza cuando el rendimiento del revestimiento es inferior al 20% del rendimiento inicial (ver figura 3.12).
- Modelo II: modelo de rendimiento-degradación con mantenimiento como por ejemplo operaciones de limpieza periódicas. Dichas operaciones ralentizan la degradación del revestimiento. Realizando este tipo de mantenimiento se alcanza una vida de servicio sobre un 19% más larga que la inicialmente prevista (ver figura 3.12).
- Modelo III: modelo de rendimiento-degradación con mantenimiento como por ejemplo pequeñas operaciones de reparación periódicas. Se incrementa el nivel de rendimiento después de cada operación (mejora el rendimiento aproximadamente un 15% después de cada operación). Realizando este tipo de mantenimiento se alcanza una vida de servicio aproximadamente de tres veces la inicialmente prevista (ver figura 3.13).
- Modelo IV: modelo de rendimiento-degradación con mantenimiento como por ejemplo una extensa operación de reparación. Se incrementa el nivel de rendimiento después de la operación (aproximadamente un 40%). Realizando este tipo de mantenimiento se alcanza una vida de servicio sobre un 63% más larga que la inicialmente prevista (ver figura 3.13).

Al analizar las gráficas se observa como el modelo III de rendimiento-degradación, correspondiente a la ejecución de pequeñas operaciones de reparación periódicas, es el más efectivo y el que logra alargar en mayor proporción la vida de servicio de los componentes, concluyendo que estas pequeñas operaciones de mantenimiento de manera periódica son más efectivas que una gran reparación puntual.

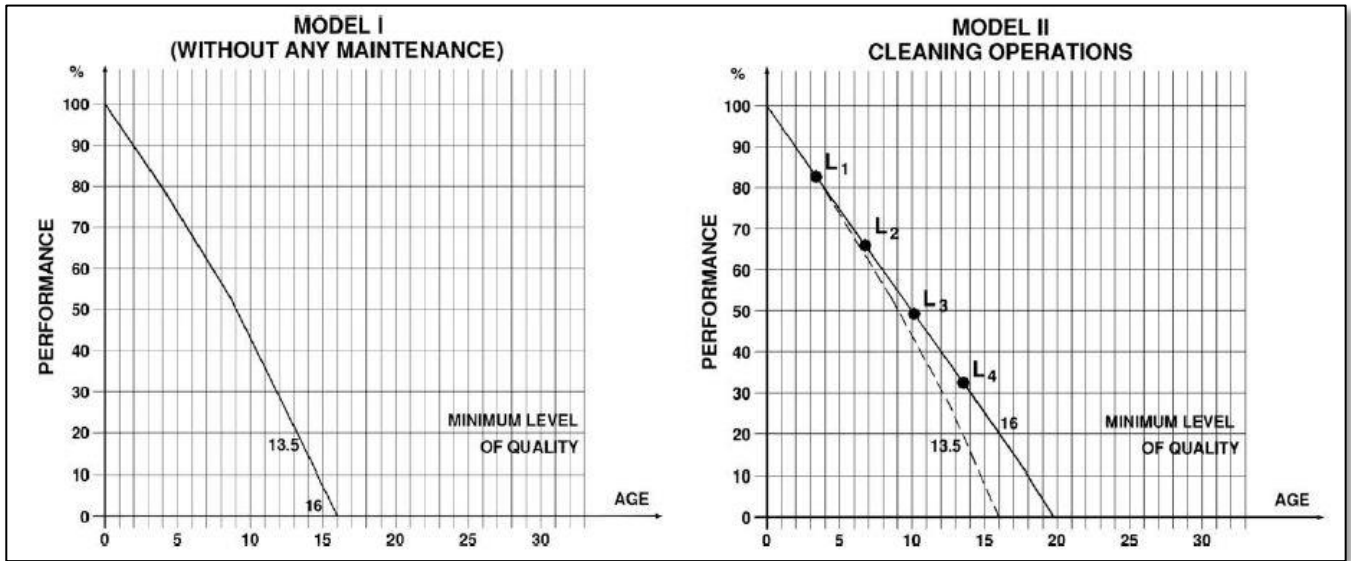


Figura 3.12. Modelos de degradación, para revestimiento de mortero monocapa: sin mantenimiento (izquierda) y con operaciones de limpieza periódicas (derecha). Fuente: Flores-Colen y Brito, 2010.

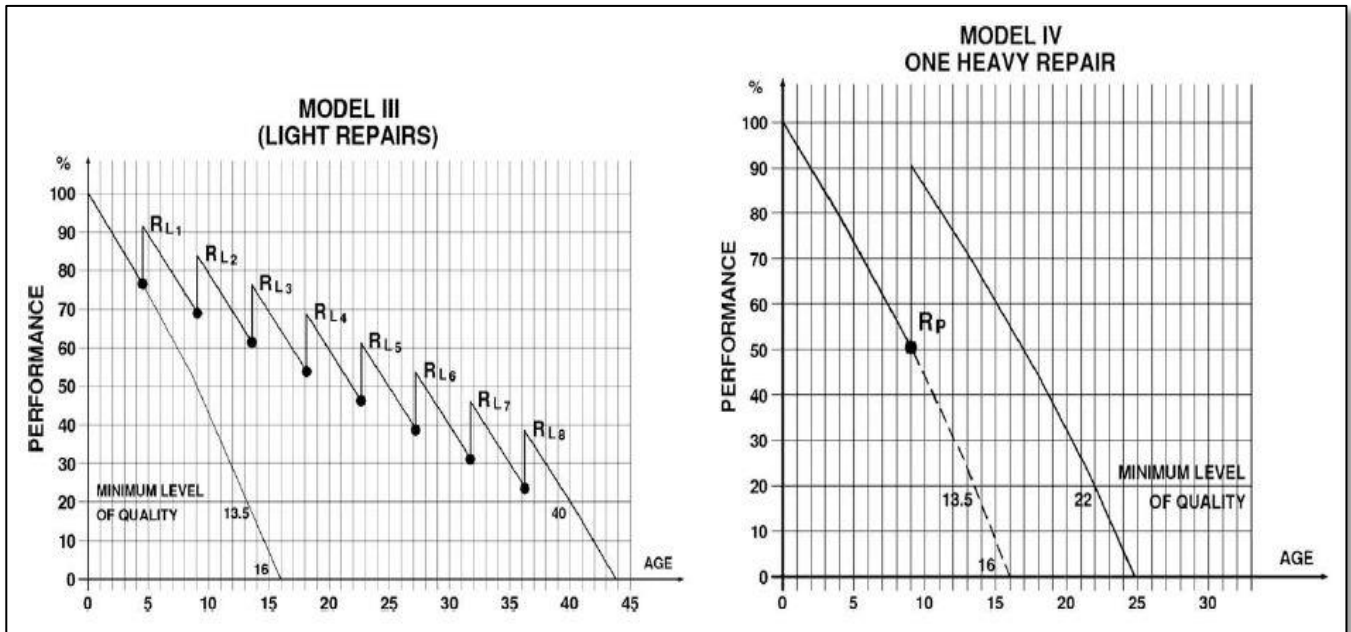


Figura 3.13. Modelos de degradación, para revestimiento de mortero monocapa: con pequeñas operaciones de reparación (izquierda) y con una única operación de reparación importante (derecha). Fuente: Flores-Colen y Brito, 2010.

3.5.5. Técnicas para seleccionar las estrategias de mantenimiento más efectivas.

La gestión, diseño y seguimiento de las estrategias de mantenimiento son procesos complejos que requieren conocimientos de diferentes campos y la consideración de diferentes variables. Para seleccionar las estrategias de mantenimiento más efectivas, los autores I. Flores-Colen y J. Brito (2010) presentan diversas técnicas:

- Sistemas de diagnósticos que proporcionan pasos lógicos para diagnosticar los defectos del edificio de una manera estructurada.
- Modelos más adecuados para ayudar a los diseñadores a seleccionar las acciones de mantenimiento y renovación más factibles y económicas.
- Modelos para identificar la estrategia de mantenimiento más apropiada y con mejor relación efectividad-coste para edificios existentes y otras instalaciones.
- Herramientas integradas de toma de decisiones para ayudar a la evaluación de la degradación de edificios, elección de estrategias óptimas de mantenimiento y renovación, y mejora del rendimiento energético y medioambiental.

3.5.6. Evaluación de la condición de los edificios.

La evaluación de la condición en la cual se encuentran las edificaciones es muy importante para el éxito de cualquier programa de mantenimiento y rehabilitación. En general, las metodologías para la evaluación de la condición de las edificaciones proporcionan una indicación de aquellos componentes del edificio que tienen una condición defectuosa, así como indicadores de rendimiento para el seguimiento del rendimiento del edificio.

Existen varias metodologías, entre ellas la que presentó el autor I. M. Shohet en su artículo (Shohet, 2003), en el cual se desarrolla una metodología para la evaluación de las edificaciones, basada en criterios económicos y de rendimiento. Dicha metodología utiliza dos escalas de calificación: una para los componentes individuales, y otra para la edificación entera (Building Performance Indicator). La primera escala combina criterios con respecto al estado físico, rendimiento, aptitud para el uso y mantenimiento preventivo, de varios componentes del edificio. La segunda escala está compuesta por la media ponderada de los valores dados a los principales sistemas del edificio. El peso de cada sistema deriva de su respectivo valor en el coste del ciclo de vida de cada tipo de edificio. Este método por tanto, permite la determinación de las prioridades basadas en el rendimiento del edificio entero y en el rendimiento de cada sistema del edificio.

3.5.7. Diagnóstico y rehabilitación de estructuras de hormigón armado.

Los autores A. M. Carvajal et al. (2012) realizaron un estudio de dos estructuras de hormigón armado situadas en zonas costeras de dos diferentes países y con diferentes climas. Tras realizar un diagnóstico de la estructura de ambos edificios, en el primero de los edificios se encontraron contaminantes en toda la masa de hormigón, debido a que fueron introducidos en los componentes utilizados para hacer el hormigón. En el otro edificio, los iones cloruro se encontraron únicamente en el recubrimiento de hormigón, hasta una profundidad de 2 cm., por lo que estos iones procedían del ambiente exterior. La corrosión del acero en el edificio 1 ha causado una baja resistencia a flexión, mientras que en el edificio 2 la corrosión del acero se presenta solamente en el acero de refuerzo situado en lugares con un bajo recubrimiento de hormigón, sin que se observen efectos mecánicos. En esta situación, los autores dictaminan que el edificio 1 no puede ser reparado, pero que el edificio 2 sí que se recomienda que sea reparado. Para ello plantean dos opciones: la eliminación del hormigón contaminado por cloruros y su sustitución por la utilización de un mortero especial, o la extracción electroquímica de cloruros y la incorporación de ánodos de sacrificio.

Los autores, por tanto, concluyen que la utilización de componentes contaminados por cloruros y sulfatos en la elaboración del hormigón es más peligroso que la penetración de estos dos contaminantes desde el ambiente exterior para edificios construidos en zonas costeras (Carvajal et al., 2012).

3.6. CONSIDERACIONES SOBRE DURABILIDAD DE LOS ELEMENTOS Y COMPONENTES DE UNA EDIFICACIÓN

3.6.1. Factores que afectan a la durabilidad de los componentes de una edificación.

En la investigación realizada por Mora et al. (2011) se establece que, desde una perspectiva técnica, la vida de servicio de los componentes de los edificios está en función de:

- a) Factores intrínsecos, los cuales están relacionados con el diseño y construcción:
 - Correcto diseño (selección, detalles y compatibilidad de materiales)
 - Calidad de los materiales
 - Calidad de la mano de obra
 - Facilidad de construcción

b) Factores extrínsecos que están relacionados con la explotación:

- Correcta utilización
- Estrategia de mantenimiento
- Exposición
- Etc...

Los autores Chew et al. (2004) establecen que la durabilidad de los materiales varía en función de la zona en la que se encuentren, siendo los materiales situados en la zona industrial y cerca de autopistas y carreteras los menos durables, mientras que en las zonas no urbanas tienen una mayor durabilidad (ver figura 3.14). El deterioro prematuro de las estructuras de hormigón se ha convertido en un gran problema, especialmente en los ambientes urbanos, debido a las condiciones ambientales adversas. La contaminación del aire puede dañar a los materiales, sobre todo debido a la corrosión que causa la lluvia ácida (especialmente debido al SO₂) y el ensuciamiento causado por partículas (especialmente hollín) (Balaras et al., 2005).

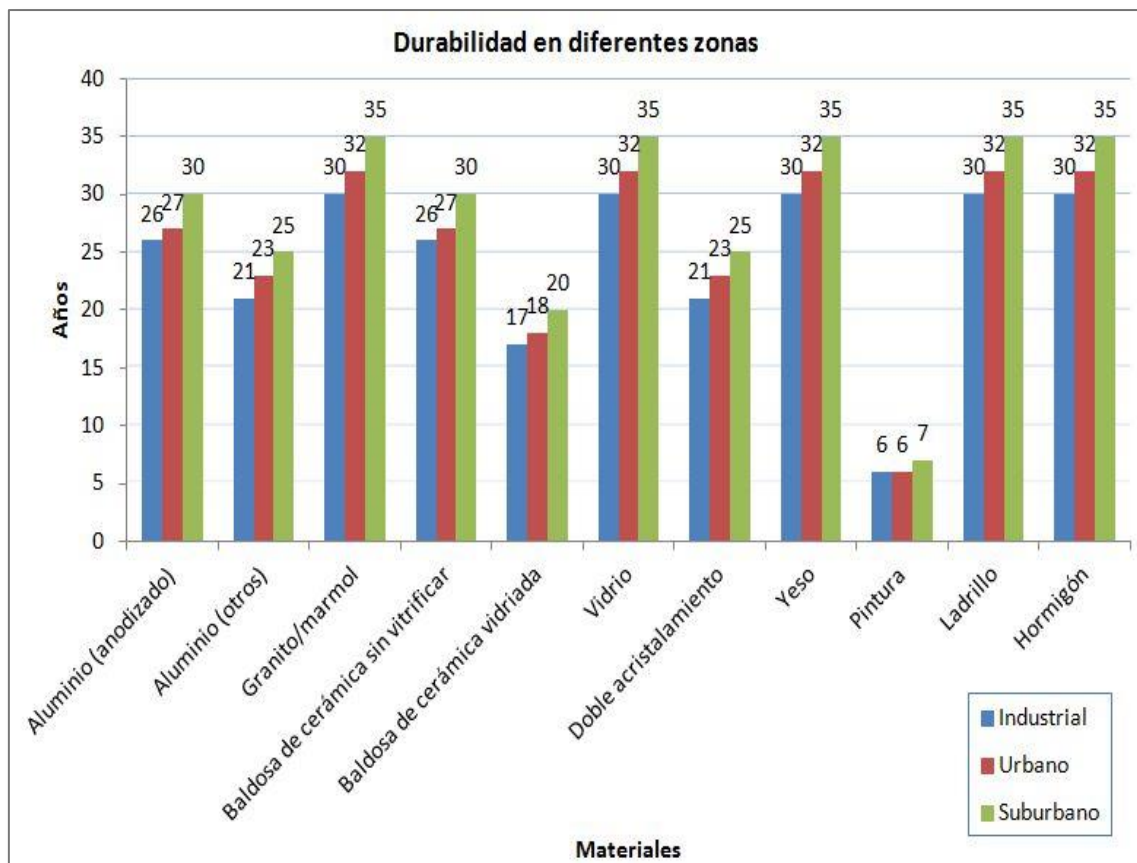


Figura 3.14. Durabilidad de los materiales de fachada en diferentes zonas. Fuente: elaboración propia en base a Chew et al., 2004.

El deterioro de los componentes e instalaciones de una edificación es una consecuencia anticipada del proceso de envejecimiento, sin embargo, existen parámetros que pueden influenciar enormemente en este proceso, como es el caso de la calidad de la construcción y de los materiales, las condiciones ambientales, o la falta de mantenimiento. Los autores C.A. Balaras et al. analizaron en su artículo un total de 349 edificios residenciales situados en siete países distintos de Europa, para recoger los datos sobre la degradación de los elementos de las edificaciones (arquitectónicos e instalaciones) (Balaras et al., 2005). Al analizar los datos, los autores descubrieron un total de 34 factores críticos que pueden influenciar el proceso de deterioro de cada edificio, de los cuales se limitaron a 25 los factores críticos con una influencia significativa importante. La lista incluye factores generales que influyen al edificio en su totalidad, como la localización, condiciones ambientales, contaminación, ocupación del edificio o edad, así como factores más específicos que influyen a elementos del edificio, como los materiales, calidad, mantenimiento y otras características específicas. Los factores que influyen principalmente a la mayoría de los edificios analizados son (Balaras et al., 2005):

- Edad
- Estado del propietario de la edificación (público o privado)
- Calidad de los materiales utilizados, de las instalaciones y de la construcción.

Los autores C.A. Balaras et al. concluyen lo siguiente:

- Los elementos de las edificaciones fueron divididos en dos categorías principales: elementos arquitectónicos (incluyendo todos los componentes constructivos de la edificación) y elementos de la instalación (incluyendo todos los sistemas, redes, equipamientos, servicios e instalaciones electromecánicas). El análisis estadístico de los datos muestra que los elementos de la instalación tienen un mayor porcentaje de condición en buen estado (no necesita reparación o reemplazamiento) que los elementos arquitectónicos. La figura 3.15, extraída del artículo, muestra la descomposición de los porcentajes de los casos analizados en el estudio según sus condiciones para los distintos países. Las condiciones se dividen en cuatro códigos (a, b, c o d), desde la mejor condición posible (código 'a', no requiere ninguna acción) hasta la peor condición (código 'd', deteriorado u obsoleto, necesita ser reemplazado).
- La edad es un factor determinante, no sólo para el proceso de deterioro, sino también para el rendimiento total del edificio, como por ejemplo, el consumo de energía para calefacción del edificio.
- Por último, fueron encontrados un total de 10 factores que influyen la durabilidad de forma importante de varios elementos de las edificaciones. La figura 3.16, extraída del artículo, clasifica estos 10 factores de acuerdo a su importancia relativa para todos los elementos influidos.

3. ESTADO DEL ARTE

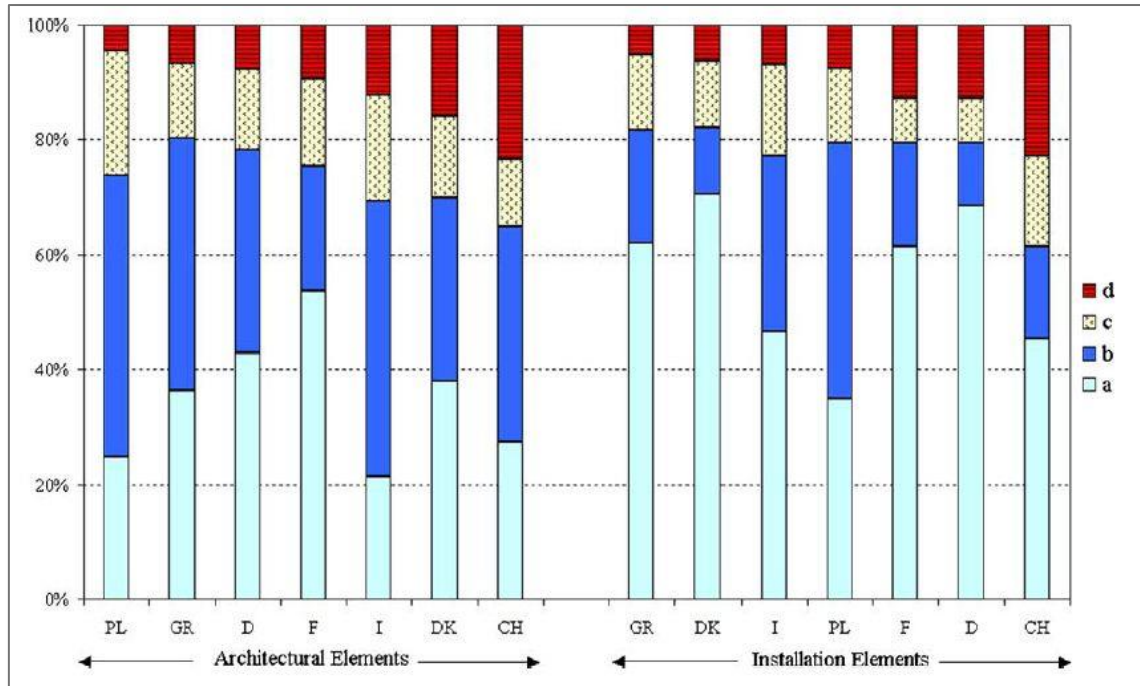


Figura 3.15. Descomposición según los códigos de deterioración para elementos arquitectónicos y de instalaciones en D (Alemania), DK (Dinamarca), F (Francia), GR (Grecia), I (Italia), PL (Polonia), y CH (Suiza). Resultados en orden descendente según código 'd'. Fuente: Balaras et al., 2005.

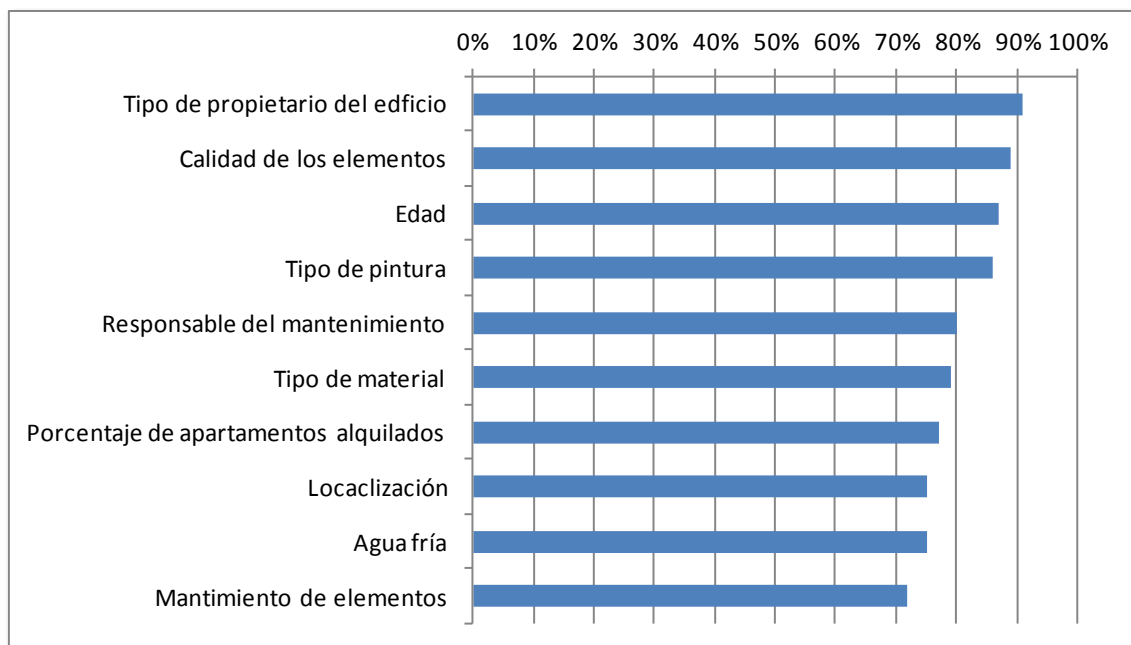


Figura 3.16. Factores que influyen la durabilidad del edificio, ordenados de acuerdo a importancia relativa media para todos los elementos influidos. Fuente: elaboración propia en base a Balaras et al., 2005.

3.6.2. Condiciones de servicio de los componentes de una edificación.

Las condiciones de servicio de los componentes de una edificación pueden ser clasificadas en dos categorías (Shohet y Paciuk, 2006):

- Condiciones de servicio estándar: los componentes son diseñados, construidos y mantenidos adecuadamente. La predicción de la vida de servicio de los componentes bajo estas condiciones a menudo es llamada vida de servicio de referencia. Responden a un patrón lineal de deterioro.
- Condiciones de fallo: los componentes muestran diversos grados de fallo y sus rendimientos se reducen prematuramente. Estas condiciones pueden ser causadas por condiciones ambientales extremas, utilización intensiva, fallos de diseño, fallos de ejecución, fallos de mantenimiento o falta del mismo. Las condiciones de fallo pueden responder a patrones lineales, exponenciales, logarítmicos, o otros patrones de deterioro. El autor J. Moubray clasificó dichos patrones de deterioro en 6 categorías, que se muestran en la siguiente figura 3.17 (Moubray, 1997).

