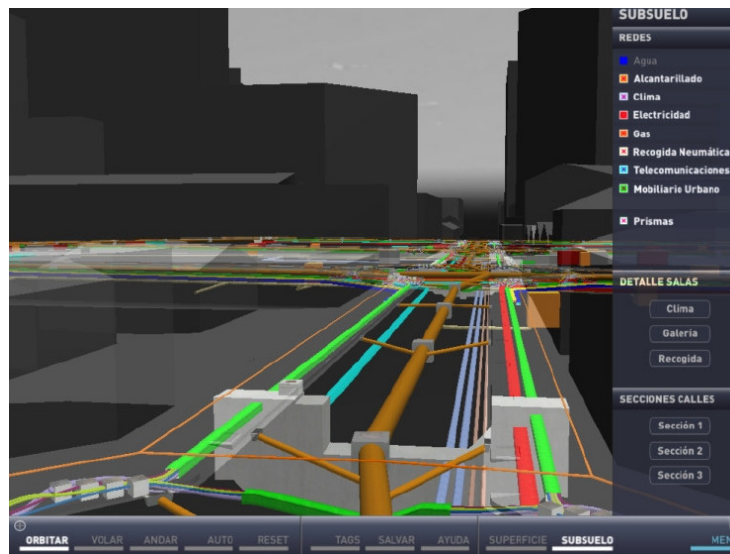


ESTUDIO Y METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DE LA VIDA ÚTIL DE GALERÍAS DE SERVICIO



ALUMNO; SONIA VALIENTE JIMÉNEZ

TUTOR UPV; JORGE CURIEL ESPARZA

ESPECIALIDAD TECNOLOGÍA



PROYECTO FIN DE
MÁSTER DE EDIFICACIÓN
CURSO 2010-2011



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
INGENIERÍA DE
EDIFICACIÓN

Contenido

PRIMERA PARTE. ACTUALIDAD DE LAS GALERÍAS DE SERVICIO.....	12
1 ESTUDIO DE LA NORMATIVA DE INSTALACIONES EN GALERÍAS DE SERVICIO	13
1.1 Normas Tecnológicas de la Edificación	13
1.2 Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para tuberías de abastecimiento de aguas 14	
1.3 Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para tuberías de saneamiento de poblaciones	14
1.4 Reglamento de Redes y Acometidas de combustibles gaseosos e Instrucciones Técnicas Complementarias.....	14
1.5 Reglamento de Instalaciones de Calefacción, Climatización e Agua Caliente Sanitaria	15
1.6 Reglamento Electrotécnico para baja tensión	15
1.7 Reglamento sobre Condiciones Técnicas y Garantías de Seguridad en Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación	16
1.8 Normas MV Alumbrado Urbano	17
1.9 UNE 20435-2 Guía para Elección de Cables de Alta Tensión	17
2 FACTORES ERGONÓMICOS.....	17
2.1 Propuestas de diseño ergonómico en Galerías de Servicio.....	18
2.2 Disposición de las bandejas	18
3 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS GALERÍAS DE SERVICIOS PÚBLICOS	19
3.1 Caracterización del subsuelo urbano	19
3.1.1 Los usos del subsuelo	19
3.1.2 Precio y derechos de propiedad del subsuelo	21
3.2 Valoración económica de las Galerías de Servicios	22
3.2.1 Costes y beneficios	23
3.2.2 Cálculo de la rentabilidad.....	24
3.3 Financiación de las galerías de servicio	25
SEGUNDA PARTE: ESTIMACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE LAS GALERÍAS DE SERVICIO.....	26
1 DIFERENTES MÉTODOS PARA LA PREDICCIÓN DE LA VIDA ÚTIL.....	26
1.1 ANTECEDENTES.....	28
1.2 LA NECESIDAD DE HERRAMIENTAS PARA LA PREDICCIÓN DE LA VIDA ÚTIL.....	32
1.3 CONCEPCIÓN DE FIN DE LA VIDA ÚTIL.....	39
1.4 REQUISITOS GENERALES DE LOS MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE LA VIDA ÚTIL	41
2 MÉTODO DE LOS FACTORES	46