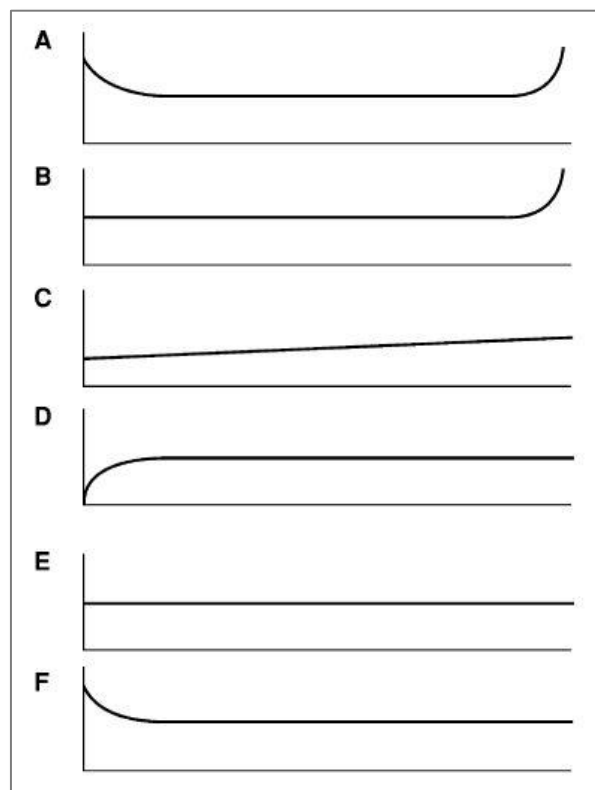


Figura 3.17. Patrones de fallo. Fuente: Moubray, 1997.

Los patrones de deterioro proporcionan métodos cuantitativos para la predicción de la vida de servicio de los componentes de las edificaciones, en diferentes niveles de rendimiento deseado.

3.6.3. Efectos de la humedad y bio-deterioración en materiales y estructuras de edificación.

Existen diversos procesos patológicos que causan el envejecimiento y dañan las edificaciones. Esto es debido en parte al envejecimiento natural de los materiales y a una excesiva humedad. Los procesos de bio-deterioración (como por ejemplo el moho, pudrición o daños por insectos) aparecen cuando la humedad excede la tolerancia de las estructuras.

La humedad puede ser un factor crítico para la durabilidad y utilización de diferentes materiales de construcción. Es el principal factor que controla el crecimiento de moho y el desarrollo de pudrición. Por otra parte, factores abióticos como las radiaciones ultravioleta y la calidad del sustrato (nutrientes, pH, higroscopicidad, permeabilidad al agua) son también significantes para el crecimiento de organismos (Viitanen et al., 2010).

Para que se produzca el desarrollo de moho, se requiere una humedad ambiental mínima comprendida entre RH 80% y 95%, dependiendo de otros factores como la temperatura ambiental, el tiempo de exposición y el tipo y condiciones superficiales de los materiales. Para que se produzca el desarrollo de pudrición, que es la siguiente fase del daño provocado por la humedad, la humedad crítica es superior a RH 95% (Viitanen et al., 2010). El proceso de pudrición conlleva un serio riesgo para la resistencia estructural, dependiendo del contenido de humedad, materiales, temperatura y tiempo. En Europa, las cubiertas, suelos y partes bajas de los muros son las zonas más expuestas a una alta humedad y a un ataque potencial por procesos de bio-deterioración (Viitanen et al., 2010).

Los autores H. Viitanen et al. concluyen que los factores más críticos para el desarrollo de moho y microbios son las condiciones de humedad y temperatura de la superficie del material, así como el tiempo de exposición y el tipo de material. La intensidad del crecimiento del moho e incluso la posibilidad de iniciación de dicho crecimiento depende de los nutrientes y del nivel de pH del material.

Por último los autores H. Viitanen et al. proponen que el modelado del crecimiento de moho y del desarrollo de pudrición basándose en la humedad, temperatura, tiempo de exposición y materiales, puede proporcionar herramientas útiles para la evaluación de la durabilidad de diferentes materiales y estructuras de edificación (Viitanen et al., 2010).

3.6.4. Durabilidad de la envolvente.

Bajo condiciones estándar de servicio de una edificación, y sobre todo bajo condiciones medioambientales extremas, la integridad y durabilidad de la envolvente juega un papel muy importante en el rendimiento de una edificación (Mora et al., 2011).

En el artículo publicado por Mora et al. (2011) se ha elaborado una tabla con los agentes que degradan la envolvente y con los correspondientes fallos mecánicos bajo condiciones de servicio estándar (ver tabla 3.17).

AGENTES DE DEGRADACIÓN DE LA ENVOLVENTE	FALLOS MECÁNICOS
Agua/humedad, temperatura y agua/vapor/presión de agua <ul style="list-style-type: none"> • Sólido: nieve y hielo • Líquido: lluvia, condensaciones, agua superficial y subterránea • Vapor: humedad ambiental 	<ul style="list-style-type: none"> • Electromecánicos: corrosión de componentes metálicos. • Biológicos: degradación de materiales orgánicos. • Químicos: eflorescencias en ladrillos y morteros • Cambios de volumen: expansión y contracción de materiales • Ciclo hielo-deshielo, congelación: materiales porosos
Radiación ultravioleta/temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • Descomposición y evaporación de materiales constituyentes
Salinización en agua y aire	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosión electroquímica de componentes metálicos
Químicos en: suelos, agua del mar, agua subterránea, lluvia ácida, aire contaminado	<ul style="list-style-type: none"> • Ataque por sulfatos • Ataque por ácidos • Carbonatación del hormigón
Biológicos: algas, bacterias, hongos, líquenes, raíces de plantas	<ul style="list-style-type: none"> • Biológico y estructural
Insectos, pájaros, roedores	<ul style="list-style-type: none"> • Materiales = alimentos, agua, hábitat
Mecánicos/estructurales: deslizamientos, movimientos térmicos cíclicos, asientos diferenciales, vibraciones, abrasión, energía cinética	<ul style="list-style-type: none"> • Contención de movimientos y cambios dimensionales • Tensiones localizadas • Fatiga, desgaste, erosión
Compatibilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Química, física

Tabla 3.17. Mecanismos de fallo de la envolvente. Fuente: Mora et al., 2011.

La mayoría de los mecanismos de degradación tienen lugar bajo un intervalo específico de condiciones de calor, aire y humedad. Por lo tanto, controlar dichos procesos e intervalos en las edificaciones es crítico para la durabilidad de la envolvente (Mora et al., 2011).

La selección apropiada de los materiales adecuados a la función del edificio y compatibles con los sistemas adyacentes prolonga la durabilidad y contribuye a minimizar el coste total del ciclo de vida del mantenimiento de un edificio (Chew et al. 2004).

El autor R. Marshall expone en su artículo seis puntos para lograr envolventes durables (Marshall, 2008):

- Desviación: no permitir que el agua penetre a través de la envolvente.
- Drenaje: darle al agua un camino de salida.
- Secado: diseñar mecanismos que permitan el secado o utilizar hormigón tolerante a la humedad.
- Materiales durables: si el material es susceptible al humedecimiento, elegir aquellos que son resistentes al moho y la corrosión.
- Detalles que funcionen: utilizar detalles con antecedentes comprobados de prevención al ingreso del agua, o que permitan la evacuación del agua.
- Documentación: documentar que las envolventes del edificio son construidas de acuerdo a la normativa y a los documentos de construcción.

3.6.4.1. Durabilidad de las fachadas.

La función principal de las fachadas de las edificaciones es proteger a los ocupantes y contenidos de los elementos exteriores. Debido a su situación exterior y su exposición a la intemperie, se requiere que tengan prestaciones combinadas, más exigentes que para otros elementos, en materia de durabilidad, así como de aislamiento, permeabilidad y estética. Las fachadas deben controlar la entrada de luz y no dejar pasar el agua, el frío, el calor y el ruido. También deben resistir la deterioración, el agrietamiento, el desprendimiento y otros varios mecanismos de deterioro. Por otro lado, las fachadas también definen el carácter arquitectónico de un edificio, por lo que deben conservar sus cualidades estéticas durante la vida del edificio. Si una fachada no puede cumplir con todas estas funciones satisfactoriamente, es que ha fallado (K.J. Beasley, 2012).

En el artículo publicado por K.J. Beasley (2012), se analizan los síntomas y condiciones que presentan los fallos más comunes en fachadas. Cualquier fallo en la envolvente (fachadas, cubiertas, ventanas...) del edificio tiene un impacto significativo en la utilidad del edificio. Sin embargo, a diferencia de las cubiertas y ventanas que pueden ser reemplazadas en caso de fallo, se espera que las fachadas perduren y soporten las fuerzas de la naturaleza durante la vida de servicio de una edificación.

En la investigación realizada por Ortega Madrigal (Ortega, 2012) se han analizado cuáles son las lesiones más frecuentes o de mayor importancia en fachadas y se ha estudiado la descripción de cada una de las lesiones, sus síntomas, las posibles causas y los factores que influyen en la aparición y/o avance de la lesión. Para determinar que lesiones había que considerar en fachadas, en la investigación de Ortega Madrigal se realizó una consulta de estudios sobre patologías, así como la utilización del método Delphi. Las lesiones consideradas, y que pueden afectar a la durabilidad según su estudio, son las siguientes:

- Degradación de los materiales
- Desprendimiento de revestimientos discontinuos o elementos sueltos
- Falta de estabilidad geométrica del cerramiento sobre el forjado
- Fisuras y/o desprendimientos en revestimientos continuos
- Fisuras y/o grietas
- Deformaciones
- Humedades de condensación intersticial y/o superficial
- Humedades de filtración a través del paño ciego
- Humedades por falta de estanqueidad en carpinterías
- Oxidación y/o corrosión de elementos metálicos

En cuanto a las fuerzas de la naturaleza que afectan a las fachadas, el autor K.J. Beasley las clasifica en fuerzas externas e internas. Las fuerzas externas incluyen cargas laterales del viento o terremotos, y cargas verticales, del propio peso de la fachada. Las fuerzas internas pueden resultar de la expansión de elementos del muro o por movimientos entre las capas de la fachada o entre la fachada y la estructura. El agua también afecta gravemente a las fachadas, si logra penetrar a través de la fachada puede causar una gran variedad de problemas. Las cargas externas son normalmente conocidas y se puede predecir la respuesta de las fachadas a estas fuerzas. Sin embargo, las fuerzas internas son más complejas y pueden variar de estructura a estructura, o también dependiendo de la configuración de los elementos y componentes (K.J. Beasley, 2012).

Por último, K.J. Beasley obtiene las siguientes conclusiones de su investigación:

- El alcance y método de diagnosis, investigación y subsanación de los fallos en fachadas variarán dependiendo de la naturaleza del fallo, debiendo ser seleccionadas las herramientas y métodos que proporcionen la información más útil y acertada para entender las fuerzas y condiciones que originan el fallo.
- Los fallos en fachada pueden deberse a una gran variedad de circunstancias, sin embargo, ocurren con mayor frecuencia a causa de prácticas constructivas deficientes, o diseños de fachadas con características excesivamente complejas, especialmente por la falta de mecanismos de soporte, fallos en la adaptación a movimientos o falta de sistemas de drenaje efectivos.

3.6.4.2. Durabilidad de los revestimientos.

Los revestimientos externos son la primera y más externa capa que separa los espacios internos de los agentes ambientales y son además especialmente propensos a fallos y defectos, con consecuencias directas en términos de calidad del espacio urbano, confort de los usuarios, y costes de reparación y mantenimiento (Gaspar y Brito, 2008).

3.6.4.2.1. Componentes del revestimiento exterior.

Los autores I.M. Shohet y M. Paciuk estudiaron la vida de servicio de los componentes de revestimiento exterior bajo condiciones estándar y bajo condiciones de fallo.

Bajo condiciones estándar, en su investigación estudiaron cuatro tipos de revestimiento exterior: mortero de cemento, revestimiento sintético, revestimiento cerámico y revestimiento de piedra (Shohet y Paciuk, 2004). Los autores concluyeron que bajo condiciones estándar, el revestimiento de piedra fue el más durable, mientras que el revestimiento de mortero de cemento fue el menos durable. El revestimiento sintético mostró la mejor eficacia al analizar su coste del ciclo de vida, reflejando su durabilidad y bajo coste inicial, mientras que el revestimiento de piedra mostró el mayor coste de ciclo de vida, debido a su alto coste inicial.

Bajo condiciones de fallo, en el artículo publicado por dichos autores (Shohet y Paciuk, 2006) se identifican cuáles son los mecanismos de fallo más típicos en los sistemas de revestimiento exterior, los patrones de deterioro bajo condiciones de fallo, y los coeficientes que limitan la vida de servicio. Para ello estudiaron tres tipos de revestimiento exterior: mortero de cemento, revestimiento sintético y revestimiento cerámico. Los mecanismos de fallo que identificaron fueron: la falta de detalles de diseño (como goterones y juntas de expansión), diseño defectuoso en ambientes marinos, exposición a la contaminación en el aire, y mano de obra deficiente. Los patrones típicos de deterioro, que fueron determinados estadísticamente, corresponden a patrones lineales, exponenciales y logarítmicos. Los autores concluyeron lo siguiente (Shohet y Paciuk, 2006):

- En los revestimientos de mortero de cemento, la falta de goterones es frecuentemente el origen de la degradación. El patrón de degradación resultante es normalmente lineal. Además, otro origen común de una degradación prematura es la utilización de revestimientos porosos en ambientes marinos situados cerca de la costa. En este caso el patrón de degradación corresponde al patrón F de la figura 3.17, en el apartado 3.6.2 de este mismo capítulo.



- En los revestimientos sintéticos, el origen de la degradación prematura es la falta de implementación del revestimiento, generalmente resultante de una deficiente o falta de unión entre la capa de acabado y las capas interiores. El deterioro se ajusta normalmente a patrones lineales y logarítmicos. El impacto de los fallos originados por la contaminación del aire en este tipo de revestimiento es más grave que en los revestimientos de mortero de cemento.
- En los revestimiento cerámicos, la degradación es causada por la utilización de una adhesión o relleno inadecuado. En este caso el patrón de deterioro normalmente se ajusta a un patrón logarítmico de regresión lineal. Este tipo de revestimiento es el más vulnerable a fallos mecánicos, debido a defectos en la ejecución y calidad de los materiales.

En el estudio realizado por Chew et al (2004) se realizó una investigación sobre el comportamiento de los materiales utilizados en fachadas y zonas húmedas en climas tropicales. Los climas tropicales tienen unas condiciones ambientales extremas, en las que se alternan estaciones húmedas y secas en un periodo corto de tiempo, dichas condiciones son más perjudiciales para los materiales, especialmente en fachadas. El estudio concluye que la piedra natural es el material de fachada más durable, mientras que los azulejos cerámicos y homogéneos son los más económicos para zonas húmedas. Se mostró que en los acabados de suelos y paredes de las zonas húmedas, aunque la piedra natural tiene relativamente una mayor durabilidad, es más susceptible ante ciertas condiciones como las sales solubles y la exposición a reacciones químicas, por lo que materiales sintéticos como los azulejos cerámicos y homogéneos tienen una mayor durabilidad en las zonas húmedas.

3.6.4.2.2. Durabilidad de fachadas con revestimiento de mortero.

Los autores P.L. Gaspar y J. Brito proponen en su artículo una metodología para estimar la vida de servicio de fachadas con revestimiento de mortero y cuantificar los factores de durabilidad que pueden afectar a dicha vida de servicio, basándose en la evaluación de 150 casos en Portugal (Gaspar y Brito, 2008). Los resultados de este trabajo de campo muestran que el agrietamiento debido a movimientos diferenciales es el tipo de defecto más común (31% de los casos), seguido de los problemas relacionados con la deposición de suciedad y el flujo de agua superficial a través de la fachada (25%). El agrietamiento debido a la contracción del revestimiento representa el 12% de los defectos identificados, seguido de cerca por manchas y filtraciones (11%). Otros tipos de degradación como eflorescencias, decoloración, hongos o pérdida de adhesión no son tan significantes en los casos estudiados.

En la metodología que proponen, P.L. Gaspar y J. Brito tienen en cuenta los siguientes factores que modifican la durabilidad de las fachadas revestidas con mortero (Gaspar y Brito, 2008):

- Factores asociados a la calidad de los componentes: tipo de material y número y espesor de las capas.
- Factores asociados con el nivel de diseño: geometría del edificio, tipo de soporte, nivel de protección de la fachada con el suelo y nivel de detalle.
- Factores asociados con el nivel de ejecución: supervisión técnica de la construcción, control de calidad y nivel de construcción.
- Factores asociados con las condiciones ambientales: Influencia del ambiente marino, nivel de contaminación, temperatura, humedad, condiciones de exposición al viento y orientación de la fachada.

3.6.4.3. Durabilidad de las cubiertas.

En cuanto a la cubierta, la durabilidad de los componentes y materiales de cubierta está enormemente influenciada por las condiciones del clima y de la contaminación del aire. Las predicciones de vida de servicio para estos materiales son siempre procedimientos muy complejos y que demandan más conocimientos que los métodos normalmente utilizados en el diseño de edificaciones. En el artículo publicado por G. Soronis (1992) se presenta una metodología cuyo objetivo es la elección del material de cubierta que proporcione satisfactoriamente la durabilidad deseada a un bajo coste durante la vida de diseño del edificio.

En la investigación realizada por Ortega Madrigal (Ortega, 2012), al igual que con las fachadas, también se han analizado cuáles son las lesiones más frecuentes o de mayor importancia en cubiertas, y se ha estudiado la descripción de cada una de las lesiones, sus síntomas, las posibles causas y los factores que influyen en la aparición y/o avance de la lesión. Tras la consulta de estudios sobre patologías y la utilización del método Delphi por parte de la investigación de Ortega Madrigal, las lesiones consideradas en su estudio, y que pueden afectar a la durabilidad, son las siguientes:

- Colapso ocasionado por sobrecargas
- Deformaciones del elemento estructural de soporte
- Degradación o desprendimiento de la protección pesada en cubiertas planas
- Desprendimiento de albardillas en cubiertas planas
- Fisuras y/ grietas
- Humedades por condensación
- Humedades por filtración de agua
- Rotura, deterioro y/o desplazamiento de la capa de impermeabilización

3.6.5. Durabilidad de las estructuras.

3.6.5.1. Durabilidad de estructuras de hormigón armado.

El hormigón armado es el material de construcción más ampliamente utilizado en el mundo, debido a su versatilidad y a su coste relativamente bajo. El hormigón armado combina la alta resistencia a compresión que posee el hormigón con las altas propiedades mecánicas del acero, lo que lo convierte en un excelente compuesto para su utilización en elementos estructurales. También es el material elegido para la construcción de estructuras expuestas a condiciones extremas. Cualquier ligera mejora en el diseño, producción, construcción, mantenimiento y rendimiento de materiales del hormigón puede tener un enorme impacto social, económico y medioambiental (Shi et al., 2012).

Tras numerosas investigaciones, entre las que se encuentra la realizada por A.M. Carvajal et al. (2012) o X. Shi et al. (2012), es conocido que la principal causa de degradación de las estructuras de hormigón armado es la corrosión de la armadura de refuerzo, que aparece principalmente frente a la exposición de iones cloruro y/o dióxido de carbono en ambientes agresivos. El proceso de corrosión produce varios efectos combinados, que reducen la vida de servicio de los elementos de hormigón armado. Dichos efectos son (Carvajal et al., 2012):

- Agrietamiento longitudinal del recubrimiento de hormigón debido a la corrosión de productos expansivos.
- Reducción de la sección del acero
- Degradación de la unión entre el acero y el hormigón

En general, esta corrosión es causada por (Carvajal et al., 2012): el ataque destructivo de la penetración de iones cloruro, mediante difusión y/o mediante otros mecanismos de penetración, por la incorporación de contaminantes dentro de la mezcla del hormigón, por la carbonatación del recubrimiento de hormigón, o por una combinación de estos factores.

La corrosión del acero de la armadura por penetración de iones cloruro es el problema más grave que afecta a la durabilidad de las construcciones de hormigón armado, especialmente en la costa y en ambientes marinos, sin embargo, la corrosión provocada por la carbonatación es probablemente el proceso más extendido si consideramos todas las estructuras de hormigón armado (Carvajal et al., 2012).

Nieves et al. (2012) indican varios factores de los cuales depende la durabilidad de las estructuras de hormigón armado, como son:

- Diseño: relación agua/cemento, cuantía de acero, tipo de construcción.
- Materiales utilizados para su fabricación: cemento, adiciones, agua.
- Ejecución: tiempo y condiciones de curado.

- Tipo de ambiente al cual la estructura está expuesta: urbano, marino, industrial, o alguna combinación de dichos ambientes.

Se han realizado diferentes estudios en los que se ha determinado, mediante la utilización de técnicas estadísticas, cuáles son los factores que tienen una influencia significativa en el comportamiento del ratio de corrosión de estructuras de hormigón armado. En la investigación realizada por Nieves et al. (2012) se utilizaron para el proceso experimental probetas con recubrimientos de hormigón de 15, 20 y 25 mm, así como relaciones agua/cemento de 0,45 y 0,65. Los resultados de esta investigación mostraron que los mayores valores de corrosión fueron generalmente observados para los recubrimientos de 15 y 20 mm., así como para las muestras preparadas con una relación de agua/cemento de 0,65. Por tanto, a través del uso de técnicas estadísticas los autores concluyeron que el recubrimiento de hormigón y la relación agua/cemento fueron los factores que tuvieron mayor influencia en el comportamiento del ratio de corrosión.

Los procesos de degradación del hormigón armado se pueden clasificar en función del elemento que modifican (hormigón o armadura). Un ejemplo de clasificación es el presentado en el boletín nº182 del C.E.B. (Comité Euro-Internacional del Hormigón), en el que se dividen los procesos según el tipo de ataque, y estructurándose según afecten al hormigón endurecido o a la armadura (ver tabla 3.18).

DURABILIDAD	PROCESOS	TIPO DE ATAQUE
Hormigón endurecido	Físicos	Fisuración por deformación
		Fisuración por fenómenos físicos
		Heladas
		Erosión
	Químicos	Ácidos
		Sulfatos
		Reactividad alcalina
Biológicos	Formaciones vegetales y bacteriológicas	
Armaduras	Químicos	Carbonatación
		Difusión de cloruros
	Físico-Químicos	Corrosión bajo tensión
		Fragilización por hidrógeno

Tabla 3.18. Procesos de degradación del hormigón armado según C.E.B.

3.6.5.1.1. Durabilidad de estructuras de hormigón armado en ambientes con cloruros.

Las conclusiones obtenidas en el proyecto DURAR “Influencia de la acción del medio ambiente en la durabilidad del hormigón armado: DURACON” muestran que en ambientes marinos, el contenido de cloruro en el medio ambiente es el factor más decisivo cuando se evalúa la probabilidad de corrosión de la armadura (Vera et al., 2009).

En el estudio realizado por X. Shi et al. (2012) se presenta una revisión sobre los avances recientes en el conocimiento referente a la durabilidad del hormigón armado en ambientes con cloruros, incluyendo: el papel de las adiciones minerales en la durabilidad del hormigón, los métodos para la medición del ingreso de cloruros dentro del hormigón, los retos en evaluar la durabilidad del hormigón a partir de su difusividad de cloruros, y el modelado de la vida de servicio del hormigón armado en ambientes con presencia de cloruros.

Dichos autores obtuvieron las siguientes conclusiones a partir de su estudio (Shi et al., 2012):

- El uso de adiciones minerales proporciona beneficios potenciales en la durabilidad y sostenibilidad del hormigón armado. Se ha demostrado que estos materiales, como es el caso de las cenizas volantes, humo de sílice, metacaolín o escorias, cuando se utilizan para reemplazar parcialmente el cemento, generalmente mejoran la resistencia del hormigón a la penetración de cloruros.
- Los agentes corrosivos pueden penetrar en el hormigón a través de la absorción por capilaridad, presión hidrostática o por difusión. Se han desarrollado y utilizado una amplia gama de pruebas para evaluar la resistencia del hormigón a la penetración de iones cloruro. Pero el ingreso de los cloruros dentro del hormigón es un proceso complejo, en que se ven involucrados múltiples mecanismos, por lo que la medición del ingreso de cloruros es todavía un reto.
- También es difícil evaluar la durabilidad del hormigón armado a partir de su coeficiente de difusividad de cloruros. Existe una gran cantidad de variables para determinar los coeficientes de difusión de los cloruros como un indicador de la durabilidad, tanto de estructuras convencionales como no convencionales. La difusividad de los cloruros depende de la estructura porosa del hormigón y sobretodo de los factores que la determinan, tales como los parámetros de diseño de la mezcla y la presencia de fisuras.
- El modelado o simulación es una herramienta útil que proporciona un entendimiento cuantitativo de los procesos clave y de sus interacciones que definen la vida de servicio del hormigón en ambientes con presencia de cloruros. Podrían hacerse más mejoras en los modelos de vida de servicio existentes para que puedan representar o simular mejor el comportamiento en la práctica de las estructuras de hormigón armado. A través del uso de los

modelos de deterioro del hormigón, pueden tomarse decisiones sobre el tiempo adecuado en el que reparar o reemplazar las estructuras existentes, y las estrategias de control de corrosión más efectivas.

3.6.5.1.2. Influencia de las adiciones minerales en la durabilidad del hormigón.

Para lograr la resistencia, durabilidad y sostenibilidad deseada del hormigón, las investigaciones recientes se han centrado en el uso de adiciones minerales y químicas en el hormigón. En general, se ha demostrado que el uso de adiciones minerales, como por ejemplo cenizas volantes, humo de sílice, metacaolín y escorias, mejoran la durabilidad del hormigón. Su uso disminuye la permeabilidad de cloruros, eleva el umbral del contenido crítico de cloruros, incrementa la unión de cloruros y mejora la distribución del tamaño y forma de los poros del hormigón (Shi et al., 2012). A continuación se describen las principales adiciones minerales:

- **Cenizas volantes:** las cenizas volantes son un subproducto de la combustión del carbón en la generación de electricidad. En general, estas adiciones en el hormigón son consideradas una medida efectiva para mitigar la corrosión de las barras de refuerzo del hormigón armado provocada por los cloruros.
- **Cenizas volantes ultra finas:** se obtienen a partir del procesamiento de las cenizas volantes ordinarias para crear partículas finas. Es una adición puzolánica relativamente nueva, por lo que existe un número limitado de estudios sobre los efectos que provoca en la durabilidad del hormigón. Se ha demostrado que puede ser utilizado para ofrecer una mayor actividad puzolánica que las cenizas volantes ordinarias, para reducir la demanda de agua y el contenido de aire del hormigón, y para producir hormigones de alta resistencia y baja porosidad.
- **Humo de sílice:** es un subproducto de la fabricación de las aleaciones de silicio y ferrosilicio. Es conocido que reduce considerablemente la permeabilidad del hormigón, y por tanto reduce en gran medida el riesgo de corrosión de la barra de refuerzo del hormigón armado.
- **Escorias granulares de alto horno:** son un subproducto de la fabricación de hierro y acero. Se ha demostrado que mejoran considerablemente la estructura porosa del hormigón, incrementando su capacidad de unión de cloruros y disminuyendo su coeficiente de difusividad de cloruros.
- **Metacaolín:** es un material obtenido por medio de la calcinación de la arcilla mineral caolinita entre 500-800° en un horno rotatorio. El reemplazamiento de cemento o arena por esta adición puede reducir enormemente la permeabilidad a cloruros, permeabilidad a gases y la capacidad de absorción del hormigón.

3.6.5.2 Durabilidad de estructuras de madera.

Los sistemas estructurales de madera requieren la consideración de varios factores que las estructuras realizadas con otros materiales, como el acero o el hormigón, no tienen que afrontar (Van de Lindt et al., 2009). Para utilizar la madera como un material estructural, ésta debe satisfacer las condiciones que aseguren la durabilidad y el buen rendimiento de la estructura (Mariño et al., 2009).

La madera tiene una resistencia natural considerable a la degradación, por lo que el tiempo no es un factor determinante. Sin embargo, la madera a menudo se degrada debido a factores como la acción de agentes abióticos externos y, principalmente, de agentes bióticos (Mariño et al., 2009). Según los autores Nofal y Kumaran (2011) los materiales de madera sufren diferentes tipos de daños dependiendo de las condiciones ambientales, siendo el agua y una temperatura favorable los elementos esenciales para la iniciación de los daños físicos, biológicos y estructurales en la madera. El daño debido a la acción biológica es el principal mecanismo que afecta a la durabilidad de la madera. Los autores Mariño et al. (2009) analizan en su artículo cuáles son los agentes que pueden atacar a la madera y la forma de prevenirlos:

- Por un lado, establecen que los principales agentes abióticos son: humedad, cambios bruscos del tiempo (temperatura y humedad), exposición directa a la luz solar, y fuego. Estos agentes pueden ser evitados y generalmente no causan daños serios. Por otro lado, establecen que los principales agentes bióticos son: insectos, hongos y una variedad de microorganismos. Estos agentes son el origen de los ataques que reducen el área de la sección de los componentes de madera, disminuyendo las propiedades mecánicas y, por tanto, comprometiendo la integridad estructural del edificio (Mariño et al., 2009).

- Existen dos métodos para prevenir los ataques: uno de ellos, el cual previene del ataque por agentes abióticos, es el tratamiento de la madera, el cual favorece su preservación y ayuda a mantener las propiedades mecánicas de la madera. El otro consiste en evitar las condiciones que favorecen la invasión de la madera por parte de los agentes bióticos, dichas condiciones son principalmente la acción directa del agua y la humedad. La acción directa del agua puede evitarse mediante soluciones constructivas que aseguren que el agua no alcance los componentes de la estructura, mientras que la ventilación puede ayudar a mantener las condiciones adecuadas de temperatura y humedad (Mariño et al., 2009).

Tanto los autores Liso et al. (2006) como Nofal y Kumaran (2011) coinciden en que la vida útil de las estructuras de madera depende fuertemente del impacto climático local. En el artículo publicado por Nofal y Kumaran (2011) se presenta un modelo de evaluación de la durabilidad de los componentes de madera de una edificación basado en funciones de daño biológico. En él concluyen que la humedad y temperatura son las principales causas de de la degradación continua de los

materiales de madera en edificaciones, y que una elevada humedad relativa incrementa el daño en dichos materiales.

Los autores R.A. Mariño et al. (2009) realizaron un estudio cuyo objetivo era determinar cuáles eran los factores que más influenciaban la durabilidad de las estructuras de madera. Para ello, analizaron las siguientes variables en 133 edificaciones: tipo y especie de la madera, vida de servicio de la estructura, características, tratamiento de la madera, condición y sistema estructural, diseño de juntas y condiciones de servicio (uso final del edificio, condiciones ambientales, ventilación). Los autores concluyeron, al analizar los resultados obtenidos, que el uso final del edificio o el tipo y especie de madera utilizada no afectan significativamente a la condición de la estructura. La edad tampoco es un factor determinante en la condición estructural del edificio. Sin embargo, establecen que los tres factores que principalmente afectan a la condición y vida de servicio de la estructura son: el tratamiento de la madera, el diseño apropiado de juntas estructurales, y una adecuada ventilación y limpieza frecuente. En la siguiente figura, extraída del artículo de R.A. Mariño et al., (2009) se muestran las causas principales de los diferentes tipos de degradación (ver figura 3.18).

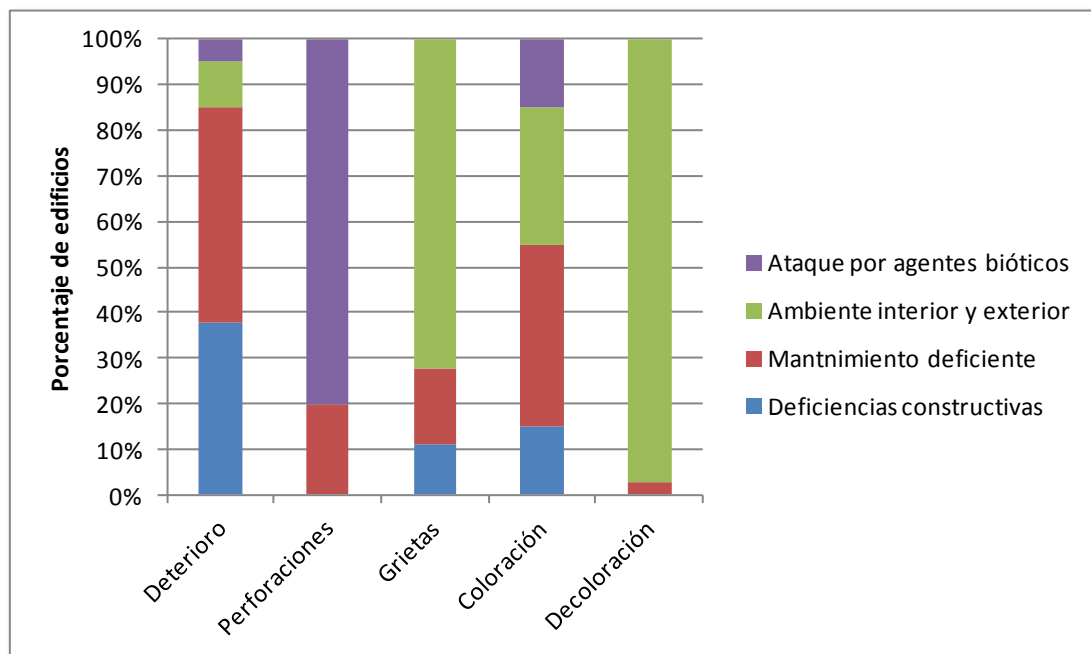


Figura 3.18. Causas de degradación en las estructuras de madera estudiadas. Fuente: elaboración propia en base a Mariño et al., 2009.

Por otro lado, los autores J.W. van de Lindt et al. (2009) hablan de tres factores principales: la filosofía de diseño actual, el valor de las estructuras de madera, y la cultura de la construcción de madera y control de calidad.

En lo que respecta a la filosofía actual de diseño, muchas de las construcciones actuales de madera no están diseñadas, sino que más bien son construcciones convencionales o prescriptivas, utilizando principalmente prácticas constructivas estándar antes que cálculos de ingeniería para cada estructura.

En cuanto al valor de las estructuras de madera, el coste de realizar un diseño basado en el rendimiento es significativamente más elevado que un diseño prescriptivo estándar, por lo que generalmente se prefiere ahorrar costes utilizando diseños estándar, sacrificando así el diseño basado en el rendimiento.

Por último, la cultura de la construcción de edificaciones de madera, particularmente la construcción residencial, no se presta bien al cambio. Además, la mayoría de los procedimientos de construcción no están bien documentados, por lo que los factores del control de calidad hacen imposible indicar qué es satisfactorio y qué no lo es, y podrían no satisfacerse los objetivos de rendimiento.

3.6.5.3. Durabilidad de estructuras de acero ligero.

El acero galvanizado ha sido utilizado de forma exitosa desde hace más de 30 años en estructuras ligeras de acero y otros componentes de edificaciones. El acero galvanizado proporciona un nivel mucho más alto de protección. Además, las ventajas de las estructuras ligeras de acero incluyen la velocidad de construcción in situ, lograda por la prefabricación de paneles y su fácil montaje in situ (Lawson et al., 2010).

Los autores R.M. Lawson et al. (2010) realizaron una revisión de las investigaciones sobre la durabilidad del acero galvanizado conformado en frío utilizado en edificaciones residenciales. En su trabajo establecen que cuando se considera la durabilidad de las secciones de acero galvanizado, es importante tener en cuenta dos factores principales: la duración de la humedad y la condición general atmosférica o exposición. Un tiempo más corto de humedad y una atmósfera más seca mejorará la durabilidad. Por tanto una buena práctica constructiva, aislamiento térmico y una adecuada ventilación asegurará una vida de servicio más larga.

El galvanizado es la forma más común de protección para las secciones de acero conformada en frío. El recubrimiento de zinc proporciona una barrera que previene del oxígeno, humedad y otros contaminantes atmosféricos. Dicho recubrimiento es capaz de proteger el acero más eficazmente que recubrimientos de pintura. La vida de diseño del acero galvanizado comprende la vida del sistema de protección más la del propio acero (Lawson et al., 2010).

3.6.5.4. Durabilidad de estructuras de fábrica.

El conocimiento basado en la experiencia de los últimos siglos ha establecido que los muros de fábrica en climas con una exposición moderada a la lluvia son duraderos y seguros. Los autores T. Kvande y K.R. Liso presentan en su artículo una revisión y análisis de los defectos y fallos relacionados con las estructuras de fábrica (Kvande y Liso, 2009). Los resultados muestran la vulnerabilidad de la fábrica bajo exposición a climas variantes. La acción de la lluvia y la helada son los principales agentes climáticos a considerar para conseguir estructuras de fábrica de alto rendimiento. Las contracciones y movimientos térmicos son los defectos más frecuentes. Además, dos terceras partes de todos los casos analizados comprenden defectos en la ejecución de la barrera contra la lluvia, en el drenaje del agua y en la ejecución de ventanas y antepechos. La principal causa de los defectos es la humedad. El análisis de estos defectos es necesario para desarrollar herramientas, soluciones y medidas preventivas que aseguren un alto rendimiento.

En el artículo de T. Kvande y K.R. Liso también se presentan los requisitos que pueden mejorar el diseño de las estructuras de fábrica, y que se resumen a continuación (Kvande y Liso, 2009):

- Recomendaciones para el posicionamiento de ventanas: el correcto posicionamiento de las ventanas es importante para evitar defectos, las ventanas deberían instalarse paralelas a la capa de aislamiento térmico para evitar puentes térmicos y las consecuentes pérdidas de calor.
- Requisitos para la resistencia a las heladas: la resistencia de la fábrica a las heladas depende de una compleja configuración de las propiedades del material y del impacto climático sobre el material.
- Compatibilidad del mortero de albañilería: el mortero debe ser compatible con el ratio de succión del ladrillo para asegurar el grado más alto posible de estanqueidad, evitar la desintegración de las juntas de mortero, y para asegurar la capacidad de soporte de carga prevista.
- Minimización de contracciones y defectos de movimientos: el rendimiento de las juntas de movimiento es la causa más frecuente de defectos.
- Alto rendimiento de los tapajuntas protectores del agua: los tapajuntas deben de estar siempre diseñados y construidos para que el agua sea dirigida fuera de la estructura, y que el agua o la nieve no atraviese por debajo del tapajuntas con el consecuente riesgo de goteras.
- Recomendaciones del recubrimiento: la elección correcta del revestimiento es siempre un punto crítico, y debe tenerse en cuenta en relación al tipo de fábrica empleada.

3.6.6. Durabilidad de las zonas húmedas en interiores de edificaciones.

Aunque el porcentaje ocupado por las zonas húmedas no suele ser mayor del 10% sobre la superficie total del suelo de una edificación, el coste del mantenimiento anual puede situarse entre el 35% y el 50% del coste de mantenimiento total de una edificación.

El autor M.Y.L. Chew ha realizado un estudio sobre los orígenes de los defectos y el impacto de factores significantes del diseño, materiales, construcción y mantenimiento sobre la aparición de defectos en zonas húmedas de 56 edificios no residenciales (comercial, industrial y escolar) (Chew, 2005). El estudio identifica 14 categorías de defectos principales que afectan el nivel de mantenibilidad de las zonas húmedas. El defecto más frecuente es la aparición de fallos en la masilla de unión de los azulejos (21%), seguido por la decoloración de azulejos (18%) y la desunión de azulejos (17%) (ver figura 3.19). En la figura 3.20 se muestra el alcance o grado de seriedad de los defectos, siendo las fugas de agua a través de las juntas el defecto más grave (53%), seguido por la corrosión de las tuberías (50%) y el desconchado del hormigón (47%). Para cada defecto se analizó el impacto de de factores significantes del diseño, materiales, construcción y mantenimiento, siendo la calidad de la construcción la que desempeña un papel más importante en la mayoría de los defectos (ver figura 3.21). Por tanto, concluyen que el factor más importante para la aparición de defectos es la calidad de la construcción (43%), seguido por el rendimiento del material (37%) (ver figura 3.22).

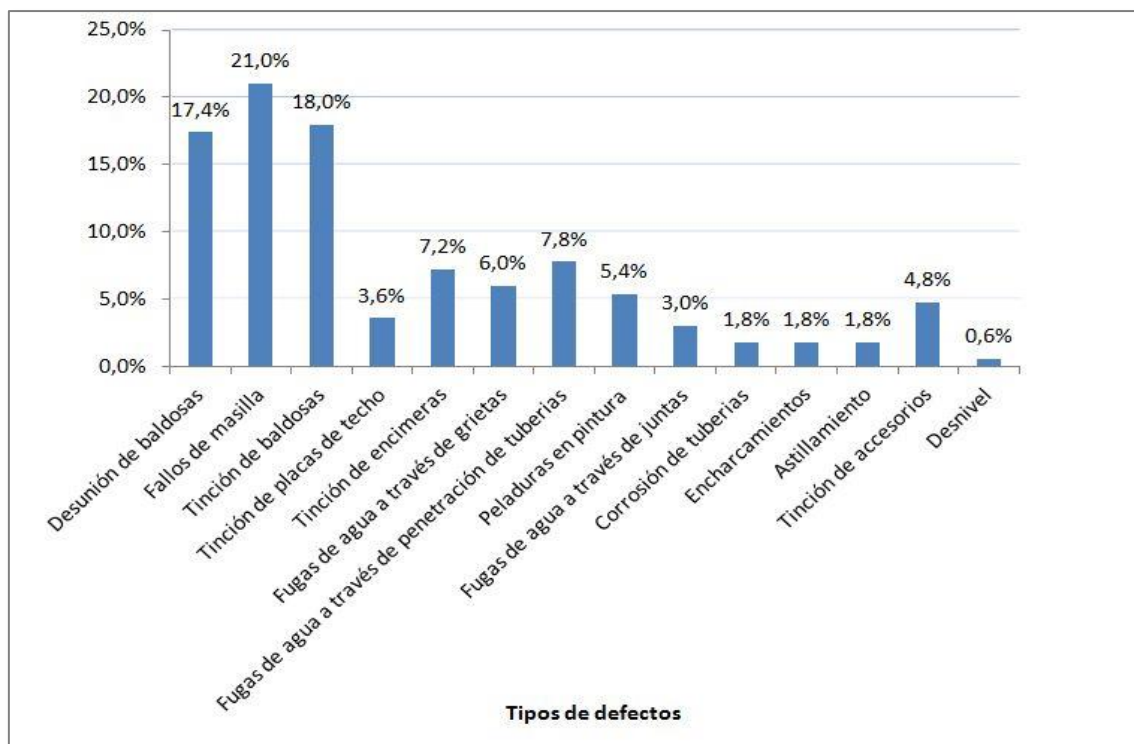


Figura 3.19. Frecuencia de defectos identificada. Fuente: elaboración propia en base a Chew, 2005.

3. ESTADO DEL ARTE

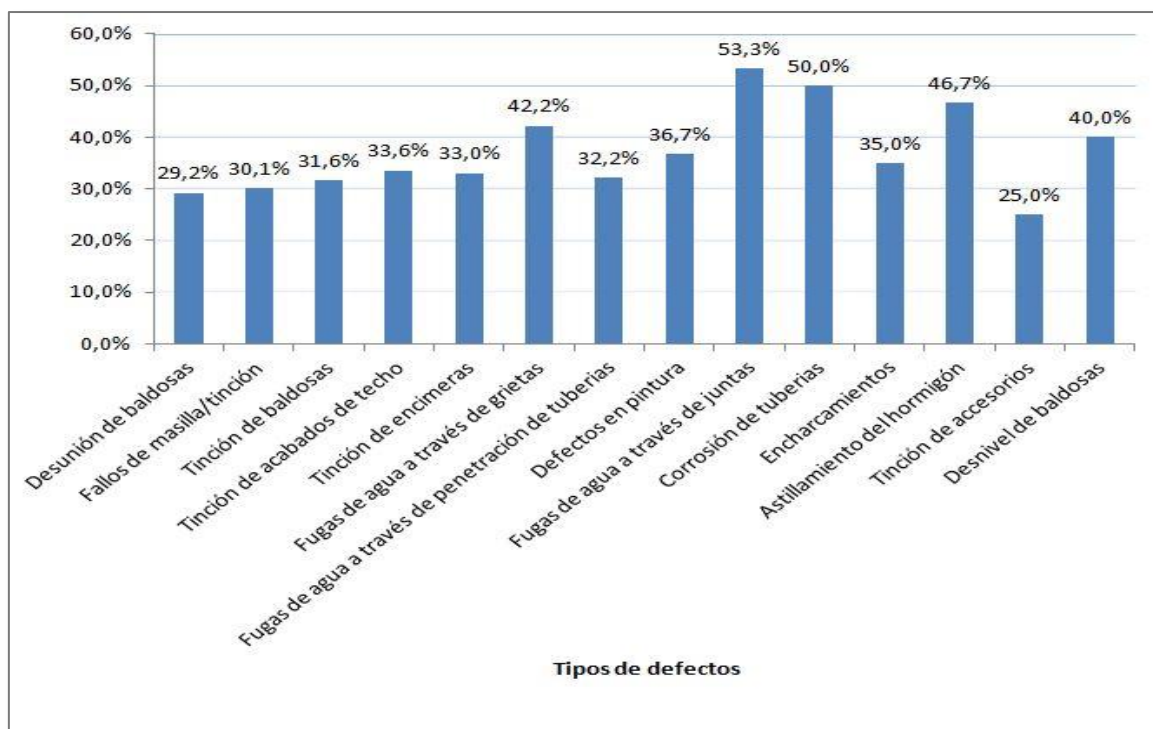


Figura 3.20. Alcance de los defectos. Fuente: elaboración propia en base a Chew, 2005.

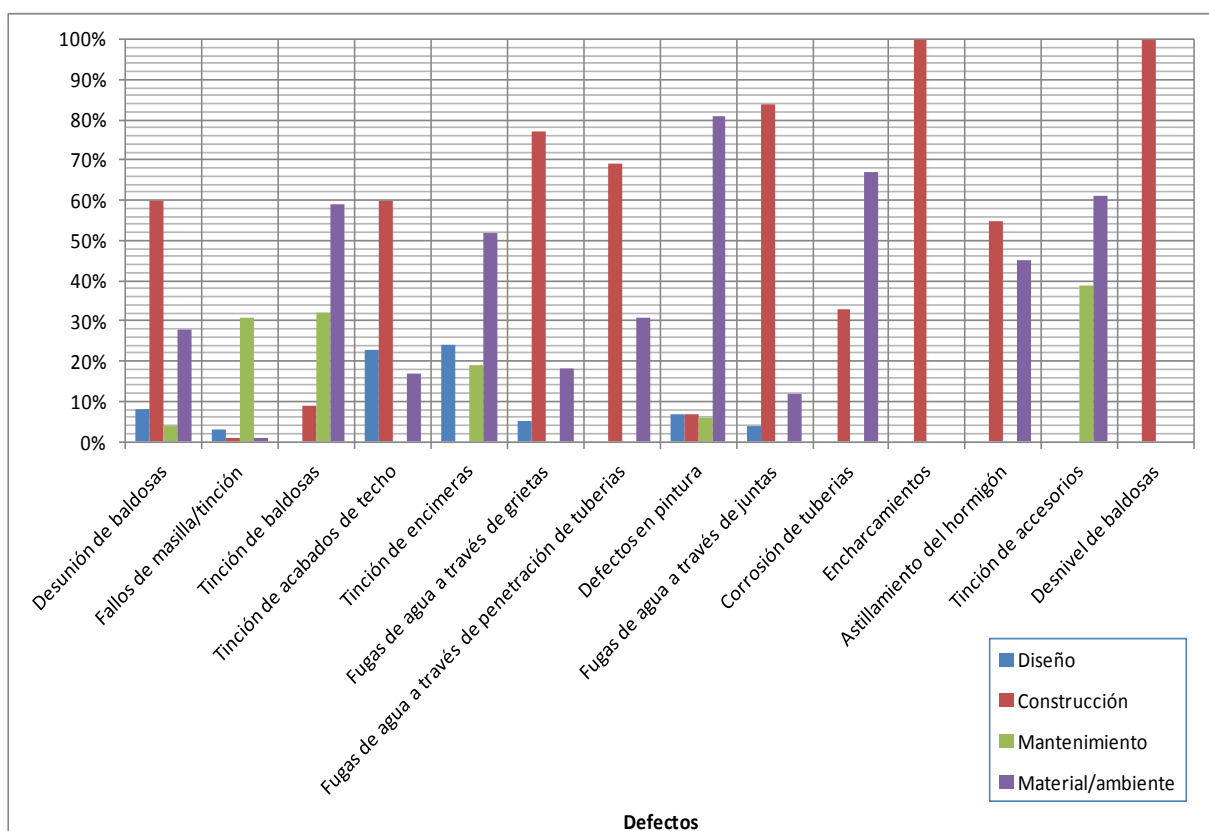


Figura 3.21. Contribución del diseño, construcción, mantenimiento y materiales en los defectos. Fuente: elaboración propia en base a Chew, 2005.

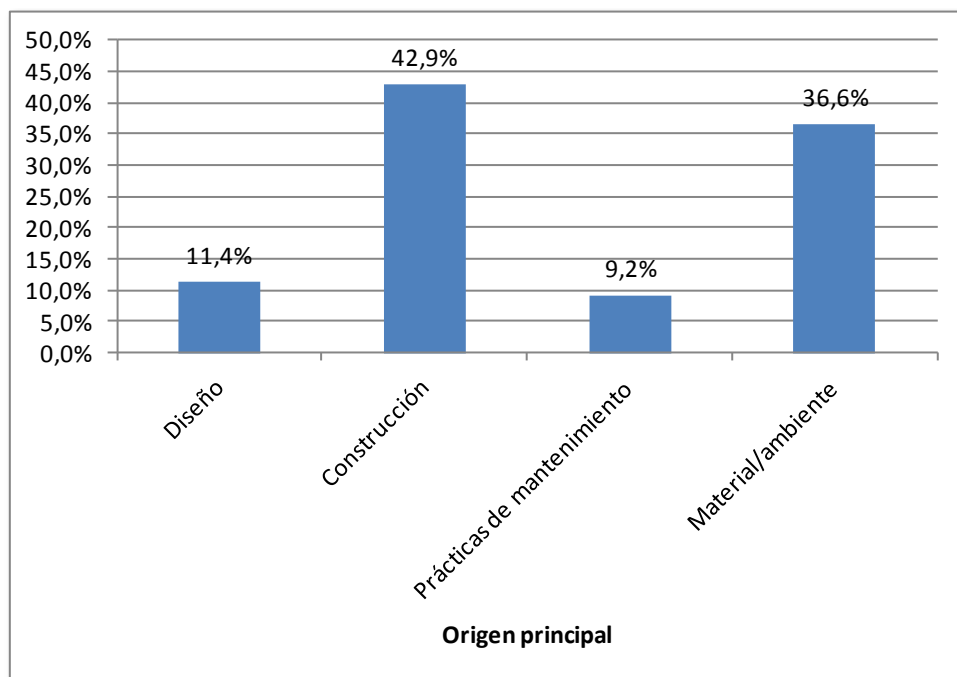


Figura 3.22. Contribución general en la aparición de defectos. Fuente: elaboración propia en base a Chew, 2005.