2.1	DESCRIPCIÓN DE MÉTODO DE LOS FACTORES	46
2.1.1	Planteamiento inicial del método de los factores en Japón	46
2.1.2	Método los factores para la estimación de la vida útil de los elementos y sistemas constructivos como se presenta en la norma ISO 15686 Parte 1.	48
2.1.3	Aportaciones en la aplicación del método de los factores de la Norma ISO 15686 parte 8.	49
2.2	APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LOS FACTORES	50
2.3	EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS DE LOS FACTORES	53
2.3.1	Evaluación Método de los factores tal cual se describe en la ISO 15686 Parte 153	
2.3.2	Evaluación del método de los factores con las novedades expuestas en la Norma ISO 15686 Parte 8.....	59
2.4	EXPECTATIVA DEL MÉTODO DE LOS FACTORES	61
3	OTROS MÉTODOS DEL CÁLCULO DE LA VIDA ÚTIL.....	62
3.1	MÉTODOS PROBABILÍSTICOS.....	62
3.1.1	Aplicación de métodos de predicción probabilística: Modelo de Markov para el deterioro	63
3.1.2	Variables definidas como distribuciones: enfoques semideterministas – semiprobabilísticos.....	67
3.2	MÉTODOS DE INGENIERÍA	69
3.2.1	Análisis Modal de Fallos y Efectos del proceso AMFE.....	69
3.2.2	Método de los estados límite.....	72
3.2.3	Ejemplos de métodos de ingeniería propuestos a partir del método de los factores	82
	TERCERA PARTE: DURABILIDAD DE MATERIALES Y ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS.....	87
1	ALTERACIONES SEGÚN SU NATURALEZA	87
1.1	ALTERACIONES DE NATURALEZA MECÁNICA.....	87
1.2	ALTERACIONES DE NATURALEZA FÍSICA.....	87
1.3	ALTERACIONES DE NATURALEZA QUÍMICA.	88
1.3.1	Agresiones sobre materiales metálicos.....	88
1.3.2	La corrosión	90
2	COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES A LOS AGENTES EXTERNOS	93
2.1	COMPOSICIÓN DE CABLE.....	94
2.1.1	Cubiertas	94
2.1.2	Aislamientos	94
2.1.3	Deterioro del Aislamiento	96
2.1.4	Medición de la resistencia de aislamiento	97

2.1.5	Cálculo de la resistencia	97
CONCLUSIONES	98
REFERENCIAS	104
AGRADECIMIENTOS	105

INTRODUCCIÓN

¿El urbanismo responde a los retos actuales y a las disfunciones que están relacionadas con estos? Claramente, no. La energía, el agua, los flujos materiales, la explosión de la distribución urbana, las telecomunicaciones, etc. son, entre otras, variables que atienden a los retos de la sociedad de hoy. El urbanismo actual, anclado en un urbanismo del funcionalismo, no es capaz de abordar las variables que, a distintas escalas, es urgente tener en cuenta.

Se impone un nuevo urbanismo, de interés creciente entre las nuevas generaciones, uno que se acomode a una ciudad más sostenible y a una ciudad que, a su vez, atienda a las premisas de la sociedad del conocimiento de un modo más eficiente.

El urbanismo actual de dos dimensiones a cota cero, viene limitado por el propio instrumento proyectual. En el plano urbanístico no cabe, prácticamente, nada más. Las variables antes mencionadas no tienen cabida. Seguramente, que no quepan tiene su raíz en que no están presentes en el concepto de urbanistas actuales.

El nuevo urbanismo denominado “urbanismo de los tres niveles” es el urbanismo que proyecta tres planos con el mismo detalle y a la misma escala que los urbanistas actuales proyectan el plano urbanístico en superficie. Proyectar un plano en altura y un plano del subsuelo (Galerías de Servicio), aparte del plano en superficie, permite que el conjunto de variables que atienden a los retos actuales puedan ser plasmadas de un modo o de otro. Tres planos a escala urbanística, proyectados en horizontal y luego ligados en vertical tienen que proporcionarnos el armazón de los modelos urbanos anunciados.

Para abordar los nuevos retos es necesario cambiar el enfoque y los parámetros de referencia que, sin olvidar las variables del urbanismo hasta ahora conocido, den cobertura a los criterios de la sostenibilidad en la era de la información.

Para que el conjunto de condicionantes e indicadores tengan coherencia entre sí es necesario que, éstos, atiendan a un modelo urbano de ocupación del territorio. Un modelo intencional cuyos objetivos tengan en cuenta los criterios de sostenibilidad y, a su vez, los relacionados con la calidad urbana y de vida. El modelo, ya comentado, que en nuestras latitudes mejor se ajusta a estas premisas es el modelo de ciudad compacta y compleja, eficiente en el consumo de recursos.

El cálculo de los indicadores permite saber el grado de acomodación de éstos al modelo intencional y puede aplicarse no sólo a los nuevos desarrollos sino, también, a los tejidos consolidados.

A continuación, desarrollamos el papel actual de las galerías de servicios, diseñadas para transportar un número y tipo de servicios urbanos conocidos, reservando espacio para futuras realizaciones, desde las diferentes normativas a nivel nacional. Estudiamos el vacío legal que existe en fase de ergonomía de la proyección de las galerías de servicios.

Analizando la compatibilidad entre las canalizaciones de servicios urbanos, para evitar cualquier tipo de interferencia.

Seguidamente un análisis económico de las galerías, para ofrecer una visión de los costes de la NO utilización de galerías de servicios, los costes que NO se tienen en cuenta a la hora de tomar decisiones de por vida, dejando que las instalaciones en muchos casos lleguen a tener mayor importancia que la urbanización del territorio.