Causas de los defectos rebeladas por el estudio (Chew, 2005):

- Desunión de azulejos: los resultados mostraron que la calidad de la mano de obra está significativamente correlacionada con la aparición del defecto, seguido por la edad.
- Manchas en los azulejos y accesorios: se observó que el principal factor es el uso.
- Fugas de agua: las causas encontradas son la selección de la impermeabilización, detalle de la impermeabilización, mano de obra, acceso para el adecuado mantenimiento y selección de materiales.
- Corrosión de tuberías: este defecto tiene tres factores similares a la aparición de fugas de agua, como son la selección de la impermeabilización, detalle de la impermeabilización y diseño adecuado.
- Encharcamiento de agua: está asociado por la mano de obra.
- Desconchado del hormigón: las tres causas principales son los detalles de la impermeabilización, acceso para el adecuado mantenimiento y mano de obra.

3.7. RELACIÓN ENTRE LA DURABILIDAD Y SU IMPACTO EN EL MEDIOAMBIENTE

3.7.1. Introducción. El consumo de la industria de la construcción y sus efectos en el medio ambiente.

El cambio climático es una realidad. Según V. Straka (2006) en la última década, varios fenómenos meteorológicos, como huracanes, tornados, tormentas, diluvios y variaciones de temperaturas inusuales, se han incrementado en número y en intensidad a lo largo de todo el mundo. Especialmente en los países desarrollados, la reducción del consumo energético es una de las principales tareas a realizar, la cual logra evitar además el incremento de las emisiones de CO₂. Las emisiones atmosféricas producidas por el uso de la energía originan efectos ambientales adversos como lluvia ácida, destrucción de la capa de ozono o el cambio climático global.

Los autores V. Brinnel et al. (2013) exponen en su artículo que el 37% del consumo anual energético está relacionado con el sector de la construcción, por lo que es un reto primordial para el futuro desarrollar métodos para la mejora significativa de la eficiencia energética en el diseño, construcción y explotación de las edificaciones.

Los edificios afectan fundamentalmente a la vida de las personas y a la salud del planeta. Un edificio construido hoy consumirá energía y recursos para reemplazar sus componentes y para su mantenimiento durante al menos el mismo tiempo que dure su vida útil (Straka, 2006). Por ejemplo, el autor R. Marshall (2008) establece que en Canadá las edificaciones utilizan más de una tercera parte del total de la energía, producen casi una tercera parte del total de emisiones de gases de efecto invernadero, y transforman la tierra que proporciona servicios ecológicos valiosos (Marshall, 2008). Además, desde el punto de vista de la ingeniería, han de proporcionarse métodos para una mejora ecológica de los edificios mediante el incremento de la vida útil (Brinnel et al., 2013). R. Marshall expone que para poder evaluar la sostenibilidad de una edificación, debe de ser evaluada también la durabilidad de su estructura (Marshall, 2008).

Cualquier proyecto de construcción tiene un serio impacto en el medio ambiente. En la fase de construcción, y en la producción y entrega de materiales, se producen demandas de energía, generación de residuos, emisión de gases de efecto invernadero y una alteración del ecosistema donde se va a construir o de donde se extraen los recursos naturales. Durante su vida útil, un edificio demanda continuamente energía para calefacción, refrigeración, iluminación, provisión de agua, y para su mantenimiento. Esta fase es la que requiere mayor cantidad de energía y en la cual se producen más gases de efecto invernadero (Straka, 2006).

Según las investigaciones realizadas por V. Straka (2006), un edificio estándar de oficinas situado en Toronto (Canadá) consume el 89% del total de la energía durante su vida útil de 60 años. Otro 6,5% es consumido por el mantenimiento. En el proceso inicial de construcción se consume menos del 4,5%. Si al final de la vida útil el edificio es demolido, la energía que se consume en este proceso es menos del 0,5%. Estos porcentajes varían dependiendo del clima y del uso del edificio.

3.7.2. Diseño para la construcción sostenible.

Para V. Straka (2006) el factor más importante para minimizar el impacto ambiental de un edificio es el diseño. Algunas de las consideraciones de diseño más importantes son el diseño arquitectónico de la forma del edificio y de la superficie expuesta al medioambiente, ya que influye en la demanda de energía, o la planificación espacial, ya que determina la penetración de luz natural en el interior.

Existen herramientas de diseño, como por ejemplo el diseño por ciclo de vida que permite diseñar con base a etapas definidas y que permite medir, planificar y mitigar los impactos ambientales durante el ciclo de vida de una edificación.

La conclusión que obtiene V. Straka (2006) es que en el proceso de diseño deben tenerse en cuenta factores de: durabilidad, consumo mínimo de energía, y eficiencia energética.

3.7.2.1. Utilización de la información para mejorar la sostenibilidad de edificaciones.

El autor S. Hernández (2011) describe en su investigación cómo la aplicación y utilización de la información de la vida útil en el proceso de diseño va estrechamente ligada a procesos de diseño sostenible, logrando prever y disminuir los impactos ambientales que pueda causar un proyecto de edificación, y ayudando a la sostenibilidad de la industria de la construcción.

El autor T.M. Hakkinen trata en su artículo la premisa de que la edificación sostenible incrementa la necesidad de utilización de la información específica de productos durante los procesos de edificación y mantenimiento de los edificios (Hakkinen, 2007). El diseño para la construcción sostenible y medioambientalmente saludable requiere un nuevo tipo de información que incluya por ejemplo información de la vida de servicio, evaluación del ciclo de vida e información sobre emisiones nocivas o químicas. El diseño para la vida de servicio puede también necesitar información detallada sobre el rendimiento técnico de los productos. La norma ISO TS 21929 define que la construcción sostenible alcanza el rendimiento requerido con el impacto medioambiental menos desfavorable, mientras fomenta las mejoras económicas, sociales y culturales a nivel local, regional y global.

3. ESTADO DEL ARTE

El objetivo del artículo publicado por T.M. Hakkinen es describir y definir la necesidad de información de productos de construcción, su transferencia y utilización en las diferentes fases de un proyecto de edificación y su mantenimiento. El autor concluye que la gestión del ciclo de vida y la mejora de la sostenibilidad de las edificaciones requiere el desarrollo de la información de los productos de edificación y sus procesos de utilización, y que es necesaria su utilización para asegurar la gestión del rendimiento requerido y de los impactos ambientales durante el ciclo de vida de las edificaciones (Hakkinen, 2007).

En la siguiente tabla se muestran las necesidades de información de productos en las diferentes fases del diseño, edificación y mantenimiento (ver tabla 3.19):

	TAREA	INFORMACIÓN NECESARIA
1	Diseño de vida de servicio	Condiciones previas (relativas a montaje, detalles y estructuras, utilización y medioambiente) que son necesarias para estimar la vida de servicio. Alternativamente: la información correspondiente extraída a partir de un programa informático el cual ayuda a calcular el efecto de estos parámetros
2	Diseño para el rendimiento requerido del edificio	Rendimientos técnicos
3	Evaluación del ciclo de vida del edificio y sus partes.	Perfil ambiental, vida de servicio estimada y periodos de renovación de componentes y recubrimientos
4	Estimación de los costes del ciclo de vida	Información de los costes incluyendo costes de mano de obra, vida de servicio estimada y periodos de renovación de componentes y recubrimientos
5	Diseño para condiciones interiores saludables	Emisiones de aire interior, preferiblemente en términos de clasificación
6	Diseño para riesgos ambientales	Información sobre la composición del producto, uso de productos químicos y emisiones a la tierra y al agua durante el uso
7	Diseño del cuidado y mantenimiento y operaciones programadas	Vida de servicio estimada, periodos de renovación de componentes y revestimientos, requerimientos respecto a inspecciones, cuidado y mantenimiento
8	Cuidado y mantenimiento	Sistema específico de agrupado y programado de datos de todas las medidas de cuidado y mantenimiento
9	Reutilización y reciclado de productos o disposición de productos después de la vida de servicio	Guías de fabricantes para reutilización, reciclaje y disposición

Tabla 3.19. Necesidades de información del producto en diferentes tareas de los procesos de edificación y mantenimiento. Fuente: Hakkinen, 2007 (traducción propia).

3.7.3. Influencia de los materiales y componentes en la sostenibilidad de edificaciones.

Los materiales de construcción juegan un papel importante en el desarrollo sostenible por medio de su rendimiento energético y durabilidad, ya que esto determina la demanda energética de los edificios durante su vida útil. El desarrollo de la utilización de materiales y sus combinaciones puede lograr mejoras significantes del medioambiente y la calidad de vida.

Según R. Mora et al. (2011) los nuevos retos para los ingenieros son buscar las formas de minimizar el uso de los recursos naturales y maximizar el uso de los recursos renovables. Dichos autores establecen que los materiales y sistemas se han de seleccionar no sólo porque utilicen recursos no perjudiciales para el medioambiente, sino principalmente porque cumplan con las expectativas de rendimiento durante la vida de servicio.

La durabilidad de un edificio y de sus componentes es importante para la conservación de los recursos naturales y para la disminución de residuos (Straka, 2006). La durabilidad de los componentes determina el periodo de su decadencia y de los ciclos de mantenimiento y renovación, los cuales, debido a su recurrencia, pueden tener efectos relevantes sobre el medioambiente (Costanzo 2006).

3.7.4. Reutilización adaptativa y reutilización de componentes.

La reutilización adaptativa y la reutilización de componentes son procesos que permiten alargar la vida de las edificaciones, respetando al mismo tiempo el medioambiente y la sostenibilidad. La reutilización adaptativa permite que edificios ya construidos puedan ser destinados a otros usos alternativos diferentes del inicial, aprovechando principalmente la estructura. La reutilización de componentes permite que algunos de los componentes pueden ser procesados para su reutilización en otros proyectos o para la creación de otros materiales (Straka, 2006). Ambos procesos reducen el consumo de energía y materiales generado por la construcción, reduciendo a su vez el impacto ambiental que ello genera. Las consideraciones de diseño sobre estos procesos ya han sido desarrolladas en el apartado 3.3.5 de esta investigación.

3.7.5. Sostenibilidad de edificaciones de hormigón.

La sostenibilidad de las edificaciones de hormigón se debe considerar en función de sus beneficios a la sociedad y al impacto medioambiental que genera su construcción. El hormigón es frecuentemente considerado como un material durable debido a su resistencia física y química en varios ambientes y a su estabilidad

dimensional, pero esta presunción no es cierta en todos los ambientes y condiciones de servicio si no se presta especial atención en asegurar el alto nivel de durabilidad. En el artículo publicado por J.R. Mackechnie y M.G. Alexander (2009) se analiza la durabilidad como una forma para mejorar la sostenibilidad del hormigón. Con un conocimiento de la microestructura del hormigón y de los mecanismos potenciales de deterioración, es posible lograr casi cualquier nivel de durabilidad. Los autores concluyen que incrementar la vida de servicio de los edificios a través de la mejora de la durabilidad tiene claras ventajas en términos de optimización de recursos y reducción de residuos, por lo que se mejora la eficiencia. Otras ventajas relacionadas con la mejora de la durabilidad que aumenta la sostenibilidad del hormigón son la mejora del rendimiento estructural y la mejora del entendimiento de los materiales de hormigón, los cuales ayudarán en el desarrollo de nuevas tecnologías (Mackechnie y Alexander, 2009).

Hay una gran variedad de estudios para mejorar la sostenibilidad del hormigón y reducir su huella medioambiental. Una de las propuestas es la utilización de cenizas volantes y otros subproductos industriales como reemplazamiento del cemento Portland en el hormigón. También el hormigón auto-compactante y el hormigón reforzado con fibras son dos tipos de hormigón que proporcionan posibles oportunidades para mejorar la durabilidad y el rendimiento, y por tanto la sostenibilidad (Geiker, 2012). Otro enfoque es la mejora de la durabilidad de las estructuras de hormigón, ya que la durabilidad es una piedra angular para la sostenibilidad (Shi et al., 2012).

4. ANÁLISIS Y EXPLOTACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

4. ANÁLISIS Y EXPLOTACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

En este apartado se han analizado y estudiado los resultados obtenidos tras la realización del estado del arte. Para ello, se han realizado diferentes esquemas y tablas en los que se muestran cuáles son los principales factores que afectan a la durabilidad de las edificaciones, cuáles son las principales causas que generan una baja durabilidad, y cuáles son los factores sobre los que tratan las investigaciones de los principales autores analizados.

En la siguiente figura se muestra un esquema de los principales factores que afectan a la durabilidad identificados tras la realización de estudio del arte, clasificados según la fase del proceso constructivo a la que pertenezcan (diseño, ejecución o mantenimiento), y según afecten directamente a elementos o componentes de la edificación de una manera global. En este último caso, se han destacado las estructuras de entre los diferentes elementos y componentes de una edificación, debido a su especial importancia, y se han dividido los factores según el tipo de material de la estructura (ver figura 4.1).

Con los principales factores identificados en el esquema anterior (figura 4.1) se ha realizado un diagrama de Ishikawa, también conocido como diagrama causa efecto o de espina de pez, en el cual se pueden observar cuáles son las principales causas que provocan una baja durabilidad en las edificaciones (ver figura 4.2)

A continuación, en la figura 4.3, se ha realizado un esquema en el que se resumen cuáles son las principales ventajas medioambientales que supone la mejora de la durabilidad de las edificaciones.

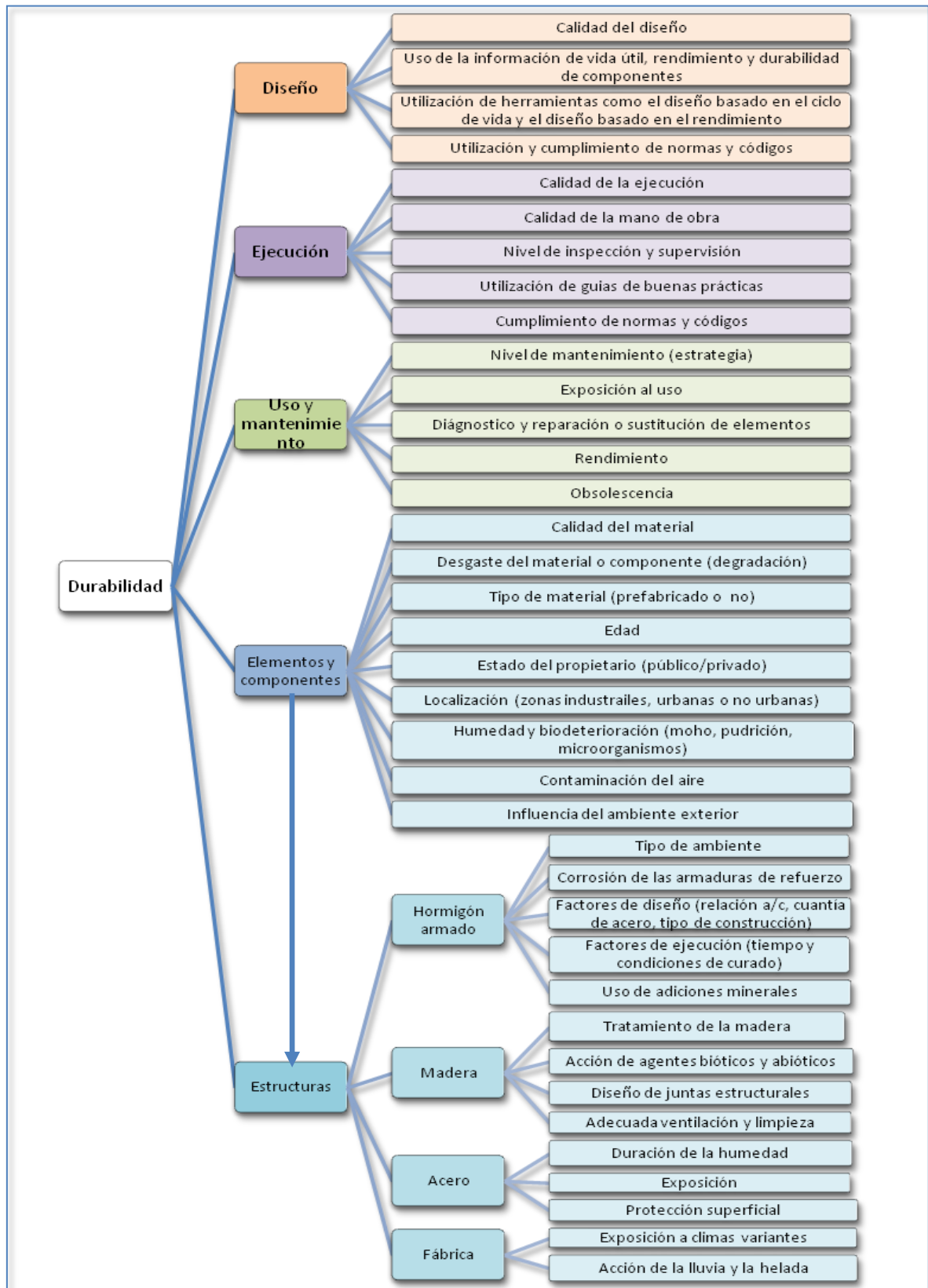


Figura 4.1. Esquema de los principales factores que afectan a la durabilidad de las edificaciones. Fuente: elaboración propia.

4. ANÁLISIS Y EXPLOTACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

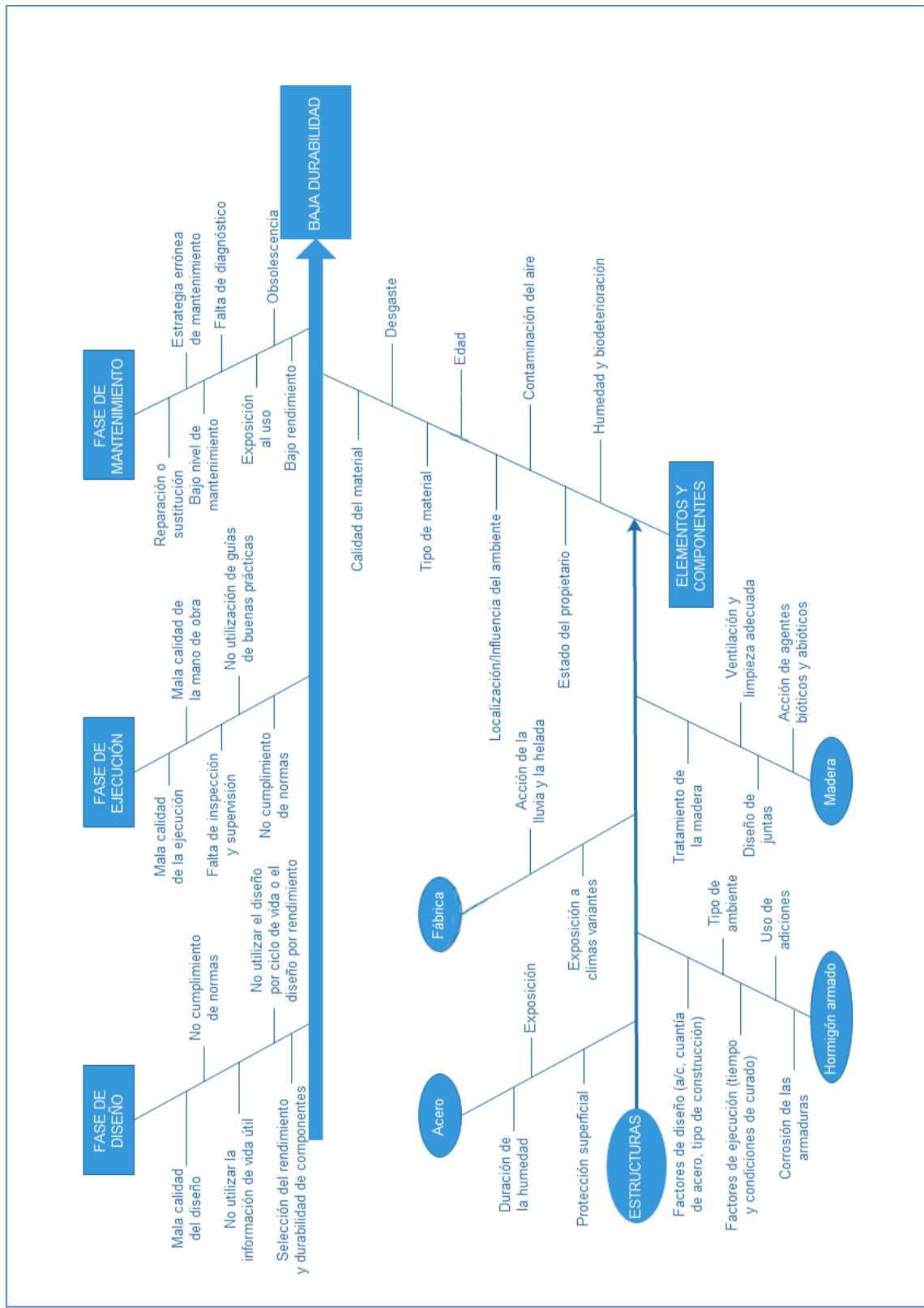


Figura 4.2. Diagrama de Ishikawa con las principales causas que provocan una baja durabilidad. Fuente: elaboración propia.

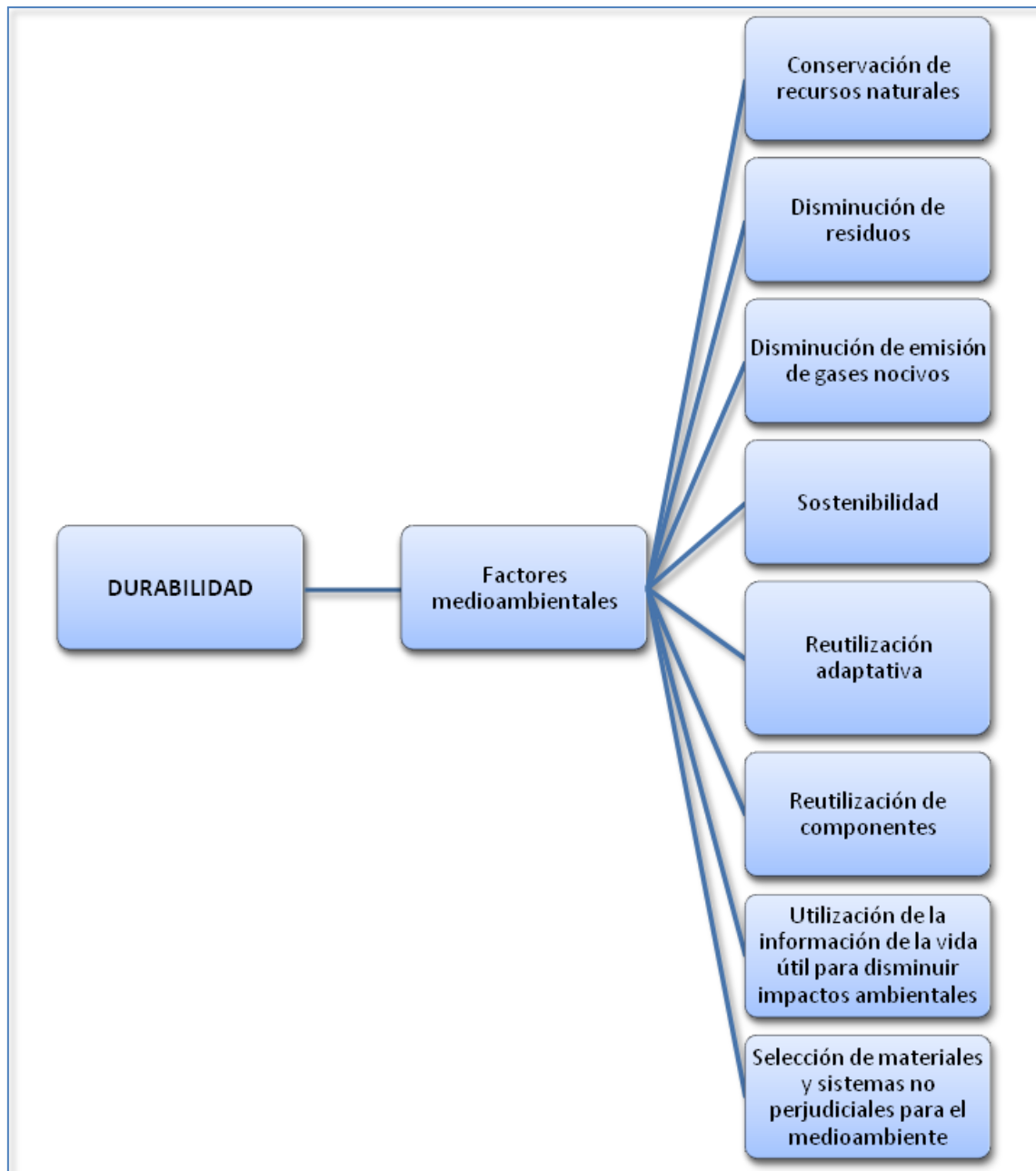


Figura 4.3. Esquema de las principales ventajas medioambientales que supone la mejora de la durabilidad. Fuente: elaboración propia.

4. ANÁLISIS Y EXPLOTACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

En la tabla 4.1 se muestran cuáles son los factores sobre los que tratan las investigaciones de los principales autores. Se han extraído los factores del esquema anterior (figura 4.1) y se han analizado los autores con mayor número de publicaciones o con las publicaciones más relevantes para el estudio. Al analizar la tabla se observa que la calidad del diseño, la calidad de la ejecución, la calidad de los materiales, la influencia del ambiente exterior y el nivel o estrategia de mantenimiento son los factores que más autores han tratado. El análisis también permite identificar cuáles son los factores menos estudiados por los autores y valorar la proposición de futuras líneas de investigación. De entre estos últimos cabe destacar el poco estudio realizado sobre la durabilidad relacionada con la utilización de guías de buenas prácticas y cumplimiento de normas durante la fase de ejecución, y con la utilización de métodos ambientalmente sostenibles como la reutilización adaptativa y la reutilización de componentes.

En la tabla 4.2 se han agrupado los factores clasificándolos según la fase del proceso constructivo al que pertenecen, según afecten directamente a elementos o componentes de la edificación de una manera global y según si están relacionados con el medioambiente. El análisis de esta tabla permite ver más fácilmente de forma general cuáles son los temas que más han tratado en sus investigaciones los principales autores. Este análisis refleja que en general los temas más tratados son los relacionados con la durabilidad en la fase de diseño y mantenimiento, y la durabilidad de los elementos y componentes, mientras que el menos tratado es la relación entre la durabilidad y su influencia en el medioambiente.

4. ANÁLISIS Y EXPLOTACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

		Shohet, I.M.	Chew, M.Y.L.	Kvande, T.	Liso, K.R.	Soronis, G.	Thue, J.V.	Arditi, D.	De Brito, J.	Flores-Colen, I.	Kumar, D.	Lacasse, M.A.	Paciuk, M.	Rudbeck, C.	Hernández, S.	Straka, V.	Trinius, W. y Sjöström, C.	Geiker, M.R.	Marshall, R.	Carvajal, A.M.	Vitanen, H.	Balaras, C.A.	Lawson, R.M.
Diseño		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Ejecución		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Uso y mantenimiento		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Elementos y componentes	Estructuras	Hormigón armado	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		Madera	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		Acero	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		Fábrica	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Medioambiente		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

Tabla 4.2. Resumen de los factores sobre los que tratan las investigaciones de los principales autores.
Fuente: elaboración propia.

5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

5.1. CONCLUSIONES

En este apartado se establecen las conclusiones obtenidas a través del estado del arte sobre los factores que afectan a la durabilidad de las edificaciones, resumiendo las principales contribuciones y conclusiones de los artículos analizados.

En primer término, es importante ampliar el conocimiento sobre los distintos conceptos relacionados con la durabilidad que han sido utilizados en varios de los artículos analizados. La durabilidad está estrechamente relacionada con la vida útil o periodo de servicio. Cabe destacar, por un lado, el concepto de rendimiento, dentro del cual el factor de la durabilidad es uno de los factores más importantes, ya que el rendimiento disminuye a lo largo del tiempo, hasta alcanzar el rendimiento mínimo requerido que pone fin a la vida de servicio del componente o edificación. Por otro lado, el concepto de obsolescencia y sus diferentes tipos, ya que es una de las principales causas que pone fin a la vida de servicio de las edificaciones.

Al hablar de la durabilidad de una edificación, es necesario considerar una edificación como un conjunto de sistemas en el que cada uno tiene una vida de servicio diferente, debido a que las edificaciones están compuestas por elementos permanentes y elementos reemplazables. Esto se debe tener en cuenta al intentar predecir la vida de servicio de una edificación. Existen numerosas investigaciones en las que se han desarrollado distintos métodos para la determinación de la vida de servicio de una edificación. En la mayoría de ellos, es necesario identificar y cuantificar en primer lugar los factores que afectan a la durabilidad de los elementos y componentes de una edificación. De entre ellos, el más importante es el método de los factores, regulado por la norma ISO 15686, y que considera aspectos como son la calidad del diseño y la construcción, el nivel de mantenimiento, la exposición al uso, el desgaste del material o componente, y la influencia del medioambiente. La exactitud de la predicción de la vida de servicio de los componentes afecta en gran medida a la efectividad y a la calidad de la estrategia de mantenimiento.

Las consideraciones de durabilidad se deben de tener en cuenta y planificar desde un primer momento, es decir, desde la fase de planificación y diseño. Sin embargo, el diseño para la durabilidad no puede asegurarse si no se tienen en cuenta todas las consideraciones a través del ciclo de vida completo de una edificación, desde la planificación, diseño, construcción, explotación, mantenimiento y hasta la demolición.

Respecto a la fase de diseño, se debe tener en cuenta que el diseño es uno de los factores más importantes para prolongar la vida útil de una edificación. La planificación de la vida de servicio tiene como objetivo diseñar edificios que cumplan o

excedan los objetivos identificados en el proyecto y los requisitos de rendimiento. Además, la aplicación y uso de la información de la vida útil, del rendimiento y de la durabilidad de los componentes constructivos en la fase de diseño es de gran utilidad porque a través de su estudio y utilización adecuada se pueden lograr edificios más eficientes en aspectos de durabilidad, mantenimiento, confort, impacto ambiental y rendimiento funcional a través de todo su ciclo de vida.

Existen varias herramientas de diseño en las que se tienen en cuenta aspectos de durabilidad, como es el caso del diseño por ciclo de vida (DCV) y del diseño basado en el rendimiento (Performance-Based Design). El diseño por ciclo de vida es una herramienta que permite diseñar con base a etapas definidas, y que permite medir y planificar el periodo de vida útil y de rendimiento de un edificio y de sus componentes y materiales, durante todo su ciclo de vida, así como mitigar los impactos ambientales. El diseño basado en el rendimiento (Performance-Based Design) permite analizar el diseño y rendimiento de edificios en función de diferentes riesgos que puedan afectar a la durabilidad, comparando los valores de los descriptores de rendimiento con los valores obtenidos de un modelo numérico.

También existen diversas normativas internacionales que tienen en cuenta el factor de la durabilidad durante el proceso de diseño de edificaciones. El objetivo de estas normas es exponer un procedimiento para el diseño de edificaciones con una vida de servicio específica. La predicción de la vida de servicio y la exigencia para la durabilidad han sido tratadas en normas y códigos de construcción de numerosos países, siendo las más conocidas las de Reino Unido, Japón y Canadá, así como las normas ISO 15686.

En cuanto a la fase de construcción, la durabilidad puede verse perjudicada debido a una ejecución incorrecta, por lo que la ejecución tiene una gran importancia para obtener el rendimiento y la durabilidad de diseño. La calidad de la construcción y mano de obra es un factor clave para la durabilidad, y es necesario realizar una elevada inspección y supervisión.

Además, la tecnología de los materiales prefabricados, sobretodo en el caso del hormigón, es una innovación que puede mejorar la calidad inherente de las construcciones, así como la utilización de guías de buenas prácticas.

En relación a la última fase, la fase de mantenimiento, está estrechamente ligada a la vida útil de una edificación, ya que el mantenimiento adecuado y las reparaciones pueden extender la vida de servicio y controlar el proceso inevitable de deterioro. La selección de las estrategias apropiadas y con mejor relación efectividad-coste pueden minimizar la disminución en el rendimiento de los edificios durante su ciclo de vida completo. Además, para poder realizar una planificación adecuada del mantenimiento, es necesario disponer de información fiable sobre la vida de servicio de los componentes de edificación, porque esto permite identificar el intervalo de tiempo para el mantenimiento y reparación o sustitución de los componentes de las edificaciones.

5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Para gestionar mejor y aumentar la calidad del mantenimiento es fundamental conocer los factores que influyen en la mantenibilidad y la evaluación del nivel de mantenibilidad. La mantenibilidad de las edificaciones debe estar integrada con la gestión de la calidad durante el diseño y la construcción y con el análisis de costes del ciclo de vida.

Las operaciones de mantenimiento afectan al comportamiento de los elementos a lo largo del tiempo, modificando los modelos de degradación y los valores de la vida de servicio. Al analizar los diferentes modelos de degradación en función de las operaciones de mantenimiento realizadas, se concluye que la ejecución de pequeñas operaciones de mantenimiento de forma periódica es más eficaz que la realización de una importante operación de mantenimiento puntual, logrando aumentar la vida de servicio en mayor proporción.

Si analizamos los elementos y componentes que forman parte de una edificación, la vida de servicio de dichos componentes está en función de factores intrínsecos, relacionados con el diseño y construcción, y factores extrínsecos, relacionados con la explotación. Los principales factores que influyen en la durabilidad de los componentes de un edificio son la edad, el estado del propietario (público o privado) y la calidad de los materiales, instalaciones y construcción. La durabilidad de los materiales también varía en función de la zona en la que se encuentren, siendo los materiales situados en zonas industriales y urbanas menos durables que los que se encuentran en zonas no urbanas. Otro factor que afecta a la durabilidad de los componentes de una edificación es la humedad, que puede generar procesos de bio-deterioración, como por ejemplo el moho, la pudrición o daños por microorganismos.

Entre los elementos y componentes de una edificación, la durabilidad es especialmente importante en la envolvente, en la estructura y en las zonas húmedas de interiores.

La integridad y durabilidad de la envolvente juega un papel muy importante en el rendimiento de una edificación, sobretodo bajo condiciones medioambientales extremas. Dentro de la envolvente, se requiere que las fachadas, debido a su situación exterior y su exposición a la intemperie, tengan prestaciones combinadas, más exigentes que para otros elementos, en materia de durabilidad, aislamiento, permeabilidad y estética. Los factores que afectan a la durabilidad de los elementos de las fachadas están asociados a la calidad de los componentes, el nivel de diseño, el nivel de ejecución y las condiciones ambientales. En cuanto a la cubierta, la durabilidad de los componentes y materiales de cubierta está enormemente influenciada por las condiciones del clima y de la contaminación del aire.

Los factores que afectan a la durabilidad de las estructuras varían en función del tipo de material de la estructura.

- La principal causa de degradación de las estructuras de hormigón armado es la corrosión de la armadura de refuerzo, que aparece principalmente frente a la exposición de iones cloruro y/o dióxido de carbono en ambientes agresivos.



La corrosión por penetración de iones cloruro es el problema más grave que afecta a la durabilidad de las construcciones de hormigón armado, especialmente en la costa y en ambientes marinos, sin embargo, la corrosión provocada por la carbonatación es probablemente el proceso más extendido. La durabilidad de las estructuras de hormigón armado dependen de factores de diseño (relación agua/cemento, cuantía de acero, tipo de construcción), materiales utilizados, ejecución (tiempo y condiciones de curado) y tipo de ambiente (urbano, marino, industrial, o alguna combinación). Además, el uso de adiciones minerales, como por ejemplo cenizas volantes, humo de sílice, metacaolín y escorias, mejoran la durabilidad del hormigón.

- Los sistemas estructurales de madera requieren la consideración de varios factores que las estructuras realizadas con otros materiales no tienen que afrontar. La durabilidad de la madera es afectada por factores como la acción de agentes abióticos externos y, principalmente, de agentes bióticos. Los principales factores que afectan a la condición y vida de servicio de la estructura de madera son el tratamiento de la madera, el diseño apropiado de juntas estructurales, y una adecuada ventilación y limpieza frecuente.
- En cuanto a las estructuras de acero, el acero galvanizado proporciona un nivel muy alto de protección, ya que el recubrimiento de zinc proporciona una barrera que previene del oxígeno, humedad y otros contaminantes atmosféricos. La vida de diseño del acero galvanizado está compuesta por la vida del sistema de protección más la del propio acero. Los factores principales que afectan a la durabilidad del acero galvanizado son la duración de la humedad y la condición general atmosférica o exposición.
- Respecto a las estructuras de fábrica, estas estructuras son vulnerables bajo la exposición a climas variantes. Para conseguir estructuras de fábrica de alto rendimiento se debe tener en cuenta principalmente la acción de la lluvia y la helada.

Por último, en relación con la durabilidad y su impacto en el medioambiente, la durabilidad de un edificio y de sus componentes es importante para la conservación de los recursos naturales y para la disminución de residuos. Uno de los factores más importantes para minimizar el impacto ambiental de un edificio es el diseño, en el cual se deben tener en cuenta factores de durabilidad, consumo mínimo de energía, y eficiencia energética. Además, la aplicación y utilización de la información de la vida útil en el proceso de diseño logra prever y disminuir los impactos ambientales que pueda causar un proyecto de edificación, ayudando así a la sostenibilidad de la industria de la construcción. Para mejorar la sostenibilidad de las edificaciones, existen diversas estrategias como la reutilización adaptativa y la reutilización de componentes, la selección de materiales y sistemas que utilicen recursos no perjudiciales para el medioambiente y que cumplan con las expectativas de rendimiento durante la vida de servicio, o la mejora de la durabilidad de las estructuras.

5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

5.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A continuación se presentan algunas futuras líneas de investigación surgidas durante la realización de este estudio, y que podrían ser interesantes para ampliar las investigaciones relacionadas con el tema de estudio:

- Existe gran multitud de métodos que intentan predecir la vida útil de las edificaciones, pero hay una necesidad de que dichos métodos sean lo más precisos posibles, y además sean fáciles de utilizar por parte de los agentes involucrados en el proceso constructivo, de una manera práctica.
- Profundización en el método de los factores (ISO 15686), cuyo principal problema es que no existen suficientes normas o estándares reconocibles para la obtención precisa o exacta de la vida de servicio de referencia de los componentes de una edificación.
- En referencia a la durabilidad del hormigón armado, la medición del ingreso de cloruros y la evaluación de la resistencia del hormigón a la penetración de cloruros son procesos complejos en los que se ven involucrados múltiples mecanismos, y que por tanto requieren una mayor investigación.
- También la utilización de los coeficientes de difusión de cloruros como un indicador de la durabilidad del hormigón armado es un proceso complejo en el que existen una gran cantidad de variables, y que requieren una mayor investigación.
- De entre las principales adiciones minerales que pueden utilizarse en el hormigón armado para mejorar su durabilidad, las cenizas volantes ultra finas son una adición puzolánica relativamente nueva, sobre la que existen un número limitado de estudios y sobre la que se pueden ampliar los estudios para conocer mejor los efectos que provoca en la durabilidad del hormigón.
- De forma generalizada, las estructuras de madera y fábrica presentan menos investigaciones respecto a las estructuras de hormigón armado o acero, en cuanto a durabilidad se refiere.
- También se ha detectado en la investigación del estado del arte que se pueden ampliar los estudios realizados sobre la durabilidad relacionada con la utilización de guías de buenas prácticas y el cumplimiento de normas durante la fase de ejecución
- En lo referente a la sostenibilidad, se pueden ampliar las investigaciones en las que se estudie cómo la durabilidad es uno de los principales factores para un desarrollo sostenible de la construcción, y cómo las prácticas constructivas tienen que dirigirse mediante consideraciones de durabilidad en lugar de resistencia.
- Además, se pueden ampliar los conocimientos sobre procesos que permitan alargar la vida de las edificaciones, respetando al mismo tiempo el medioambiente y la sostenibilidad, como es el caso de la reutilización adaptativa y la reutilización de componentes.

ANEXOS

ANEXOS

ANEXO 1. CONSIDERACIONES SOBRE DURABILIDAD EN LA INSTRUCCIÓN DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL (EHE-08)

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) establece en su artículo 5º (“requisitos”) que para poder garantizar la seguridad de las personas, animales y bienes, así como el bienestar de la sociedad y la protección del medio ambiente, las edificaciones deben ser aptas para su utilización durante todo el período de vida útil para el que se construyen. Para que esto se alcance, la norma define unos requisitos que las estructuras deben cumplir:

- *“Seguridad y funcionalidad estructural, consistente en reducir a límites aceptables el riesgo de que la estructura tenga un comportamiento mecánico inadecuado frente a las acciones e influencias previsibles a las que pueda estar sometidas durante su construcción y uso previsto, considerando la totalidad de su vida útil.*
- *Seguridad en caso de incendio, reduciendo a límites aceptables el riesgo de que los usuarios de las edificaciones sufran daños derivados de un posible incendio accidental.*
- *Higiene, salud y protección del medio ambiente, consistente en reducir a límites aceptables el riesgo de que se provoquen impactos inadecuados sobre el medio ambiente como consecuencia de la ejecución de las obras.”*

Para que estos requisitos se cumplan, es importante definir antes del inicio del proyecto la vida útil nominal que tendrá la edificación. La norma determina que ésta no podrá ser inferior a lo indicado en las correspondientes reglamentaciones específicas o, en su defecto, a los valores de la siguiente tabla:

Tipo de estructura	Vida útil nominal
Estructuras de carácter temporal	Entre 3 y 10 años
Elementos reemplazables que no forman parte de la estructura principal (por ejemplo, barandillas, apoyo de tuberías)	Entre 10 y 25 años
Edificios (o instalaciones) agrícolas o industriales y obras marítimas	Entre 15 y 50 años
Edificios de viviendas u oficinas y estructuras de ingeniería civil (excepto obras marítimas) de repercusión económica media o baja	50 años
Edificios de carácter monumental o de importancia especial	100 años
Puentes y otras estructuras de ingeniería civil de repercusión económica alta	100 años

Tabla A.1.1. Vida útil nominal de los diferentes tipos de estructuras. Fuente: EHE-08.



La norma también determina que cuando una estructura esté constituida por diferentes partes, podrá adoptarse para cada una de las partes diferentes valores de vida útil, siempre en función del tipo y características de la construcción de las mismas.

A.1.1. ESTRATEGIA PARA LA DURABILIDAD ESTABLECIDA POR LA EHE-08

Para poder cumplir con los requisitos anteriores, la norma establece que será necesario seguir una estrategia de durabilidad que considere todos los posibles mecanismos de degradación. Según la EHE-08, esta estrategia deberá incluir como mínimo los siguientes aspectos:

- **Selección de formas estructurales adecuadas.**

Indicaciones de la norma: se deben definir en el proyecto los esquemas, formas y detalles estructurales que permitan conseguir una adecuada durabilidad, evitar el empleo de diseños que sean vulnerables a la acción del agua, reducir al mínimo el contacto directo entre ésta y el hormigón, facilitar la rápida evacuación de agua, evitar las superficies sometidas a salpicaduras o encharcamientos de agua, y prever, siempre que se pueda, el acceso a todos los elementos de la estructura para facilitar la inspección y el mantenimiento durante la fase de servicio.

- **Consecución de una calidad adecuada del hormigón y, en especial, de su capa exterior.**

La norma define el hormigón de calidad adecuada aquel que cumple con las siguientes condiciones:

1. Selección de materias primas adecuadas, según la normativa (Art. 26º al 35º de la EHE-08).
2. Dosificación adecuada, según la normativa (Art. 37.3.1. y 37.3.2. de la EHE-08).
3. Puesta en obra correcta, según la normativa (Art. 71º de la EHE-08).
4. Curado del hormigón, según la normativa (Art. 71.6 de la EHE-08).
5. Resistencia acorde con el comportamiento estructural esperado y con los requisitos de durabilidad.
6. Comportamiento conforme con los requisitos establecidos en la normativa (Art. 37.3.1. de la EHE-08).

- **Adopción de un espesor de recubrimiento adecuado para la protección de las armaduras.**

La norma define como recubrimiento de hormigón a la distancia existente entre la superficie exterior de la armadura (incluyendo cercos y estribos) y la superficie del hormigón más cercana. Así mismo, la norma introduce dos tipos de recubrimiento: el recubrimiento mínimo, que es aquel que debe cumplirse en

cualquier punto de la armadura, y el recubrimiento nominal, el cual se establecerá en el proyecto y cuyo fin es garantizar estos valores mínimos. El recubrimiento nominal se define como:

$$r_{\text{nom}} = r_{\text{min}} + \Delta r$$

donde:

r_{nom} : recubrimiento nominal

r_{min} : recubrimiento mínimo

Δr : Margen de recubrimiento, en función del nivel de control de ejecución, y cuyo valor será:

Elementos prefabricados con control intenso de ejecución	0 mm
Elemento ejecutados <i>in situ</i> con nivel intenso de control de ejecución	5 mm
Resto de los casos	10 mm

- **Control del valor máximo de abertura de fisura.**

Uno de los criterios en los que se basa la necesidad de limitar la abertura de fisura es la durabilidad, junto a consideraciones funcionales y de aspecto. Los valores máximos permitidos por la norma, en función de la clase de exposición ambiental, son los indicados en el art. 5.1.1.2. de la EHE-08.

- **Disposición de protecciones superficiales en el caso de ambientes muy agresivos.**

La norma indica que cuando las medidas normales de protección no se consideran suficientes, se pueden utilizar sistemas adicionales de protección, como los siguientes:

1. Aplicación de revestimientos superficiales con productos específicos para la protección del hormigón (pinturas o revestimientos), conforme con las normas de la serie UNE-EN 1504.
2. Protección de las armaduras mediante revestimientos (por ejemplo, armaduras galvanizadas).
3. Protección catódica de las armaduras, mediante ánodos de sacrificio o por corriente impresa, según UNE-EN 12696.
4. Armaduras de acero inoxidable, según UNE 36067.
5. Aditivos inhibidores de la corrosión.

- **Adopción de medidas de protección de las armaduras frente a la corrosión.**

Indicaciones de la norma: las armaduras deben permanecer exentas de corrosión durante la vida útil de la estructura, se prohíbe poner en contacto a las armaduras con otros metales de muy diferente potencial galvánico, excepto en el caso de sistemas de protección catódica, y se prohíbe emplear materiales componentes que contengan iones despasivantes, como cloruros, sulfuros y sulfatos, en proporciones superiores a las indicadas en la normativa (Art. 27º, 28º, 29º y 30º de la EHE-08). La agresividad del ambiente en relación con la

corrosión de las armaduras se define por las clases generales de exposición, según la normativa (Art. 8.2.2. de la EHE-08). Por último, se deberá cumplir que el contenido total de cloruros al final de la vida útil sea inferior al 0,6% del peso del cemento, en el caso de obras de hormigón armado u hormigón en masa que contenga armaduras para reducir la fisuración, y al 0,3% del peso del cemento, en el caso de hormigón pretensado.

En la siguiente figura se muestra un resumen de la estrategia de durabilidad establecida en la EHE 08 (ver figura A.1.1).

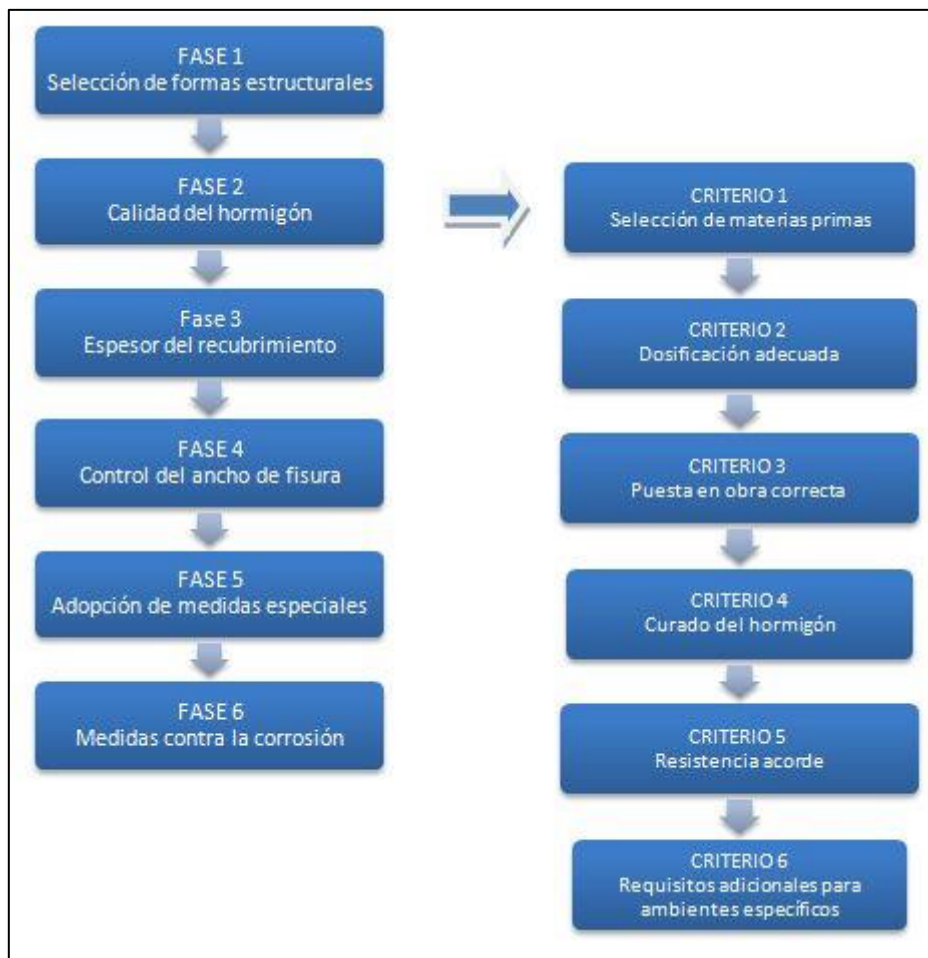


Figura A.1.1. Estrategia de durabilidad establecida en la EHE-08.