También repasaremos las formas de estimación de la VIDA ÚTIL, destacando que no existe ningún cálculo específico, si no que se basa en la determinación de las partes que componen una galería de servicio, principalmente porque los materiales y componentes de construcción deben ser evaluados y estimados en su vida útil y durabilidad una vez instalados, construidos y perteneciendo a un sistema constructivo y no de forma aislada, de ese modo es realmente difícil la evaluación ya que las galerías de servicios pueden llevar infinidad de instalaciones de diversos materiales. Los siguientes son algunos métodos que se pueden emplear para la estimación de la vida útil de los materiales y componentes:

1. Método por factores (se usa para estimar la vida útil cuando existen datos limitados acerca del rendimiento a largo plazo de los materiales y componentes constructivos).
2. Información de materiales que recae en normas técnicas y/o en fabricantes de los materiales.
3. Información sobre pruebas físicas de degradación en laboratorio sobre materiales y pruebas de simulación de la degradación de los materiales en entornos similares.

PRIMERA PARTE. ACTUALIDAD DE LAS GALERÍAS DE SERVICIO

Los últimos años ha habido un interés creciente en determinar la durabilidad y la vida útil de los materiales, elementos y sistemas constructivos, así como de las instalaciones, estructuras y demás componentes de un edificio. Esto se ha basado en dos aspectos:

CUESTIONES ECONÓMICAS:

- Los costes anuales de inspección y mantenimiento y los costes en relación al ciclo de vida son de gran importancia ya sea la economía de un país, o el mantenimiento de la competitividad de una industria o empresa.

CUESTIONES MEDIOAMBIENTALES:

- La escasez de recursos materiales y energéticos.
- Impacto medioambiental causado por los edificios y sus servicios.
- El sector de la construcción como un gran consumidor de recursos.

La durabilidad de los materiales y los sistemas constructivos es una de las cuestiones más importantes a tener en cuenta en materia de inspección y mantenimiento de los edificios. Al mismo tiempo la durabilidad está directamente relacionada con la búsqueda de un desarrollo sostenible, tema de plena actualidad y en el que se están invirtiendo muchos esfuerzos a nivel internacional.

Asimismo, se espera que una importante contribución a los cambios en este ámbito se deban a la concienciación de lo que influye la durabilidad de los materiales y sistemas y cuán importante es el desarrollar materiales y sistemas más duraderos y establecer métodos fiables para las pruebas de durabilidad y para la predicción de la vida útil. Cada vez más, los fabricantes de materiales y sistemas constructivos, son conscientes de esta problemática y buscan métodos para evaluar el riesgo prematuro de deterioro de sus productos debido a unas condiciones climáticas.

La revisión de las actividades en materia de estimación de la vida útil durante las últimas décadas deja patente la necesidad de instrumentos de predicción de ésta. El objetivo de la planificación de la vida útil es asegurar, tanto como sea posible, que la vida útil estimada de un edificio o alguno de sus componentes sea al menos igual que la vida útil de su diseño. Cómo no podemos conocer la vida útil con antelación, el objetivo pasa a ser el conseguir una predicción de vida útil lo más fiable posible usando los datos de los que disponemos actualmente. Lo que se busca obtener de la planificación de la vida útil es una base de datos de durabilidades de los diferentes componentes y una planificación del mantenimiento incluyendo las reposiciones necesarias y sus carencias.

1 ESTUDIO DE LA NORMATIVA DE INSTALACIONES EN GALERÍAS DE SERVICIO

Analizar la compatibilidad entre las instalaciones urbanas, es el reto del urbanismo de los tres niveles. Los servicios canalizables a través de galerías de servicios pueden ser variados en dimensiones, número y tipología, pero básicamente se encuentran los siguientes:

Agua Potable, agua de riego, aguas residuales, energía eléctrica (Media y Baja tensión), calefacción, gas, cables telefónicos, cables de fibra óptica, redes informáticas, servicios municipales (alumbrado, semáforos)...

A continuación se recopilan y analizan las normativas actuales. Haciendo especial hincapié en la normativa aplicable especialmente para galerías de servicios.

Las galerías de servicio visitables, se presentan como la solución que con la tecnología actual permite disfrutar a la ciudad de infraestructuras urbanas de calidad y sostenibles.

1.1 Normas Tecnológicas de la Edificación

NORMA TECNOLÓGICA DE LA EDIFICACIÓN, NTE-IFA “Instalaciones de Fontanería. Abastecimiento” (MOP 1976), muestra en la tabla 1 de su apartado “Separación con otras instalaciones”, las distancias a mantener entre las generatrices interiores de las conducciones de agua potable y el resto de instalaciones. [Curiel y Cantó, 2002]

INSTALACIÓN	DISTANCIA HORIZONTAL	DISTANCIA VERTICAL
ALCANTARILLADO	60cm	50cm
GAS	50cm	50cm
ELECTRICIDAD-Alta	30cm	30cm
ELECTRICIDAD-Baja	20cm	20cm
TELEFONÍA	30cm	-

Tabla 1. NTE-IFA

NORMA TECNOLÓGICA DE LA EDIFICACIÓN, NTE-IER “Instalaciones de Electricidad. Red Exterior” (MOP 1984), aplicable a las instalaciones de suministro y distribución de energía eléctrica a polígonos o zonas residenciales, trata en su apartado “3.3 Separaciones”, la compatibilidad entre instalaciones urbanas. En esta normativa se realiza una distinción entre líneas enterradas y aéreas, indicando en las tablas las distancias respecto al resto de infraestructuras.

1.2 Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para tuberías de abastecimiento de aguas

En el Pliego, apartado 10.2.1, aparece la siguiente referencia a la compatibilidad: “Las conducciones de agua potable se situarán en plano superior a las de saneamiento, con distancias vertical y horizontal entre una y otra no menor a un metro, medido entre los planos tangentes, horizontales y verticales a cada tubería más próximos entre sí. En obras de poca importancia y siempre que se justifique debidamente, podrá reducirse dicho valor de un metro hasta cincuenta centímetros. Si estas distancias no pudieran mantenerse o fuera preciso cruces con otras canalizaciones, deberán adoptarse precauciones especiales”. [Curiel y Cantó, 2002]

1.3 Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para tuberías de saneamiento de poblaciones

En el apartado 12.3.1, aparece la siguiente indicación en cuanto a separaciones: “Las conducciones de saneamiento se situarán en plano inferior a las de abastecimiento, con distancia vertical y horizontal entre una y otra no menor a un metro, medido entre planos tangentes, horizontales y verticales a cada tubería más próximos entre sí. Si estas distancias no pudieran mantenerse justificadamente o fuera preciso cruces con otras canalizaciones, deberán adoptarse precauciones especiales”.

1.4 Reglamento de Redes y Acometidas de combustibles gaseosos e Instrucciones Técnicas Complementarias

En su punto 5.4, Paralelismos y cruces, se encuentra la referencia siguiente: “En las canalizaciones que discurren paralelas y en las proximidades de líneas eléctricas de alta tensión, de telégrafo o teléfono, de ferrocarriles, de carreteras o análogas, o que las crucen deberán tomarse las precauciones suplementarias que considere necesarias el órgano competente de la Administración”. [Curiel y Cantó, 2002].

En la ITC-MIG Apartado 5.1, Canalizaciones de Transporte y Distribución de gas en alta presión B, dentro de su apartado “3.3 Profundidad de enterramiento y protecciones”, dice así: “Cuando la canalización se sitúe enterrada y próxima a otras obras o conducciones subterráneas, deberán disponerse, entre las partes más cercanas de las dos instalaciones, de una distancia como mínimo igual a 0,20 m, en los puntos de cruce y 0,40 m en recorridos paralelos”.

La ITC-IMG Apartado 5.2, Canalizaciones de Transporte y Distribución de gas en alta presión A, indica las mismas separaciones que en el caso anterior.

La ITC-IMG Apartado 5.3, Canalizaciones de Transporte y Distribución de gas en media presión B, dispone lo siguiente, “Cuando la canalización se sitúe enterrada y próxima a otras obras o conducciones subterráneas, deberá disponerse, entre las partes más cercanas de las dos instalaciones, de una distancia como mínimo igual a 0,10 m en los puntos de cruce y 0,20 m en recorridos paralelos”.

La ITC-IMG Apartado 5.4, Canalizaciones de Transporte y Distribución de gas en media presión A. Indica las mismas separaciones que en el caso anterior.

La ITC-IMG Apartado 5.5, Canalizaciones de Gas en baja presión, coincide con las dos anteriores.

1.5 Reglamento de Instalaciones de Calefacción, Climatización e Agua Caliente Sanitaria

Dentro de la IT IC 16 "Prescripciones generales de las instalaciones" del Reglamento de Instalaciones de Calefacción, Climatización y Agua Caliente Sanitaria, en el apartado 16.3.12 Relación con otros servicios, especifica lo siguiente: "Las tuberías no estarán en contacto con ninguna conducción de energía eléctrica o de telecomunicación, con el fin de evitar los efectos de corrosión que una derivación pueda ocasionar, debiendo preverse siempre una distancia mínima de 30 cm a las conducciones eléctricas y de 3 cm a las tuberías de gas más cercanas desde el exterior de la tubería o del aislamiento si lo hubiese". [Curiel y Cantó, 2002]

1.6 Reglamento Electrotécnico para baja tensión

Se puede leer en la MIE BT 003, los apartados: Se estudia la problemática de los cables **aéreos**.

"14. Condiciones generales para cruzamientos, proximidades y paralelismos".

"15. Cruzamientos".

"16. Proximidades y paralelismos".