A.1.2. CONSIDERACIONES DE DURABILIDAD EN FASE DE PROYECTO SEGÚN LA EHE-08.

La norma establece que en el proyecto de una estructura de hormigón se deben incluir las medidas necesarias para que la estructura alcance la duración de la vida útil acordada, teniendo en cuenta las condiciones de agresividad ambiental. Por tanto, en el proyecto se deberá definir el tipo de ambiente al que estará expuesta la estructura, definiendo para cada elemento el tipo de exposición correspondiente y haciendo referencia a los procesos de corrosión que se pueden presentar. El tipo de ambiente viene definido por:

- Una de las clases generales de exposición, que hace referencia a la corrosión de las armaduras, de acuerdo con la normativa (Art. 8.2.2. de la EHE-08). En general, todo elemento estructural está sometido a una única clase o subclase general de exposición.
- Las clases específicas de exposición, relacionadas con otros procesos de degradación distintos de la corrosión de armaduras, de acuerdo con la normativa (Art. 8.2.3. de la EHE-08). Un elemento puede estar sometido a ninguna, una o varias clases específicas de exposición, sin embargo, no puede estar sometido simultáneamente a más de una de las subclases definidas para cada clase específica de exposición.

La definición del tipo de ambiente para cada conjunto de elementos estructurales repercutirá en:

- La tipificación del hormigón
- La prescripción de recubrimientos
- En algunos casos, el tipo de cemento a emplear (por ejemplo, resistente a sulfatos o agua de mar).

Además, como ya se ha descrito anteriormente en la estrategia de durabilidad propuesta por la norma, en el proyecto deben estar definidas las formas y detalles estructurales que faciliten la evacuación del agua y que sean eficaces frente a los posibles mecanismos de degradación; y si existen elementos con una vida más corta que la de la propia estructura, se debe prever la adopción de medidas en el proyecto que faciliten el mantenimiento y sustitución de dichos elementos durante la fase de uso.

Por último la norma recuerda que, en la protección frente a los agentes físicos y químicos agresivos, las medidas preventivas suelen ser las más eficaces y menos costosas, por lo que la durabilidad es un factor importante que debe tenerse en cuenta desde la fase de proyecto, estudiando la naturaleza e intensidad previsible del medio agresivo y seleccionando las formas estructurales, los materiales, las dosificaciones y los procedimientos de puesta en obra más adecuados para cada caso.

A.1.3. CONSIDERACIÓN DE LA DURABILIDAD EN LA FASE DE EJECUCIÓN

Para conseguir que una estructura sea durable, es fundamental que exista una buena calidad de la ejecución de la obra y, especialmente, del proceso de curado. La norma dispone que se deben cumplir todas las especificaciones relativas a la durabilidad durante la fase de ejecución, según lo indicado en la EHE-08, y que no se permite compensar los efectos derivados por el incumplimiento de alguna de ellas, excepto que se justifique mediante la aplicación del cumplimiento del Estado Límite de Durabilidad establecido en el Anejo 9 de la EHE-08, y que a continuación se describe.

A.1.4. ESTADO LÍMITE DE DURABILIDAD

La durabilidad de las estructuras es uno de los tres estados límite que establece la EHE-08 que hay que cumplir para que las estructuras sean seguras y funcionales y sean capaces de soportar las acciones externas e internas. El Estado Límite de Durabilidad es la principal novedad de este reglamento. Los tres estados límites que se deben comprobar se clasifican en:

- Estados Límite Últimos
- Estados Límite de Servicio
- Estados Límite de Durabilidad

La norma define el Estado Límite de Durabilidad como el fallo producido al no alcanzarse la vida útil de proyecto de la estructura, como consecuencia de que los procesos de degradación del hormigón o de las armaduras impidan que la estructura se comporte de acuerdo a las hipótesis con las que ha sido proyectada.

En la comprobación del Estado Límite de Durabilidad, debe cumplirse que el valor estimado de la vida útil sea mayor que el valor de cálculo:

$$t_L > t_d$$

donde:

t_L : Valor estimado de la vida útil.

t_d : Valor de cálculo de la vida útil.

La vida útil de cálculo se define como el producto de la vida útil de proyecto por un coeficiente de seguridad:

$$t_d = \gamma_t t_g$$

donde:

t_d : vida útil de cálculo.

γ_t : Coeficiente de seguridad de vida útil, para cuyo valor se adoptará $\gamma_t = 1,10$.

t_g : Vida útil de proyecto.

Para la definición y comprobación del estado límite de durabilidad, la EHE-08 contempla un procedimiento semiprobabilístico, el cual comprende las fases que se mencionan a continuación (ver figura):

1. Elección de la vida útil de proyecto.

La vida útil nominal o de proyecto se fija en función del tipo, destino e importancia económica de la estructura. La EHE-08 establece un valor de 50 años para edificios de vivienda u oficinas y estructuras civiles de repercusión económica baja o media, y de 100 años para edificios de carácter monumental, estructuras de importancia especial y repercusión económica alta (ver tabla).

2. Elección del coeficiente de seguridad de vida útil.

3. Identificación de las clases de exposición ambiental a las que puede estar sometida la estructura.

Identificación del proceso de degradación predominante para cada clase. El tipo de exposición se clasifica de acuerdo a los factores agresivos presentes en el medio.

4. Selección del modelo de durabilidad correspondiente a cada proceso de degradación.

Una vez que se ha identificado el proceso de degradación predominante y el mecanismo de transporte mediante el cual se produce el ingreso del agresivo a través del hormigón, se debe modelar la velocidad de avance del deterioro. El Apartado 1.2 del Anejo 9 de la EHE-08 recoge algunos de los modelos aplicables para los procesos de corrosión de las armaduras.

5. Aplicación del modelo y estimación de la vida útil de la estructura.

6. Comprobación del Estado Límite para cada uno de los procesos de degradación identificados relevantes para la durabilidad de la estructura.

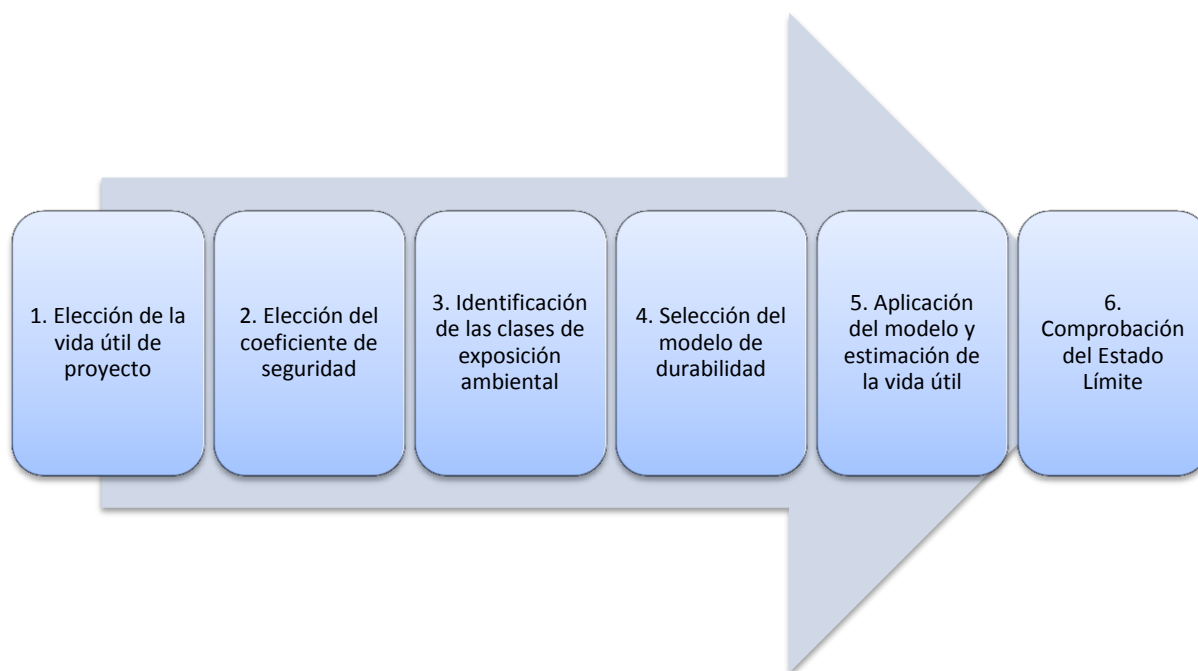


Figura A.1.2. Comprobación del Estado Límite de Durabilidad.

ANEXO 2. CONSIDERACIONES SOBRE DURABILIDAD EN EL CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN (CTE)

El Código Técnico de la Edificación regula las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios, incluidas sus instalaciones, para satisfacer los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad, en desarrollo de lo previsto en la LOE. El CTE se aplica a las edificaciones públicas y privadas cuyos proyectos precisen disponer de la correspondiente licencia o autorización legalmente exigible.

El CTE establece dichas exigencias básicas para cada uno de los requisitos básicos de “seguridad estructural”, “seguridad en caso de incendio”, “seguridad de utilización y accesibilidad”, “higiene, salud y protección del medio ambiente”, “protección contra el ruido” y “ahorro de energía y aislamiento térmico”, establecidos en el artículo 3 de la LOE, y proporciona procedimientos que permiten acreditar su cumplimiento con suficientes garantías técnicas (ver tabla 3.2). Las exigencias básicas deben cumplirse en el proyecto, la construcción, el mantenimiento y la conservación de los edificios y sus instalaciones.

Requisitos básicos	Exigencias básicas
Seguridad estructural (SE)	Resistencia y estabilidad (SE1)
	Aptitud al servicio (SE2)
Seguridad en caso de incendio (SI)	Propagación interior (SI1)
	Propagación exterior (SI2)
	Evacuación de ocupantes (SI3)
	Instalaciones de protección contra incendios (SI4)
	Intervención de bomberos (SI5)
	Resistencia estructural al incendio (SI6)
Seguridad de utilización y accesibilidad (SUA)	Seguridad frente al riesgo de caídas (SUA1)
	Seguridad frente al riesgo de impacto o de atrapamiento (SUA2)
	Seguridad frente al riesgo de aprisionamiento (SUA3)
	Seguridad frente al riesgo causado por iluminación inadecuada (SUA4)
	Seguridad frente al riesgo causado por situaciones con alta ocupación (SUA5)
	Seguridad frente al riesgo de ahogamiento (SUA6)
	Seguridad frente al riesgo causado por vehículos en movimiento (SUA7)
	Seguridad frente al riesgo causado por la acción del rayo (SUA8)
	Accesibilidad (SUA9)
Higiene, salud y protección del medio ambiente (HS)	Protección frente a la humedad (HS1)
	Recogida y evacuación de residuos (HS2)
	Calidad del aire interior (HS3)
	Suministro de agua (HS4)
	Evacuación de aguas (HS5)
Protección frente al ruido (HR)	-
Ahorro de energía (HE)	Limitación de demanda energética (HE1)
	Rendimiento de las instalaciones térmicas (HE2)
	Eficiencia energética de las instalaciones de iluminación (HE3)
	Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria (HE4)
	Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica (HE5)

Tabla A.2.1. Exigencias básicas correspondientes a cada uno de los requisitos básicos. Fuente: CTE.

A.2.1 EXIGENCIAS BÁSICAS DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL

El objetivo del requisito básico "Seguridad estructural" consiste en asegurar que el edificio tiene un comportamiento estructural adecuado frente a las acciones e influencias previsibles a las que pueda estar sometido durante su construcción y uso



previsto. Para satisfacer este objetivo, los edificios se proyectarán, fabricarán, construirán y mantendrán de forma que cumplan las siguientes exigencias básicas establecidas por la norma:

- **Exigencia básica SE 1: Resistencia y estabilidad.** Resistencia y estabilidad adecuadas para evitar riesgos indebidos, manteniéndose frente a las acciones e influencias previsibles durante las fases de construcción y utilización, y se facilite el mantenimiento previsto.
- **Exigencia básica SE 2: Aptitud al servicio.** Será conforme con el uso previsto del edificio, de forma que no se produzcan deformaciones inadmisibles, se limite a un nivel aceptable la probabilidad de un comportamiento dinámico inadmisibles y no se produzcan degradaciones o anomalías inadmisibles.

Este Documento Básico establece los principios y los requisitos relativos a la resistencia mecánica y la estabilidad del edificio, así como la aptitud al servicio, incluyendo su durabilidad. El código Técnico de la Edificación establece en 50 años la duración útil estándar de una edificación, es decir, el período de servicio normal de una estructura de edificación. También indica que si el período de servicio previsto para un proyecto difiere de éste valor, se indicará su duración prevista en las bases de cálculo y en su caso, en el correspondiente anejo de cálculo.

La comprobación estructural de un edificio requiere, según el CTE:

- determinar las situaciones de dimensionado que resulten determinantes;
- establecer las acciones que deben tenerse en cuenta y los modelos adecuados para la estructura;
- realizar el análisis estructural, adoptando métodos de cálculo adecuados a cada problema;
- verificar que, para las situaciones de dimensionado correspondientes, no se sobrepasan los estados límite.

En las verificaciones se tendrán en cuenta los efectos del paso del tiempo (acciones químicas, físicas y biológicas; acciones variables repetidas) que pueden incidir en la capacidad portante o en la aptitud al servicio, en concordancia con el periodo de servicio.

Las situaciones de dimensionado deben englobar todas las condiciones y circunstancias previsibles durante la ejecución y la utilización de la obra, teniendo en cuenta la diferente probabilidad de cada una. Para cada situación de dimensionado, se determinarán las combinaciones de acciones que deban considerarse.

Las situaciones de dimensionado se clasifican en:

- persistentes, que se refieren a las condiciones normales de uso;
- transitorias, que se refieren a unas condiciones aplicables durante un tiempo limitado (no se incluyen las acciones accidentales);

- extraordinarias, que se refieren a unas condiciones excepcionales en las que se puede encontrar, o a las que puede estar expuesto el edificio (acciones accidentales).

El código técnico de la edificación establece dos tipos de estados límite. Se denominan estados límite aquellas situaciones para las que, de ser superadas, puede considerarse que el edificio no cumple alguna de los requisitos estructurales para las que ha sido concebido.

1. Los estados límite últimos: son los que, de ser superados, constituyen un riesgo para las personas, ya sea porque producen una puesta fuera de servicio del edificio o el colapso total o parcial del mismo.
2. Los estados límite de servicio son los que, de ser superados, afectan al confort y al bienestar de los usuarios o de terceras personas, al correcto funcionamiento de del edificio o a la apariencia de la construcción.

Para realizar el análisis estructural, se utilizan modelos en los que intervienen las denominadas variables básicas, que representan cantidades físicas que caracterizan las acciones, influencias ambientales, propiedades de materiales y del terreno, datos geométricos, etc. El CTE clasifica las acciones a considerar en el cálculos por su variación en el tiempo:

- acciones permanentes (G): Son aquellas que actúan en todo instante sobre el edificio con posición constante. Su magnitud puede ser constante (como el peso propio de los elementos constructivos o las acciones y empujes del terreno) o no (como las acciones reológicas o el pretensado), pero con variación despreciable o tendiendo monótonamente hasta un valor límite.
- acciones variables (Q): Son aquellas que pueden actuar o no sobre el edificio, como las debidas al uso o las acciones climáticas.
- acciones accidentales (A): Son aquellas cuya probabilidad de ocurrencia es pequeña pero de gran importancia, como sismo, incendio, impacto o explosión.

Para Estados Límite Último (ELU) el CTE establece la expresión, mediante combinaciones de acciones:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Donde:

$\gamma_{G,j}$ es el coeficiente de seguridad para las acciones permanentes, γ_P es el coeficiente de seguridad para la acción del pretensado, si existe, $\gamma_{Q,1}$ es el coeficiente de seguridad para la acción variable determinante y $\gamma_{Q,i}$ es el coeficiente de seguridad para las acciones variables concomitantes (de acompañamiento a la determinante).

G_k es el valor característico de cada acción permanente, P es el valor característico de la acción del pretensado, Q_k es el valor característico de cada acción variable y $\Psi_{0,i}$ los coeficientes de combinación (simultaneidad) para las acciones variables concomitantes (todos definidos adecuadamente en CTE).

Cuando la duración de una estructura es distinta del valor estándar fijado en 50 años, se ha de seguir una de estas opciones, según el CTE:

- Definir distintos coeficientes de seguridad y según la vida útil estructural.
- Definir distintos coeficientes de combinación $\Psi_{0,i}$ según la vida útil.
- Distinguir distintos valores característicos de las acciones según la vida útil.

A.2.2. EFECTOS DEL TIEMPO (DURABILIDAD Y FATIGA)

Respecto a la durabilidad, el CTE indica que debe asegurarse que la influencia de acciones químicas, físicas o biológicas a las que está sometido el edificio no comprometen su capacidad portante. Para ello, se tendrán en cuenta las acciones de este tipo que puedan actuar simultáneamente con las acciones de tipo mecánico, mediante un método implícito o explícito:

- En el método implícito los riesgos inherentes a las acciones químicas, físicas o biológicas se tienen en cuenta mediante medidas preventivas, distintas al análisis estructural, relacionadas con las características de los materiales, los detalles constructivos, los sistemas de protección o los efectos de las acciones en condiciones de servicio. Estas medidas dependen de las características e importancia del edificio, de sus condiciones de exposición y de los materiales de construcción empleados. En estructuras normales de edificación, la aplicación del este método resulta suficiente.
- En el método explícito, las acciones químicas, físicas o biológicas se incluyen de forma explícita en la verificación de los estados límite últimos y de Servicio. Para ello, dichas acciones se representarán mediante modelos adecuados que permitan describir sus efectos en el comportamiento estructural. Estos modelos dependen de las características y de los materiales de la estructura, así como de su exposición.

Por lo que respecta a la fatiga, la norma dispone que generalmente en edificios no es necesario comprobar el estado límite de fatiga, salvo por lo que respecta a los elementos estructurales internos de los equipos de elevación. La comprobación a fatiga de otros elementos sometidos a acciones variables repetidas procedentes de maquinarias, oleaje, cargas de tráfico y vibraciones producidas por el viento, se hará de acuerdo con los valores y modelos que se establecen de cada acción en el documento respectivo que la regula.

A2.3. ACCIONES EN LA EDIFICACIÓN (SE-AE)

En este Documento Básico se determinan las acciones que se producen sobre los edificios, para verificar el cumplimiento de los requisitos de seguridad estructural (capacidad portante y estabilidad) y aptitud al servicio, establecidos en el DB-SE.

Acciones permanentes

- **Peso propio:** el peso propio a tener en cuenta es el de los elementos estructurales, los cerramientos y elementos separadores, la tabiquería, todo tipo de carpinterías, revestimientos (como pavimentos, guarnecidos, enlucidos, falsos techos), rellenos (como los de tierras) y equipo fijo.
- **Pretensado:** la acción del pretensado se evaluará a partir de lo establecido en la Instrucción EHE.
- **Acciones del terreno:** las acciones derivadas del empuje del terreno, tanto las procedentes de su peso como de otras acciones que actúan sobre él, o las acciones debidas a sus desplazamientos y deformaciones, se evalúan y tratan según establece el DB-SE-C.

Acciones variables

- **Sobrecarga de uso:** la sobrecarga de uso es el peso de todo lo que puede gravitar sobre el edificio por razón de su uso. De acuerdo con el uso que sea fundamental en cada zona del mismo, como valores característicos se adoptarán los de la Tabla 3.1. del Documento Básico SE-AE (CTE).
- **Acciones sobre barandilla y elementos divisorios:** la estructura propia de las barandillas, petos, antepechos o quitamiedos de terrazas, miradores, balcones o escaleras deben resistir una fuerza horizontal, uniformemente distribuida, y cuyo valor característico se obtendrá de la tabla 3.3. del Documento Básico SE-AE (CTE).
- **Viento:** La distribución y el valor de las presiones que ejerce el viento sobre un edificio y las fuerzas resultantes dependen de la forma y de las dimensiones de la construcción, de las características y de la permeabilidad de su superficie, así como de la dirección, de la intensidad y del racheo del viento.
- **Acciones térmicas:** los edificios y sus elementos están sometidos a deformaciones y cambios geométricos debidos a las variaciones de la temperatura ambiente exterior. La magnitud de las mismas depende de las condiciones climáticas del lugar, la orientación y de la exposición del edificio, las características de los materiales constructivos y de los acabados o revestimientos, y del régimen de calefacción y ventilación interior, así como del aislamiento térmico. La disposición de juntas de dilatación puede contribuir a disminuir los efectos de las variaciones de la temperatura.
- **Nieve:** la distribución y la intensidad de la carga de nieve sobre un edificio, o en particular sobre una cubierta, depende del clima del lugar, del tipo de precipitación, del relieve del entorno, de la forma del edificio o de la cubierta, de

los efectos del viento, y de los intercambios térmicos en los paramentos exteriores.

Acciones accidentales

- Sismo: las acciones sísmicas están reguladas en la NSCE, Norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación.
- Incendio: las acciones debidas a la agresión térmica del incendio están definidas en el DB-SI.
- Impacto: las acciones sobre un edificio causadas por un impacto dependen de la masa, de la geometría y de la velocidad del cuerpo impactante, así como de la capacidad de deformación y de amortiguamiento tanto del cuerpo como del elemento contra el que impacta.

A.2.4. SEGURIDAD ESTRUCTURAL - CIMIENTOS (SE-C)

En este Documento Básico aparecen las consideraciones respecto a la seguridad estructural, capacidad portante y aptitud al servicio, de los elementos de cimentación y, en su caso, de contención de todo tipo de edificios, en relación con el terreno. En él se establece que se tendrán en cuenta los efectos que, dependiendo del tiempo, pueden afectar a la capacidad portante o aptitud de servicio de la cimentación.

Según el CTE, se considerarán para el dimensionado de las cimentaciones, los siguientes estados límite:

1. Estados límite últimos:
 - 1.1. pérdida de la capacidad portante del terreno de apoyo de la cimentación por hundimiento, deslizamiento o vuelco, u otros indicados en los capítulos correspondientes;
 - 1.2. pérdida de la estabilidad global del terreno en el entorno próximo a la cimentación;
 - 1.3. pérdida de la capacidad resistente de la cimentación por fallo estructural;
 - 1.4. fallos originados por efectos que dependen del tiempo (durabilidad del material de la cimentación, fatiga del terreno sometido a cargas variables repetidas).
2. Estados límite de servicio:
 - 2.1. los movimientos excesivos de la cimentación que puedan inducir esfuerzos y deformaciones anormales en el resto de la estructura que se apoya en ellos, y que aunque no lleguen a romperla afecten a la apariencia de la obra, al confort de los usuarios, o al funcionamiento de equipos e instalaciones;
 - 2.2. las vibraciones que al transmitirse a la estructura pueden producir falta de confort en las personas o reducir su eficacia funcional;

- 2.3. los daños o el deterioro que pueden afectar negativamente a la apariencia, a la durabilidad o a la funcionalidad de la obra.

A.2.5. SEGURIDAD ESTRUCTURAL - ACERO (SE-A)

En este Documento Básico aparecen las consideraciones respecto a la seguridad estructural de los elementos metálicos realizados con acero en edificación. En él se establece que ha de prevenirse la corrosión del acero mediante una estrategia global que considere en forma jerárquica al edificio en su conjunto (situación, uso, etc.), la estructura (exposición, ventilación, etc.), los elementos (materiales, tipos de sección, etc.) y, especialmente, los detalles.

En este Documento Básico también se establecen otras consideraciones sobre durabilidad:

- En el proyecto de edificación se indicarán las protecciones adecuadas a los materiales para evitar su corrosión, de acuerdo con las condiciones ambientales internas y externas del edificio.
- A los efectos de la preparación de las superficies a proteger y del uso de las herramientas adecuadas, se podrá utilizar la norma UNE-EN 1090-1:1997.
- Los métodos de recubrimiento: metalización, galvanización y pintura, deben especificarse y ejecutarse de acuerdo con la normativa específica al respecto y las instrucciones del fabricante.
- Se definirán y cuidarán especialmente las superficies que deban resistir y transmitir esfuerzos por rozamiento, superficies de soldaduras y para el soldeo, superficies inaccesibles y expuestas exteriormente, superficies en contacto con el hormigón, la terminación de las superficies de aceros resistentes a la corrosión atmosférica, el sellado de espacios en contacto con el ambiente agresivo y el tratamiento de los elementos de fijación.
- En aquellas estructuras en las que sea necesario revisar su protección, el proyecto debe prever la inspección y mantenimiento, asegurando los accesos y el resto de condiciones físicas necesarias para ello.

A.2.6. SEGURIDAD ESTRUCTURAL - FÁBRICA (SE-F)

En este Documento Básico aparecen las consideraciones respecto a la seguridad estructural de muros resistentes en la edificación realizados a partir de piezas relativamente pequeñas, comparadas con las dimensiones de los elementos, asentadas mediante mortero, tales como fábricas de ladrillo, bloques de hormigón y de cerámica aligerada, y fábricas de piedra, incluyendo el caso de que contengan armaduras activas o pasivas en los morteros o refuerzos de hormigón armado.



La durabilidad de un paño de fábrica es la capacidad para soportar, durante el periodo de servicio para el que ha sido proyectado el edificio, las condiciones físicas y químicas a las que estará expuesto.

La estrategia del CTE dirigida a asegurar la durabilidad considera:

- La clase de exposición a la que estará sometido el elemento: define la agresividad del medio en el que debe mantenerse el elemento sin la disminución de sus propiedades. En las tablas 3.1 y 3.2 del Documento Básico SE-F (CTE) se describen las clases de exposición a las que puede estar expuesto un elemento. Para la asignación de la clase o clases a un elemento de fábrica, además de cuestiones relativas al entorno (orientación, salinidad del medio, ataque químico, etc.), se debe tener en cuenta la severidad de la exposición local a la humedad, es decir: la situación del elemento en el edificio y el efecto de ciertas soluciones constructivas (tales como la protección que pueden ofrecer aleros, cornisas y albardillas, dotados de un goterón adecuadamente dimensionado) y el efecto de revestimientos y chapados protectores.
- Composición, propiedades y comportamiento de los materiales: deben respetarse las restricciones que se establecen en la tabla 3.3. del Documento Básico SE-F (CTE).

A.2.7. SEGURIDAD ESTRUCTURAL - MADERA (SE-M)

En este Documento Básico aparecen las consideraciones respecto a la seguridad estructural de los elementos estructurales de madera en edificación. Se establecen las medidas necesarias para garantizar la durabilidad de la estructura al menos durante el periodo de servicio y en condiciones de uso adecuado.

La durabilidad de una estructura de madera depende, en gran medida, del diseño constructivo y de la durabilidad natural, aunque en algunos casos es además necesario añadir un tratamiento. En el caso de productos derivados de la madera como los tableros estructurales de partículas, contrachapados, virutas orientadas etc., se tendrán en cuenta las especificaciones recogidas en las respectivas normas de producto para su empleo en las distintas clases de servicio.

La madera puede sufrir daños causados por agentes bióticos y abióticos. El objetivo de la protección preventiva de la madera es mantener la probabilidad de sufrir daños por este origen en un nivel aceptable.

Los elementos estructurales de madera deben estar protegidos de acuerdo con la clase de uso a la que pertenecen. El concepto de clase de uso está relacionado con la probabilidad de que un elemento estructural sufra ataques por agentes bióticos, y

principalmente es función del grado de humedad que llegue a alcanzar durante su vida de servicio. Se definen las siguientes clases de uso:

- Clase de uso 1: el elemento estructural está a cubierto, protegido de la intemperie y no expuesto a la humedad. En estas condiciones la madera maciza tiene un contenido de humedad menor que el 20%.
- Clase de uso 2: el elemento estructural está a cubierto y protegido de la intemperie pero, debido a las condiciones ambientales, se puede dar ocasionalmente un contenido de humedad de la madera mayor que el 20%.
- Clase de uso 3: el elemento estructural se encuentra al descubierto, no en contacto con el suelo. El contenido de humedad de la madera puede superar el 20%. Se divide en dos clases:
 - Clase de uso 3.1. El elemento estructural se encuentra al exterior, por encima del suelo y protegido. En estas condiciones la humedad de la madera puede superar ocasionalmente el contenido de humedad del 20%.
 - Clase de uso 3.2. el elemento estructural se encuentra al exterior, por encima del suelo y no protegido. En estas condiciones la humedad de la madera supera frecuentemente el contenido de humedad del 20%.
- Clase de uso 4: el elemento estructural está en contacto con el suelo o con agua dulce y expuesto por tanto a una humidificación en la que supera permanentemente el contenido de humedad del 20%.
- Clase de uso 5: situación en la cual el elemento estructural está permanentemente en contacto con agua salada. En estas circunstancias el contenido de humedad de la madera es mayor que el 20%, permanentemente.

El mejor protector frente a los agentes meteorológicos es el diseño constructivo, y especialmente las medidas que evitan o minimizan la retención de agua. Si la clase de uso es igual o superior a 3, los elementos estructurales deben estar protegidos frente a los agentes meteorológicos. En elementos estructurales situados al exterior deben usarse productos que permitan el intercambio de humedad entre el ambiente y la madera.

La definición de la clase resistente en proyecto no implica la especificación de una especie. Cada especie, y en concreto su partes de duramen y albura (a las que llamaremos zonas), tiene asociada lo que se llama durabilidad natural. Cada especie y zona tiene también asociada una impregnabilidad, es decir, una cierta capacidad de ser impregnada con mayor o menor profundidad. La durabilidad natural de cada especie se define en la norma UNE-EN 350.

A continuación se enumeran una serie de buenas prácticas que mejoran notablemente la durabilidad de la estructura:

- evitar el contacto directo de la madera con el terreno, manteniendo una distancia mínima de 20cm y disponiendo un material hidrófugo (barrera antihumedad);



- evitar que los arranques de soportes y arcos queden embebidos en el hormigón u otro material de fábrica. Para ello se protegerán de la humedad colocándolos a una distancia suficiente del suelo o sobre capas impermeables;
- ventilar los encuentros de vigas en muros, manteniendo una separación mínima de 15 mm entre la superficie de la madera y el material del muro. El apoyo en su base debe realizarse a través de un material intermedio, separador, que no transmita la posible humedad del muro;
- evitar uniones en las que se pueda acumular el agua;
- proteger la cara superior de los elementos de madera que estén expuestos directamente a la intemperie y en los que pueda acumularse el agua. En el caso de utilizar una albardilla (normalmente de chapa metálica), esta albardilla debe permitir, además, la aireación de la madera que cubre;
- evitar que las testas de los elementos estructurales de madera queden expuestas al agua de lluvia ocultándolas, cuando sea necesario, con una pieza de remate protector;
- facilitar, en general, al conjunto de la cubierta la rápida evacuación de las aguas de lluvia y disponer sistemas de desagüe de las condensaciones en los lugares pertinentes.

A.2.8. EXIGENCIAS BÁSICAS DE SEGURIDAD EN CASO DE INCENDIO

El objetivo del requisito básico “Seguridad en caso de incendio” consiste en reducir a límites aceptables el riesgo de que los usuarios de un edificio sufran daños derivados de un incendio de origen accidental, como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento.

Una de sus exigencias básicas es la resistencia al fuego de la estructura. En ella se establece que la estructura portante mantendrá su resistencia al fuego durante el tiempo necesario para que puedan cumplirse el resto de exigencias básicas de este Documento Básico.

La elevación de la temperatura que se produce como consecuencia de un incendio en un edificio afecta a su estructura de dos formas diferentes. Por un lado, los materiales ven afectadas sus propiedades, modificándose de forma importante su capacidad mecánica. Por otro, aparecen acciones indirectas como consecuencia de las deformaciones de los elementos, que generalmente dan lugar a tensiones que se suman a las debidas a otras acciones.

Se admite que un elemento tiene suficiente resistencia al fuego si, durante la duración del incendio, el valor de cálculo del efecto de las acciones, en todo instante t , no supera el valor de la resistencia de dicho elemento.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

1. ACI American Concrete Institute. (2000). Reported by ACI Committee 365 (365.1R-00), *Service-Life Prediction, State-of-the-Art Report*.
2. AIJ Architectural Institute of Japan. (1993). Tokyo, Japan. *The English Edition of Principal Guide for Service Life Planning of Buildings*.
3. Akiyama, M., Frangopol, D. M., & Suzuki, M. (2012). Integration of the effects of airborne chlorides into reliability-based durability design of reinforced concrete structures in a marine environment. *Structure and Infrastructure Engineering, 8*(2), 125-134.
4. Aktas, C. B., & Bilec, M. M. (2012). Service life prediction of residential interior finishes for life cycle assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment, 17*(3), 362-371.
5. Alcocer, S. M., & Castaño, V. M. (2008). Evolution of codes for structural design in Mexico. *Structural Survey, 26*(1), 17-28.
6. Al-Khaiat, H., & Fattuhi, N. I. (1990). Evaluating building materials used in Kuwait. *Construction and Building Materials, 4*(1), 32-36.
7. Alkhrdaji, T., & Thomas, J. (2004). Strengthening & repairing concrete. *Construction Specifier, 57*(9), 22-32.
8. Anoop, M. B., Raghuprasad, B. K., & Balaji Rao, K. (2012). A refined methodology for durability-based service life estimation of reinforced concrete structural elements considering fuzzy and random uncertainties. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 27*(3), 170-186.
9. Anthony, R. W. (2013). Deterioration of wood structures - basic forensic considerations. *Forensic Engineering 2012: Gateway to a Better Tomorrow - Proceedings of the 6th Congress on Forensic Engineering, 907-917*.
10. Antwi-Boasiako, C., & Allotey, A. (2010). The effect of stake dimension on the field performance of two hardwoods with different durability classes. *International Biodeterioration and Biodegradation, 64*(4), 267-273.



11. Arditi, D., & Gunaydin, H. M. (1998). Factors that affect process quality in the life cycle of building projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 124(3), 194-203.
12. Arditi, D., & Gunaydin, H. (1999). Perceptions of process quality in building projects. *Journal of Management in Engineering*, 15(2), 43-53. doi:10.1061/(ASCE)0742-597X(1999)15:2(43).
13. Arencibia, J. M. (2007). Conceptos fundamentales sobre el mantenimiento de edificios. *Revista de arquitectura e ingeniería*, 1(1), 1-8.
14. Assié, S., Escadeillas, G., Marchese, G., & Waller, V. (2006). Durability properties of low-resistance self-compacting concrete. *Magazine of Concrete Research*, 58(1), 1-7.
15. Audet-Lapointe, P. (1990). Condition assessment process developed for use in the private sector. *ASTM Special Technical Publication*, (1098), 25-35.
16. Bai Min, Niu Ditao, & Wu Xiong. (2009). Experiment study on the chloride penetration of steel fibre reinforced concrete. *Multi-Functional Materials and Structures Ii, Pts 1 and 2*, 79-82, 1771-1774. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.79-82.1771
17. Balaras, C. A., Droutsa, K., Dascalaki, E., & Kontoyiannidis, S. (2005). Deterioration of european apartment buildings. *Energy and Buildings*, 37(5), 515-527.
18. Balouch, S. U., Forth, J. P., & Granju, J. -. (2010). Surface corrosion of steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 40(3), 410-414.
19. Beasley, K. J. (2012). Building facade failures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Forensic Engineering*, 165(1), 13-19.
20. Becker, R. (1999). Research and development needs for better implementation of the performance concept in building. *Automation in Construction*, 8(4), 525-532.
21. Benazzouk, A., Douzane, O., & Quéneudec, M. (2004). Transport of fluids in cement-rubber composites. *Cement and Concrete Composites*, 26(1), 21-29.

22. Bendaoui, K., El Hammoumi, A., Gueraoui, K., Kerroum, M., Elghachi, M., Ghouli, A., El Mouraouah, A. (2010). Vulnerability of buildings for a tsunami. *International Review of Mechanical Engineering*, 4(5), 531-535.
23. Bilec, M., Ries, R., Matthews, H. S., & Sharrard, A. L. (2006). Example of a hybrid life-cycle assessment of construction processes. *Journal of Infrastructure Systems*, 12(4), 207-215.
24. Blom, I., Itard, L., & Meijer, A. (2010). Environmental impact of dwellings in use: Maintenance of façade components. *Building and Environment*, 45(11), 2526-2538.
25. Blong, R. (2004). Residential building damage and natural perils: Australian examples and issues. *Building Research and Information*, 32(5), 379-390.
26. Bortz, S. A., & Wonneberger, B. (2001). Review of durability testing in the united states and europe. *ASTM Special Technical Publication*, (1394), 94-106.
27. Brinnel, V., Münstermann, S., Bleck, W., Feldmann, M., & Reese, S. (2013). Structural requirements and material solutions for sustainable buildings. *Revue De Metallurgie.Cahiers D'Informations Techniques*, 110(1), 37-46.
28. Brischke, C., Behnen, C. J., Lenz, M. -, Brandt, K., & Melcher, E. (2012). Durability of oak timber bridges - impact of inherent wood resistance and environmental conditions. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 75, 115-123.
29. BSI British Standards Institution. (1992). Londres: British Standards Institution, BS 7543:1992. *Guide to Durability of Buildings and Building Elements, Products and Components*.
30. Butler, M., Mechtcherine, V., & Hempel, S. (2009). Experimental investigations on the durability of fibre-matrix interfaces in textile-reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 31(4), 221-231.
31. Butler, M., Mechtcherine, V., & Hempel, S. (2010). Durability of textile reinforced concrete made with AR glass fibre: Effect of the matrix composition. *Materials and Structures/Materiaux Et Constructions*, 43(10), 1351-1368.
32. Carvajal, A. M., Vera, R., Corvo, F., & Castañeda, A. (2012). Diagnosis and rehabilitation of real reinforced concrete structures in coastal areas. *Corrosion Engineering Science and Technology*, 47(1), 70-77.



33. Chandler, A. M., Jones, E., John, W., & Patel, M. H. (2001). Property loss estimation for wind and earthquake perils. *Risk Analysis*, 21(2), 235-249.
34. Cheng, S., & Liu, S. (2011). Low-carbon technology strategies during architectural lifetime - A case study of the national assembly for wales. *Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)*, 18(SUPPL.2), 111-114.
35. Chew, M. Y. L. (2005). Defect analysis in wet areas of buildings. *Construction and Building Materials*, 19(3), 165-173.
36. Chew, M. Y. L., & De Silva, N. (2003). Maintainability problems of wet areas in high-rise residential buildings. *Building Research and Information*, 31(1), 60-69.
37. Chew, M. Y. L., Tan, S. S., & Kang, K. H. (2004). Building maintainability - review of state of the art. *Journal of Architectural Engineering*, 10(3), 80-87.
38. Chew, M. Y. L., Tan, S. S., & Soemara, E. (2004). Serviceability of materials in the tropics. *Journal of Architectural Engineering*, 10(2), 69-76.
39. Chidiac, S. E., & Federico, L. M. (2007). Effects of waste glass additions on the properties and durability of fired clay brick. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(11), 1458-1466.
40. Cole, I., & Corrigan, P. (2011). Predicting the service life of buildings and components. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials*, 164(6), 305-314.
41. Concu, G., de Nicolo, B., & Pani, L. (2011). Non-destructive testing as a tool in reinforced concrete buildings refurbishments. *Structural Survey*, 29(2), 147-161.
42. Correia, J. R., Branco, F. A., & Ferreira, J. (2009). GFRP-concrete hybrid cross-sections for floors of buildings. *Engineering Structures*, 31(6), 1331-1343.
43. Costanzo, E. (2006). Building defects: Survey and impact over sustainability. *Eco-Architecture: Harmonisation between Architecture and Nature*, 86, 361-368. doi:10.2495/ARC060361.
44. CSA Canadian Standards Association. (2001). *Guideline on Durability in buildings*. Canadá, S478-95, 9-17.
45. CTE. (2006). Ministerio de Fomento, España. *Código Técnico de la Edificación*.
46. Dallin, G. W. (2007). Strong as steel. *Finishing Today*, 83(9), 42-45.

47. Das, I., Kumar, G., Stein, A., Bagchi, A., & Dadhwal, V. K. (2011). Stochastic landslide vulnerability modeling in space and time in a part of the northern himalayas, india. *Environmental Monitoring and Assessment*, 178(1-4), 25-37.
48. Davies, H., & Wyatt, D. (2004). Appropriate use of the ISO 15686-1 factor method for durability and service life prediction. *Building Research and Information*, 32(6), 552-553.
49. Davies, J. M., & Heselius, L. (1993). Design recommendations for sandwich panels. *Building Research and Information*, 21(3), 157-161.
50. Dehn, F., & König, G. (2002). New construction possibilities by the use of ultra high-performance concrete (UHPC). [Neue Konstruktionsmöglichkeiten mit ultrahochfestem Beton (UHPC)] *Betonwerk Und Fertigteil-Technik/Concrete Precasting Plant and Technology*, 68(2), 16-17.
51. Do Lago, P. R. (1997). Manual para la reparación, refuerzo y protección de las estructuras de concreto. *Instituto Mexicano del Cemento y del concreto, IMCYC*.
52. Dukic, L. D., & Štern, I. (1993). Investigation of corrosion prevention method for determination of steel structure condition. *Journal of Constructional Steel Research*, 25(3), 167-183.
53. EHE-08. (2008). Ministerio de Fomento, España. *Instrucción de Hormigón Estructural*.
54. Eley, J. (2004). Design quality in buildings. *Building Research and Information*, 32(3), 255-260.
55. Ellingwood, B. R. (2006). Mitigating risk from abnormal loads and progressive collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 20(4), 315-323.
56. Erduran, E., & Yakut, A. (2004). Drift based damage functions for reinforced concrete columns. *Computers and Structures*, 82(2-3), 121-130.
57. Eperjesi, L. N., Ferreira, E. S., & Vicente, A. A. (2011). Avances en la normalización de la resistencia a carbonatación de estructuras de hormigón armado. *Primeras Jornadas de Investigación y Transferencia*.
58. Evans, D. (2004). Structured thinking. *Fire Prevention and Fire Engineers Journals*, 64(246), 38-39.



59. Ferreira, A. F. (2009). Previsão da vida útil de revestimentos de pedra natural de paredes. *Instituto Superior Técnico. Lisboa: Universidad Técnica de Lisboa.*
60. Fib symposium 2005, budapest: "keep concrete attractive". (2005). *Structural Concrete*, 6(3), 119-120.
61. Fibre-optic-based sensors bring new capabilities to structural monitoring. (2006). *Sensor Review*, 26(3), 236-243.
62. Flores-Colen, I., & Brito, J. D. (2010). Discussion of proactive maintenance strategies in façades' coatings of social housing. *Journal of Building Appraisal*, 5(3), 223-240.
63. Flores-Colen, I., & De Brito, J. (2010). A systematic approach for maintenance budgeting of buildings faades based on predictive and preventive strategies. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1718-1729.
64. Flourentzou, F., Brandt, E., & Wetzel, C. (1999). In Lacasse M. V.,DJ (Ed.), *MEDIC - A method for predicting residual service life and refurbishment investment budgets.*
65. Foliente, G., Leicester, R., Cole, I., & Mackenzie, C. (1999). In Lacasse M. V.,DJ (Ed.), *Development of a reliability-based durability design method for timber construction.*
66. Folliard, K. (2006). Computer programs designed to improve concrete. *Materials Performance*, 45(12), 12-13.
67. Friedman, A., & Cammalleri, V. (1996). Advanced wood-frame construction details in canada. *Building Research and Information*, 24(5), 270-278.
68. Frohnsdorff, G., Sjostrom, C., & Soronis, G. (1999). In Lacasse M. V.,DJ (Ed.), *International standards for service life planning of buildings.*
69. Fujita, K., & Takewaki, I. (2011). Sustainable building design under uncertain structural-parameter environment in seismic-prone countries. *Sustainable Cities and Society*, 1(3), 142-151.
70. Gadalla, M., & Kadi, H. E. (2009). Evaluation of thermal stability of quasi-isotropic composite/polymeric cylindrical structures under extreme climatic conditions. *Structural Engineering and Mechanics*, 32(3), 429-445.

71. Gangolells, M., & Casals, M. (2012). Resilience to increasing temperatures: Residential building stock adaptation through codes and standards. *Building Research and Information*, 40(6), 645-664.
72. Gaspar, P. L. (2002). Metodologia para o cálculo da durabilidade de rebocos exteriores correntes. *Instituto Superior Técnico. Lisboa: Universidad Técnica de Lisboa*.
73. Gaspar, P. L., & De Brito, J. (2008). Service life estimation of cement-rendered facades. *Building Research and Information*, 36(1), 44-55.
74. Geiker, M. R. (2012). On the importance of execution for obtaining the designed durability of reinforced concrete structures. *Materials and Corrosion*, 63(12), 1114-1118.
75. Gentry, T. R., Bank, L. C., Barkatt, A., & Prian, L. (1998). Accelerated test methods to determine the long-term behavior of composite highway structures subject to environmental loading. *Journal of Composites Technology and Research*, 20(1), 38-50.
76. Gold, S., & Rubik, F. (2009). Consumer attitudes towards timber as a construction material and towards timber frame houses - selected findings of a representative survey among the german population. *Journal of Cleaner Production*, 17(2), 303-309.
77. Graciela Maldonado, N. (2004). Hacia una mayor durabilidad de las estructuras de hormigón armado. *Proyecto Leonardo, Año 0*, 1(0), 56-68.
78. Grant, A., & Ries, R. (2013). Impact of building service life models on life cycle assessment. *Building Research and Information*, 41(2), 168-186.
79. Griffin, J. J. (1993). Life cycle cost analysis: A decision aid. *Blackie Academic & Professional, London*.
80. Groot, C., van Hees, R., & Wijffels, T. (2009). Selection of plasters and renders for salt laden masonry substrates. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1743-1750.
81. Guida, A., Fatiguso, F., & Mecca, I. (2003). Setting of the restoration project for durability. *Advances in Architecture*, , 15 705-714.



82. Gulikers, J. J. W. (2009). A simplified and practical approach regarding design for durability of reinforced concrete structures based on probabilistic modeling of chloride ingress. *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II - Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR*, 153-154.
83. Gumpertz, W., & Rutila, D. (1999). In Lacasse M. V.,DJ (Ed.), *Building durability - know what you know or let's use the knowledge we already have, before we improve upon it*.
84. Haapio, A., & Viitaniemi, P. (2008). Environmental effect of structural solutions and building materials to a building. *Environmental Impact Assessment Review*, 28(8), 587-600.
85. Häkkinen, T. M. (2007). Sustainable building related new demands for product information and product model based design. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*, 12, 19-37.
86. Harrison, W. H., & Bowler, G. K. (1990). Aspects of mortar durability. *British Ceramic Transactions and Journal*, 89(3), 93-101.
87. Hassanain, M., Froese, T., & Vanier, D. (1999). In Lacasse M. V.,DJ (Ed.), *Information analysis for roofing systems maintenance management integrated system*.
88. Havířova, Z., & Kubu, P. (2011). The effect of temperature/moisture conditions in cladding of wood-based buildings on their reliability and service life. *Wood Research*, 56(3), 337-348.
89. Hermans, M. (1999). In Lacasse M. V.,DJ (Ed.), *Building performance starts at hand-over: The importance of life span information*.
90. Hernández, S. (2011). Aplicación de la información de la vida útil en la planeación y diseño de proyectos de edificación. *Acta Universitaria*, 21(2), 37-42.
91. Hill, J. D. (1985). Some factors affecting the durability of buildings, with particular emphasis on parking structures. 17-23.

92. Hitchcock, R. J. (2004). Software interoperability in support of whole-building performance assurance. *Journal of Architectural and Planning Research*, 21(4), 303-311.
93. Holmstrom, I. (1983). Buildings to use or to demolish? the maintainability of a building. 555-568.
94. Huang, S., Yang, Y., & Zeng, Y. (2011). A new system for durability assessment of existing concrete bridges. *ICTE 2011 - Proceedings of the 3rd International Conference on Transportation Engineering*, 1726-1731.
95. Humphreys, A. W., & Heatley, T. R. (1999). Refurbishment opportunities and the performance of steel intensive overcladding. *Revue De Metallurgie.Cahiers D'Informations Techniques*, 96(6), 813-821.
96. Hussain, R. R. (2011). Influence of chloride ions and hot weather on isolated rusting steel bar in concrete based on NDT and electro-chemical model evaluation. *NDT and E International*, 44(2), 158-162.
97. Ipekoglu, B., Böke, H., & Çizer, O. (2007). Assessment of material use in relation to climate in historical buildings. *Building and Environment*, 42(2), 970-978.
98. ISO/IEC 2382-14:1997. (1997) ISO (Ed.), *Information technology, vocabulary, part 14: reliability, maintainability and availability*.
99. ISO 15686:2011. (2011). ISO (Ed.), *Buildings and constructed assets, service life planning*.
100. Janssen, G., & Hendriks, C. (2002). In Anson, M Ko, JM Lam,ESS (Ed.), *Sustainable use of recycled materials in building construction*.
101. Jernberg, P. (1997). Service life analysis from field data on age distributions. *Materials and Structures/Materiaux Et Constructions*, 30(195), 29-32.
102. Jernberg, P., Sjostrom, C., & Lacasse, M. A. (1997). State-of-the-art report. *Materials and Structures/Materiaux Et Constructions*, 30(Suppl 196), 22-25.
103. Ji, Y. (2010). The durability of prefabricated large panel building in beijing. *Proceeding - 5th International Conference on Computer Sciences and Convergence Information Technology, ICCIT 2010*, 755-758.