Para los cables **enterrados**, se dispone en la MIE BT 006 de los puntos:

"7. Cruzamientos".

"8. Proximidades y paralelismos".

Especificando la siguiente tabla.

LINEA DE:	LINEAS BAJA TENSIÓN TELEFONÍA – AGUA – GAS ALCANTARILLADO	LINEAS DE ALTA TENSIÓN
ALTA TENSIÓN	25,00 cm	Línea de igual tensión 8,0 cm ⁽¹⁾ Línea de distinta tensión: 25,0 cm ⁽²⁾
BAJA TENSIÓN	20,00 cm	25,00 cm

(1) Cuando estén tendidas en la misma zanja. (2) Esta separación se podrá reducir a 8cm cuando la línea de menor tensión se introduzca en un tubo protector.

INSTALACIONES U OBSTACULOS	HORIZONTAL (cm)	VERTICAL (cm)
LINEAS DE TELECOMUNICACIÓN	-	100
CALLES, CARRETERAS Y FERROCARRILES SIN ELECTROFICAR	-	600
FERROCARRILES ELECTRIFICADOS, TRANVIAS Y TROLEBUSES	-	200 ⁽¹⁾
RIOS Y CANALES NAVEGABLES	-	G+100 ⁽²⁾
CRUCE PERPENDICULAR CON LINEAS DE LA RED TELEFÓNICA FIJADAS SOBRE FACHADAS MEDIANTE AISLADORES	⁽³⁾	-

(1) Entre la línea de BT y los cables sustentadores o conductores de la línea. Siempre que se desconecte el elemento de toma de corriente deberá quedar a una distancia de la línea de B.T., no inferior a 30 cm.

(2) G es la altura entre la línea de flotación y el extremo del elemento de mayor altura de la embarcación. Cuando no exista G definida, se tomarán 6 m.

(3) La línea que cruce por encima, estará protegida con un manguito aislante de longitud no inferior a 0,40 m. La distancia se considera entre la línea que cruce por debajo y el manguito de protección.

1.7 Reglamento sobre Condiciones Técnicas y Garantías de Seguridad en Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación

En su apartado “2.3 Conducciones y almacenamiento de fluidos combustibles” del MIE RAT 14, trata las instalaciones eléctricas de interior, hace referencia específica a las galerías de servicio: “Las conducciones de fluidos combustibles, cuyas posibles averías puedan originar escapes de fluido que, por características, puedan dar lugar a la formación de atmosferas con riesgo de incendio o explosión, cumplirán los Reglamentos específicos que les sean de aplicación, deberán estar alejadas de las canalizaciones eléctricas de alta tensión, prohibiéndose terminantemente la colocación de ambas en la misma atarjea o galería de servicio”. Es práctica habitual dejar las conducciones de gas en el exterior de las galerías de servicio para compartir espacio con las líneas de alta tensión.

Los apartados 2.4 y 2.5 son también de aplicación a las galerías de servicio, y nos indican las posiciones relativas de las canalizaciones del resto de instalaciones urbanas en el interior. En el apartado “2.4 Conducciones y almacenamiento de agua” dice lo siguiente: “Las conducciones y depósitos de almacenamiento de agua se instalarán suficientemente alejados de los elementos en tensión y de tal forma que su rotura no pueda provocar averías en las instalaciones eléctricas. A estos efectos, se recomienda disponer las conducciones principales de agua en un plano inferior a las canalizaciones de energía eléctrica”. [Curiel y Cantó, 2002]

En el apartado 2.5 Alcantarillado, se cita; “La red general de alcantarillado, si existe, deberá estar situada en un plano inferior al de las instalaciones eléctricas subterráneas, pero si por causas especiales fuera necesario disponer en un plano inferior alguna parte de la instalación

eléctrica, adoptarán las disposiciones adecuadas para proteger a ésta de las consecuencias de cualquier posible filtración.

1.8 Normas MV Alumbrado Urbano

Las Normas MV de Alumbrado Urbano, en su artículo 4.3.6.1 Conducciones Subterráneas, especifica lo siguiente: “En los cruces con canalizaciones eléctricas o de otra naturaleza (agua, gas...) y de calzadas con vías de tránsito rodado, los cables se dispondrán siempre bajo tubos, que se rodearán con una capa de hormigón en masa con un espesor mínimo de 7 cm”. Para las conducciones constituidas por cables grapados sobre las paredes, en el punto 4.6.3.2 se indica que: “En los cruces con otras canalizaciones, eléctricas o no, se dejará una distancia de al menos 3 cm entre los cables y esas canalizaciones o se dispondrán un aislamiento supletorio”.