104. Junghans, L. (2013). Sequential equi-marginal optimization method for ranking strategies for thermal building renovation. *Energy and Buildings*, 65, 10-18.
105. Junnila, S., Horvath, A., & Guggemos, A. A. (2006). Life-cycle assessment of office buildings in europe and the united states. *Journal of Infrastructure Systems*, 12(1), 10-17.
106. Katsaros, J. D. (2005). Adhesive characterization & durability of self-adhered flashings. *Journal of ASTM International*, 2(10), 149-165.
107. Kim, Y. M., Kim, C. K., & Hong, S. G. (2006). Fuzzy based state assessment for reinforced concrete building structures. *Engineering Structures*, 28(9), 1286-1297.
108. Kitsutaka, Y. (2010). Methodology on the integrity evaluation in the aging management and evaluation of reinforced concrete structures. *AIJ Journal of Technology and Design*, 16(32), 27-30.
109. Kolár, K., Klecka, T., & Kolisko, J. (2001). Volume changes of cement composites at early stages of setting and hardening. *Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej*, (80), 99-104.
110. Kuehn, H. (1989). Some development trends in concrete constructional engineering. *Betonwerk Und Fertigteil-Technik/Concrete Precasting Plant and Technology*, 55(2), 41-42, 44".
111. Kumar, D., Setunge, S., & Patnaikuni, I. (2010). Prediction of life-cycle expenditure for different categories of council buildings. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 24(6), 556-561.
112. Kumar, S. (2000). Fly ash-lime-phosphogypsum cementitious binder: A new trend in bricks. *Materials and Structures/Materiaux Et Constructions*, 33(225), 59-64.
113. Kumar, S. (2003). Fly ash-lime-phosphogypsum hollow blocks for walls and partitions. *Building and Environment*, 38(2), 291-295.
114. Kvande, T., & Lisø, K. R. (2009). Climate adapted design of masonry structures. *Building and Environment*, 44(12), 2442-2450.
115. Lair, J., Le Teno, J., & Boissier, D. (1999). In Lacasse M. V.,DJ (Ed.), *Durability assessment of building systems*.

116. Lam, K. C. (2000). Quality assurance in management of building services maintenance. *Building Services Engineering Department, The Hong Kong Polytechnic Univ.*
117. Langford, D. A., MacLeod, I., Dimitrijevic, B., & Maver, T. W. (2002). Durability, adaptability and energy conservation (DAEC) assessment tool. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 2(1-3), 142-159.
118. Lantada, N., Pujades, L. G., & Barbat, A. H. (2009). Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A comparison. *Natural Hazards*, 51(3), 501-524.
119. Lavy, S., & Shohet, I. M. (2007). On the effect of service life conditions on the maintenance costs of healthcare facilities. *Construction Management and Economics*, 25(10), 1087-1098.
120. Lawson, R. M., Popo-Ola, S. O., Way, A. G., Heatley, T., & Pedreschi, R. (2010). Durability of light steel framing in residential applications. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials*, 163(2), 109-121.
121. Lewry, A. J., & Crewdson, L. F. E. (1994). Approaches to testing the durability of materials used in the construction and maintenance of buildings. *Construction and Building Materials*, 8(4), 211-222.
122. Li, Y. (2012). Assessment of damage risks to residential buildings and cost-benefit of mitigation strategies considering hurricane and earthquake hazards. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 26(1), 7-16.
123. Lindvall, A. (2009). Modeling of the influence from environmental actions on the durability of reinforced concrete structures. *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II - Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR*, 145-146.
124. Lisø, K. R., Hygen, H. O., Kvande, T., & Thue, J. V. (2006). Decay potential in wood structures using climate data. *Building Research and Information*, 34(6), 546-551.
125. Lisø, K. R., Kvande, T., & Thue, J. V. (2005). High-performance weather-protective flashings. *Building Research and Information*, 33(1), 41-54.



126. Lisø, K. R., Myhre, L., Kvande, T., Thue, J. V., & Nordvik, V. (2007). A norwegian perspective on buildings and climate change. *Building Research and Information*, 35(4), 437-449.
127. Lohaus, L. (2007). New quality approaches - modern microelectronics for an old construction material. [Qualität auf neuen Wegen - Moderne Mikroelektronik für einen alten Baustoff] *Betonwerk Und Fertigteil-Technik/Concrete Plant and Precast Technology*, 73(2), 138-140.
128. Mackechnie, J. R., & Alexander, M. G. (2009). Using durability to enhance concrete sustainability. *Journal of Green Building*, 4(3), 52-60.
129. Maggi, P., Rejna, M., Daniotti, B., Re Cecconi, F., Poli, T., Rigamonti, G., Teruzzi, T. (1999). In Lacasse M. V.,DJ (Ed.), *Experimental program to evaluate building components service life: First results on brickwork*.
130. Mailvaganam, N. P., & Collins, P. G. (1997). Effect of workmanship factors on traffic deck waterproofing coating systems. *Indian Concrete Journal*, 71(12), 669-675.
131. Mailvaganam, N. P., Collins, P. G., Lacasse, M. A., & Paroli, R. M. (1998). The performance of elastomeric parking garage membrane systems. *Construction and Building Materials*, 12(6-7), 393-402.
132. Maldonado, N. G., Pizarro, N. F., Michelini, R. J., & Guzmán, A. M. (2009). An approach of service life in repair of structures with concrete due to natural hazards. *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II - Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR*, 403-404.
133. Mariño, R. A., Carreira, X. C., Fernández, M. E., & Fernandez-Rodriguez, C. (2009). Durability of timber structures in agricultural and livestock buildings. *Biosystems Engineering*, 104(1), 152-160.
134. Marshall, R. (2008). Delivering durable building envelopes. *PCI Journal*, 53(1), 85-88.
135. Marteinson, B. (2003). Durability and the factor method of ISO 15686-1. *Building Research and Information*, 31(6), 416-426.

136. Marteinson, B. (2005). Service life estimation in the design of buildings; a development of the factor method. *Tesis Doctoral, KTH Research School, Centre for Built Environment, University of Gävle, Suecia.*
137. Martin, M. (2004). Age before beauty - is long life the key to a truly green building? *Construction Specifier, 57(11), 40-48.*
138. Masters, L. W., & Brandt, E. (1987). Prediction of service life of building materials and components. *Materials and Structures, 20(1), 55-77.*
139. Matthew, P. (1998). Design & maintenance for serviceability and durability. *Concrete (London), 32(4), 12-13.*
140. Maurenbrecher, A. H. P., Grimm, C. T., & Brousseau, R. J. (1998). Corrosion of metal connectors in masonry cladding. *Construction Specifier, 51(11).*
141. Mehta P.K., & Burrows, R.W. (2001). Building Durable Structures in the 21st Century. *Concrete International, 23 (3) 57-63.*
142. Mendoza, J. M., & Castro, P. (2009). Credibility of concepts and models about service life of concrete structures in the face of the effects of the global climatic change. A critical review. *Materiales de construcción, 59(276), 117-124.*
143. Mlakar, J., & Štrancar, J. (2013). Temperature and humidity profiles in passive-house building blocks. *Building and Environment, 60, 185-193.*
144. Moisture control in under-roof structures. (1999). *TUT Textiles a Usages Techniques, (34), 30-33.*
145. Monjo, J. (2007). Durability vs Vulnerability. *Informes de la construcción, 59(507), 43-58.*
146. Montagna, R., Pandolfi, E., & Vitaletti, S. (2002). In Ural, O Abrantes, V Tadeu,A. (Ed.), *Ageing of low cost housing.*
147. Mora, R., Bitsuamlak, G., & Horvat, M. (2011). Integrated life-cycle design of building enclosures. *Building and Environment, 46(7), 1469-1479.*
148. Moser, K., & Hovde, P. J. (2004). Performance based methods for service life prediction. *CIB Report Publication 294, Rotterdam.*
149. Moss, G. (1999). In Lacasse M. V.,DJ (Ed.), *Service life performance audit: Meeting client requirements for durable buildings.*



150. Moubray, J. (1997). Butterworth-Heinemann, Oxford, MA, 2nd ed. *Reliability-Centred Maintenance*.
151. Mouroux, P., & Le Brun, B. (2006). Presentation of RISK-UE project. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(4), 323-339.
152. Moy, G. W. (2012). Integrated, holistic, high-performance buildings. *Military Engineer*, 104(675), 57-58.
153. Mukhopadhyay, T. K., Ghosh, S., Chakraborti, S., & Ghatak, S. (2005). Effect of sodium silicate on the durability of common building bricks. *InterCeram: International Ceramic Review*, 54(4), 262-267.
154. Nadal, N. C., Zapata, R. E., Pagán, I., López, R., & Agudelo, J. (2010). Building damage due to riverine and coastal floods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(3), 327-336.
155. Newton, L. A., & Christian, J. (2006). Impact of quality on building costs. *Journal of Infrastructure Systems*, 12(4), 199-206.
156. Nies, A. (2007). Energy-saving potentials of lightweight concrete construction - detailed solutions. [Energieeinsparpotenziale der Leichtbetonbauweise - Detaillösungen] *Betonwerk Und Fertigteil-Technik/Concrete Plant and Precast Technology*, 73(2), 120-121.
157. Nieves, D., Gaona, C., Hervert, H. L., Méndez, R. C., Castro, P., Borunda, A., Zambrano, P., & Almeraya, F. (2012). Identifying Factors Influencing the Corrosion Rate of Steel Using Nonparametric Statistics. *International Journal of Electrochemical Science*, 7, 6343-6352.
158. Nieves, D., Gaona, C., Hervert, H. L., Tobías, R., Castro, P., Colas, R., Zambrano, P., Martínez, A., & Almeraya, F. (2012). Statistical Analysis of Factors Influencing Corrosion in Concrete Structures. *International Journal of Electrochemical Science*, 7, 5495-5509.
159. Nik, V. M., Sasic Kalagasidis, A., & Kjellström, E. (2012). Statistical methods for assessing and analysing the building performance in respect to the future climate. *Building and Environment*, 53, 107-118.

160. Nili, M., & Afrouhsabet, V. (2012). The long-term compressive strength and durability properties of silica fume fiber-reinforced concrete. *Materials Science and Engineering A*, 531, 107-111.
161. Nireki, T. (1996). Service life design. *Construction and Building Materials*, 10(5 SPEC. ISS.), 403-406.
162. Nofal, M., & Kumaran, K. (2011). Biological damage function models for durability assessments of wood and wood-based products in building envelopes. *European Journal of Wood and Wood Products*, 69(4), 619-631.
163. Nordby, A. S., Berge, B., Hakonsen, F., & Hestnes, A. G. (2009). Criteria for salvageability: The reuse of bricks. *Building Research and Information*, 37(1), 55-67.
164. Ortega, L. (2012). Propuesta metodológica para estimar la vida útil de los sistemas constructivos de fachadas y cubiertas utilizados actualmente con más frecuencia en la edificación española a partir del método propuesto por la norma ISO-15686. Fran, J. M. dir., Serrano, A. B. dir. Universidad Politécnica de Valencia.
165. Pan, H., Wang, S., Zhu, Y., & Yang, L. (2009). The judgment and prediction on reinforced concrete structures' durability based on steel rustiness and concrete cracking. *Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics*, 26(7), 111-116.
166. Papamichael, K. (1999). Application of information technologies in building design decisions. *Building Research and Information*, 27(1), 20-34.
167. Peng, Z., Zhao, T., Jin, Z., & Zhao, J. (2009). Application of durability sensors in reinforced concrete liner of subsea tunnel. *2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA 2009*, , 1 12-15.
168. Polese, M., Di Ludovico, M., Prota, A., & Manfredi, G. (2013). Damage-dependent vulnerability curves for existing buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 42(6), 853-870.
169. Poon, S. W., & Ho, D. C. W. (2010). In Shao, YB Zhou, XG Tam,CT (Ed.), *Structural conditions of two 50 years old rc buildings in hong kong*.



170. Pyke, C. R., McMahon, S., Larsen, L., Rajkovich, N. B., & Rohloff, A. (2012). Development and analysis of climate sensitivity and climate adaptation opportunities indices for buildings. *Building and Environment*, 55, 141-149.
171. Re Cecconi, F., & Ravetta, F. (1999). In Lacasse M. V.,DJ (Ed.), *Experimental program for the evaluation of coil coated steel sheet service life*.
172. Reeves, B. (1997). In-service structural behaviour of buildings: The role and application of environmental monitoring in the assessment of the long term durability of precast concrete system built houses, kennet district council, devizes. *Construction and Building Materials*, 11(5-6), 337-343.
173. Ren, F., Liu, J., & Chen, Y. (2008). In Zhou, XG Tam, CT Han, LH Shao,YB (Ed.), *Analyzing reliability of concrete factory building durability based on carbonization*.
174. Rincón, L., Pérez, G., & Cabeza, L. F. (2013). Service life of the dwelling stock in spain. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(5), 919-925.
175. Roca, A., Goula, X., Susagna, T., Chávez, J., González, M., & Reinoso, E. (2006). A simplified method for vulnerability assessment of dwelling buildings and estimation of damage scenarios in catalonia, spain. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(2), 141-158.
176. Rosowsky, D. V., & Ellingwood, B. R. (2002). Performance-based engineering of wood frame housing: Fragility analysis methodology. *Journal of Structural Engineering*, 128(1), 32-38.
177. Rossetto, T., & Elnashai, A. (2003). Derivation of vulnerability functions for european-type RC structures based on observational data. *Engineering Structures*, 25(10), 1241-1263.
178. Rudbeck, C. (1999). In Lacasse M. V.,DJ (Ed.), *Assessing the service life of building envelope constructions*.
179. Rudbeck, C. (2002). Service life of building envelope components: Making it operational in economical assessment. *Construction and Building Materials*, 16(2), 83-89.
180. Rudd, A. (2005). Field performance of unvented cathedralized (UC) attics in the USA. *Journal of Building Physics*, 29(2), 145-169.

181. Sassi, P. (2008). Defining closed-loop material cycle construction. *Building Research and Information*, 36(5), 509-519.
182. Sauer, F. (2009). Limited choices. *European Coatings Journal*, (6), 42-45.
183. Scheffler, M. J., & Kneezel, D. S. (2007). Testing of composite stone faced aluminum honeycomb panels. *Journal of ASTM International*, 4(7).
184. Schneider, A. (2002). Assessing energy, lighting, room acoustics, occupant comfort and environmental impacts performance of building with a single simulation program. *Building and Environment*, 37(8-9), 845-856.
185. Sharma, S., & Mukherjee, A. (2011). Monitoring corrosion in oxide and chloride environments using ultrasonic guided waves. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(2), 207-211.
186. Shekarchi, M., Moradi-Marani, F., & Pargar, F. (2011). Corrosion damage of a reinforced concrete jetty structure in the Persian gulf: A case study. *Structure and Infrastructure Engineering*, 7(9), 701-713.
187. Shi, X., Xie, N., Fortune, K., & Gong, J. (2012). Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. *Construction and Building Materials*, 30, 125-138.
188. Shohet, I. M. (2003). Building evaluation methodology for setting maintenance priorities in hospital buildings. *Construction Management and Economics*, 21(7), 681-692.
189. Shohet, I. M., Lavy-Leibovich, S., & Bar-On, D. (2003). Integrated maintenance monitoring of hospital buildings. *Construction Management and Economics*, 21(2), 219-228.
190. Shohet, I. M., & Paciuk, M. (2004). Service life prediction of exterior cladding components under standard conditions. *Construction Management and Economics*, 22(10), 1081-1090.
191. Shohet, I. M., & Paciuk, M. (2006). Service life prediction of exterior cladding components under failure conditions. *Construction Management and Economics*, 24(2), 131-148.



192. Shohet, I., Rosenfeld, Y., Puterman, M., & Gilboa, E. (1999). In Lacasse M. V.,DJ (Ed.), *Deterioration patterns for maintenance management - A methodological approach*.
193. Siemes, A. J. M., Vrouwenvelder, A. C. W. M., & van den Beukel, A. (1985). Durability of buildings: A reliability analysis. *Heron*, 30(3).
194. Silva, T. (2001). Como estimar a vida util de estruturas projetadas com critérios que visam a durabilidade. *II Workshop sobre Durabilidad de las Construcciones*, Sao José dos Campos, Brasil, 133-143.
195. Simonson, C. J., Salonvaara, M., & Ojanen, T. (2002). The effect of structures on indoor humidity - possibility to improve comfort and perceived air quality. *Indoor Air*, 12(4), 243-251.
196. Sivaraja, M., Kandasamy, Velmani, N., & Pillai, M. S. (2010). Study on durability of natural fibre concrete composites using mechanical strength and microstructural properties. *Bulletin of Materials Science*, 33(6), 719-729.
197. Somerville, G. (1985). Interdependence of research, durability and structural design - concrete. 233-250.
198. Soronis, G. (1992). An approach to the selection of roofing materials for durability. *Construction and Building Materials*, 6(1), 9-14.
199. Soronis, G. (1992). The problem of durability in building design. *Construction and Building Materials*, 6(4), 205-211.
200. Soronis, G. (1996). Standards for design life of buildings: Utilization in the design process. *Construction and Building Materials*, 10(7), 487-490.
201. Soroushian, P., & Roz-Ud-Din, N. (2010). High-recycled-content concrete for energy-efficient building construction. *Journal of Solid Waste Technology and Management*, 36(3), 143-152.
202. Stewart, M. G. (2001). Effect of construction and service loads on reliability of existing RC buildings. *Journal of Structural Engineering*, 127(10), 1232-1235.
203. Straka, V. (2006). Designing for longevity. *WIT Transactions on the Built Environment*, , 86 277-286.

204. Straub, A. (2011). To a new dutch service life database of building products. *COBRA 2011 - Proceedings of RICS Construction and Property Conference*, 135-145.
205. Strong, J. C., Kovach, J. R., & Eng, V. S. (2007). Standards development for impermeable, constructible, and durable waterproofing. *ASTM Special Technical Publication*, , 1488 STP 63-81.
206. Sun, L., Sun, J., & Liu, H. (2012). Analysis of the effect of atmospheric environment on life of buildings. *Advanced Building Materials and Sustainable Architecture, Pts 1-4*, 174-177, 3475-3478. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.174-177.3475
207. Sutherland, R. J. M. (1985). Durability and design life - the breadth of the subject. 7-15.
208. SYAL, M., GROBLER, F., WILLENBROCK, J., & PARFITT, M. (1992). Construction project-planning process model for small-medium builders. *Journal of Construction Engineering and Management-Asce*, 118(4), 651-666. doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(1992)118:4(651).
209. Symposium on service life of rehabilitated buildings and other structures. (1990). *ASTM Special Technical Publication*, (1098) 7-124.
210. Tachibana, D., Kumagai, H., Yamazaki, N., & Suzuki, T. (1994). High-strength concrete ($f_c' = 600 \text{ kgf/cm}^2$) for building construction. *ACI Materials Journal*, 91(4), 390-400.
211. Talon, A., Boissier, D., Chevalier, J. L., & Hans, J. (2004). A methodological and graphical decision tool for evaluating building component failure. *CIB World Building Congress, Toronto, Canadá*.
212. Talon, A., Boissier, D., & Lair, J. (2008). Service-life assessment of building components: Application of evidence theory. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(3), 287-300.
213. Teasdale-St-Hilaire, A. (2006). In Fazio, P Ge, H Rao, J Desmarais,G. (Ed.), *The role of building engineering on integrated design and building sustainability*.



214. Teo, D. C. L., Mannan, M. A., & Kurian, V. J. (2010). Durability of lightweight OPS concrete under different curing conditions. *Materials and Structures/Materiaux Et Constructions*, 43(1-2), 1-13.
215. Tesfamariam, S., Sánchez-Silva, M., & Rajeev, P. (2013). Effect of topology irregularities and construction quality on life-cycle cost of reinforced concrete buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 17(4), 590-610.
216. Tesfamariam, S., & Sanchez-Silva, M. (2011). A model for earthquake risk management based on the life-cycle performance of structures. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 28(3), 261-271.
217. Tichý, M. (1990). Target life of constructed facilities. *Structural Safety*, 9(2), 155-158.
218. Trinius, W. (2005). Performance based building and sustainable construction. *CEN Construction Sector Network Conference, Prague*.
219. Trinius, W., & Sjöström, C. (2005). Service life planning and performance requirements. *Building Research and Information*, 33(2), 173-181.
220. Trusty, W. (2008). Standards versus recommended practice: Separating process and prescriptive measures from building performance. *Journal of ASTM International*, 5(2).
221. Turatsinze, A., Bonnet, S., & Granju, J. (2005). Mechanical characterisation of cement-based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres. *Building and Environment*, 40(2), 221-226.
222. Tuthill, L. H. (1991). Long service life of concrete. *Concrete International*, 13(7), 15-17.
223. Van De Lindt, J. W., Li, Y., Bulleit, W. M., Gupta, R., & Morris, P. I. (2009). The next step for AF&PA/ASCE 16-95: Performance-based design of wood structures. *Journal of Structural Engineering*, 135(6), 611-618.
224. Van Nederveen, S., & Gielingh, W. (2009). Modelling the life-cycle of sustainable, living buildings. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*, 14, 674-691.

225. Vera, R., Villarroel, M., Delgado, D., Carvajal, A. M., De Barbieri, F., & Troconis, O. (2009). DURACON: Influencia de la acción del medio ambiente en la durabilidad del concreto. Parte 2. Resultados de Chile después de 5 años de exposición. *Revista de la Construcción*, 8(1), 13-23.
226. Viitanen, H., Vinha, J., Salminen, K., Ojanen, T., Peuhkuri, R., Paajanen, L., & Lähdesmäki, K. (2010). Moisture and bio-deterioration risk of building materials and structures. *Journal of Building Physics*, 33(3), 201-224.
227. Walraven, J. C. (1994). High strength concrete - possibilities and opportunities. [Hochfester Beton - Möglichkeiten und Chancen] *Betonwerk Und Fertigteil-Technik/Concrete Precasting Plant and Technology*, 60(11).
228. Williams, B., Bisby, L., Kodur, V., Su, J., & Green, M. (2005). An investigation on fire performance of FRP strengthened R/C beams. *Fire Safety Science*, 247-258.
229. Winslow, D. N., Kilgour, C. L., & Crooks, R. W. (1990). Predicting the durability of bricks. *ZI, Ziegelindustrie International/Brick and Tile Industry International*, 43(9), 487-492.
230. Woloszyn, M., Kalamees, T., Abadie, M. O., Steeman, M., & Sasic Kalagasidis, A. (2009). The effect of combining a relative-humidity-sensitive ventilation system with the moisture-buffering capacity of materials on indoor climate and energy efficiency of buildings. *Building and Environment*, 44(3), 515-524.
231. Wyatt, D. (1999). In Lacasse M. V.,DJ (Ed.), *A natural progression: Neglect to decay*.
232. Yagust, V. I., & Yankelevsky, D. Z. (2007). On potential progressive failure of large-panel buildings. *Journal of Structural Engineering*, 133(11), 1591-1603.
233. Yanakieva, A., Datcheva, M., & Stoimenova, E. (2011). Statistical analysis of the effect of the epoxy insulation on the pull-out bond strength of steel bars. *Comptes Rendus De L'Academie Bulgare Des Sciences*, 64(7), 1035-1042.
234. Ye, Y., Liu, W., & Diao, B. (2012). RC structure durability information model based on IFC. *Advanced Research on Material Engineering, Architectural Engineering and Informatization*, 366, 338-342. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.366.338



235. Zeynalian, M., Trigunarysyah, B., & Ronagh, H. R. (2013). Modification of advanced programmatic risk analysis and management model for the whole project life cycle's risks. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(1), 51-59.
236. Zhang, H., Yoshino, H., & Hasegawa, K. (2012). Assessing the moisture buffering performance of hygroscopic material by using experimental method. *Building and Environment*, 48(1), 27-34.
237. Zhang, L., Lam, N. T. K., Mendis, P., & Haritos, N. (2008). Building sustainable structures and reuse of building materials. *Futures in Mechanics of Structures and Materials - Proceedings of the 20th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, ACMSM20*, 571-575.
238. Zhang, X. (2006). Markov-based optimization model for building facilities management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(11), 1203-1211.