1.9 UNE 20435-2 Guía para Elección de Cables de Alta Tensión

La UNE 20435-2, hace referencia a la instalación de estos tendidos de conductores de energía eléctrica en galerías. Así en el apartado 3.1.2.1.2 Cables instalados al aire en canales o galerías, advierte lo siguiente “El calor disipado por los cables no puede difundirse libremente y provoca un aumento de la temperatura del aire”. Aparecen así en los puntos posteriores recomendaciones sobre distancias a mantener entre los cables eléctricos tendidos sobre bandejas. En el punto 3.1.2.2 Instalación enterrada, aborda el mismo problema pero en canalizaciones enterradas. [Curiel y Cantó, 2002]

2 FACTORES ERGONÓMICOS

La ergonomía se puede definir como la ciencia del acondicionamiento del entorno del lugar de trabajo del empleado. Lo que implica tanto el análisis de cómo se desarrollan las actividades a cómo el cuerpo interacciona con el equipo y el entorno.

Para el diseño de las galerías de servicio, hay que tener en cuenta, no solo los diferentes tipos de conductos y equipos auxiliares que emplean los servicios urbanos, también hay que reservar el espacio de trabajo necesario, desde el punto de vista ergonómico. Debe existir suficiente espacio vertical y horizontal para que el trabajador pueda entrar y abandonar la galería sin dificultad, reservando el suficiente espacio para las labores de revisión y mantenimiento de las mismas.

Son un ejemplo de puesto de trabajo confinado. Las galerías de servicio son accesibles por los trabajadores a lo largo de todo su recorrido.

Es imposible establecer un modelo definido de galería de servicio, por la diversidad de características existentes en las ciudades, y dentro de ellas en las diferentes zonas, como cascos antiguos, ensanches, barrios periféricos...

Se pueden apuntar una serie de recomendaciones, dentro de unos márgenes de movilidad:

Uso de galerías visitables por sus condiciones de accesibilidad

Distribución interior de servicios:

- Redes eléctricas, baja y alta tensión, comunicaciones y fibra óptica y redes propias de la galería anclada a las paredes laterales.
- Conductos de agua potable se sitúa sobre la solera, dispuesto sobre caballetes o ancladas a la pared lateral.
- Conducciones de gas, aparecen en pocos casos, recomendando su enterramiento en zanja o canal técnico a un costado de la galería.
- Alcantarillado, no aparece en el interior de las galerías, por motivos de pendientes.

Una vez analizado estos aspectos, podremos analizar los requerimientos ergonómicos.

2.1 Propuestas de diseño ergonómico en Galerías de Servicio

Estos requerimientos ergonómicos se basan en las dos causas fundamentales de enfermedades musculares: posturas inadecuadas, y las fuerzas mecánicas excesivas ejercidas por un operario al realizar cualquier tarea, como alzar una carga o usar una herramienta de mano. Se proponen las siguientes reglas de diseño:

Suficiente espacio vertical y horizontal para que el operario pueda acceder y abandonar la galería sin dificultad.

- a) Suficiente espacio para que el operario pueda realizar cualquier trabajo previsible en el interior de la galería. Hay que tener en cuenta el volumen de herramientas que debe transportar y los diferentes tipos de conductos y auxiliares que emplean los servicios urbanos.
- b) Espacio necesario entre conductos o bandejas debe ser el suficientemente amplio para permitir su manipulación por parte del operario y la manipulación de herramientas, con sus correspondientes movimientos de trabajo.
- c) Evitar el uso de bandejas o caballetes con excesiva profundidad. Son de difícil acceso y llegaría a sobrecargar la misma

2.2 Disposición de las bandejas

El uso de bandejas permite a los operarios mantener posturas de torso verticales. El operario, así, puede optimizar de forma segura su posición y levantar mucha más carga que cuando el torso se encuentra flexionado. Los sistemas de bandejas son muy útiles cuando sus contenidos pueden ser vistos y alcanzados sin obligar al trabajador a adoptar posturas anómalas. Los objetos pesados y largos, como los conductos para las instalaciones urbanas, es necesario que se encuentren a una altura que permitan al operario permanecer erecto. Los conductos deberán disponerse cerca del torso para que el operario no deba apoyarse en las bandejas para alcanzar una canalización. [Curiel y Cantó, 2002].

Se realizan las siguientes recomendaciones:

- a) Altura máxima de las bandejas, no debe ser superior a 1,90 m.
- b) La máxima profundidad de bandeja colocada a la altura del hombro, no debe superar los 30 cm.
- c) La bandeja situada entre hombros y cintura, no superará los 60 cm de profundidad.
- d) Las bandejas situadas debajo de la cintura, no sobrepasará una profundidad mayor de 45 cm.

3 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS GALERÍAS DE SERVICIOS PÚBLICOS

Las Galerías de Servicios son unas galerías construidas en el subsuelo urbano (el espacio situado por debajo de la cota cero) destinadas a ubicar las canalizaciones de los servicios públicos. Esta forma de ubicar los servicios públicos substituye a la tradicional, consistente en enterrar tuberías en el subsuelo sin más orden ni ley que los dictados por el principio del mínimo esfuerzo para "el que llega primero". Como resultado de este proceder, puede hablarse con propiedad de "la caótica situación en que se encuentran las canalizaciones de los servicios públicos enterrados en nuestras calles" [Acebillo, 1989].

A pesar de la antigüedad y de la importancia del problema del subsuelo urbano, no se encuentran antecedentes de análisis económicos relacionados con este peculiar espacio. Por este motivo, antes de abordar el problema de valorar las Galerías de Servicios, en la sección siguiente se describirá en términos económicos el subsuelo urbano, con el fin de disponer de una base teórica mínima.

3.1 Caracterización del subsuelo urbano

3.1.1 Los usos del subsuelo

El subsuelo urbano es un espacio, escaso y valioso, que constituye un conjunto de bienes distintos desde una perspectiva económica. [Pasqual, 1990]. En función del tipo de utilización pueden distinguirse tres usos principales del subsuelo:

- 1 - Contenedor de estructuras urbanas
- 2 - Contenedor de infraestructuras urbanas
- 3 - Reserva de espacio

El subsuelo urbano, como contenedor de estructuras, es un bien privado, substitutivo del vuelo (el espacio situado encima de la cota cero) y tanto más apreciado cuanto mayor sea la escasez de suelo edificable y cuanto mayores sean las restricciones de utilización del vuelo. Es un espacio privilegiado para la ubicación de almacenes, cámaras frigoríficas y refugios.

El subsuelo urbano, como contenedor de infraestructuras urbanas -ferrocarril, redes de servicios, etc.- deja de ser un bien privado para convertirse en hiperprivado, por cuanto el uso de una unidad de subsuelo comporta la inutilización de una cantidad mayor, debido a las interferencias -externalidades negativas- que una instalación provoca en las demás.

En consecuencia, la cantidad total de subsuelo ocupado frente al inutilizado dependerá tanto de la cantidad de servicios que albergue como, en especial, del modelo empleado para la ubicación de dichos servicios. La superioridad del modelo de galerías de servicios frente al sistema tradicional radica precisamente en la reducción del grado de hiperprivatización, definido como el cociente entre la disminución en la cantidad de espacio disponible para otros usos y el espacio total ocupado, lo que se traduce directamente en un ahorro de espacio.

La demanda de subsuelo urbano como contenedor de infraestructuras, [Pasqual, 1990] en una zona determinada, es creciente respecto a la cantidad de habitantes y de usuarios de la zona - depende fuertemente de la densidad- y de la renta de estos. Asimismo, las innovaciones tecnológicas que se producen en los servicios públicos y la cada vez mayor sensibilidad por la calidad del medio ambiente, que impide ubicar determinados servicios en el vuelo, como torres de alta tensión, provocan fuertes desplazamientos positivos de la demanda de subsuelo en las ciudades.

Las redes de servicios públicos presentan importantes peculiaridades que es preciso tener en consideración. El primer factor a destacar es la antigüedad en el uso del subsuelo, no sólo protagonizada por la red de saneamiento sino también por las de suministro de agua potable y electricidad. La existencia de instalaciones más que centenarias, junto con la multiplicidad y diversidad de actuaciones en el subsuelo a cargo de agentes distintos, junto con la ausencia de una regulación estricta de la ubicación de servicios en el subsuelo, obliga a plantearse la confección de un mapa del subsuelo con el fin de conocer la ubicación de cada servicio.

El segundo factor relevante es el fuerte condicionamiento que provoca una instalación en las siguientes. El problema de dos líneas distintas de ferrocarril que discurren por una misma cota y coinciden en un mismo punto, o incluso en una misma zona, no puede solventarse sin incurrir en fuertes costes. En menor medida, se plantea el mismo problema cuando se cruzan dos canalizaciones, máxime cuando deben guardar entre ellas una cierta distancia de seguridad.

Como reserva de espacio, el subsuelo urbano es un bien colectivo, lo que significa que el consumo de un individuo no disminuye el consumo que realizan los demás. Por supuesto, en cuanto se utiliza efectivamente esta reserva, disminuye la cantidad en reserva para todos los consumidores. La ciudad necesita de espacios de reserva tanto para la ubicación provisional de servicios, para ampliaciones y, sobretodo, para rediseñar las tramas urbanas con objeto de permitir la adaptación a nuevas necesidades.

Al tratarse de un bien colectivo, no es de esperar que el mercado proporcione cantidad alguna de espacio con este fin; por el mismo hecho, el ciudadano medio no destinará voluntariamente cantidad alguna para financiar dicho bien. En todo caso, ha de ser el sector público que, mediante el instrumento planificador y otros, cuide de la provisión de un bien que puede llegar a constituir un factor limitativo del desarrollo y de la modernización de la ciudad. Es preciso pues que la planificación urbanística tenga en consideración el subsuelo, de la misma forma que cuida de ordenar el vuelo. [Pasqual i Pinyol, 1990].

3.1.2 Precio y derechos de propiedad del subsuelo

Una característica del subsuelo urbano es la indefinición en los derechos de uso y propiedad del subsuelo público de la ciudad. Los derechos de propiedad del subsuelo municipal no están de forma clara en poder del municipio. En nuestro país, los derechos de propiedad los detenta en parte el estado español, al regular legalmente las condiciones y el precio de acceso al uso del subsuelo por parte de los principales usuarios, las compañías de servicios públicos.

Por otra parte, los propios usuarios directos, las compañías de servicios públicos, poseen en buena medida los derechos de propiedad por cuanto el municipio, en la práctica, no puede impedir el uso del subsuelo para ubicar servicios de primera necesidad, cuando y en la forma que las compañías de servicios públicos consideren necesario.

Las compañías de servicio compiten entre sí para acceder a los mejores espacios y, si una compañía de servicios públicos ubica una canalización en un espacio determinado, tal espacio queda en su poder durante un tiempo ilimitado, aunque la instalación quedara fuera de servicio. Si por razones de interés público el municipio instara a la compañías de servicios públicos a trasladar la instalación, en general, será el propio municipio el que deberá financiar la operación, por cuanto la compañías de servicios públicos, de algún modo, tiene parte de los derechos de propiedad del subsuelo de titularidad pública.

El creciente conflicto de intereses que confluyen en el subsuelo urbano de titularidad pública aconseja tratar de definir de la forma más nítida posible los derechos de propiedad. De otro modo, los fuertes costes de transacción pueden impedir actuaciones públicas altamente rentables. En particular, la buena o mala definición de los derechos de propiedad afecta a las asignaciones de este espacio al influir el precio del subsuelo.

Si el subsuelo urbano es un bien apreciado y escaso, tanto el precio empleado en las transacciones como el precio de cuenta o precio sombra para valorar este espacio en los proyectos públicos debería ser alto. [Pasqual i Pinyol, 1990]. Sin embargo, cuando uno de los agentes es el sector público, existe la tendencia a asignar un precio nulo al subsuelo (no se ha encontrado referencia alguna al precio del subsuelo en la literatura especializada, tampoco se ha hallado ningún caso de utilización).

Este hecho comporta fuertes inconvenientes. Por una parte, si el sector público ha de elegir entre dos proyectos y, por lo menos uno de ellos utiliza subsuelo, la información estará distorsionada en favor del proyecto que utiliza mayor cantidad de subsuelo. Al emplear un input productivo valorado a un precio nulo, se altera artificialmente el coste real y la rentabilidad consiguiente.

Un problema del mismo orden, la nula o inadecuada valoración del espacio ocupado, se presenta en proyectos que utilizan espacio en el vuelo sin ocupar los primeros niveles. En consecuencia, la valoración de proyectos alternativos, situado uno en el vuelo y ubicado el otro en el subsuelo, será infiel. Un caso típico sería la comparación de dos proyectos alternativos de líneas de alta tensión, uno aéreo y el otro con las líneas instaladas en una galería subterránea.

Por otra parte, en España, las compañías de servicios públicos, pagan al municipio un porcentaje predeterminado del total facturado, por el uso del vuelo y subsuelo públicos. Con independencia de que tal cantidad sea o no muy elevada, con este sistema resulta que las compañías de servicios públicos pagan un precio nulo por la ocupación del subsuelo público. En efecto, el precio, lo que se paga por el empleo de una unidad más, es nulo, porque las compañías de servicios públicos no pagan cantidad alguna por el uso de una porción adicional de subsuelo ni por la ocupación de un espacio determinado durante más tiempo. En consecuencia, el uso del subsuelo es necesariamente ineficiente por exceso, por cuanto se utilizará como si fuera un bien libre.

Una forma práctica de calcular el precio del subsuelo en una zona determinada, consiste en aplicar la siguiente fórmula [Pasqual y Riera, 1990]:

$$u = [p/(1+b)] - c$$

En donde **u**, el precio total del espacio ocupado en el subsuelo, está en función del precio total de una construcción en el subsuelo **p**, del beneficio del promotor **b** que se supone constante para cualquier edificación en el subsuelo o en el vuelo y del coste total de dicha construcción **c**.

El precio **u** estimado de esta forma es una aproximación al precio de mercado, el precio que determinaría el mercado específico que existe en la zona de donde se toman los datos. Nada tiene que ver pues, con el precio óptimo.

La asignación eficiente del subsuelo urbano entre los diversos usos alternativos, en una economía guiada por precios, precisa de un precio para el subsuelo urbano en cada zona de la ciudad. Esta información es necesaria no sólo para la selección de proyectos públicos sino también para la asignación de espacios entre los diversos usuarios del subsuelo.

3.2 Valoración económica de las Galerías de Servicios

La rentabilidad de las galerías de servicios se ha determinado examinando la variación en los costes y beneficios provocada por el hecho de ubicar las redes de servicios públicos en las galerías de servicios en lugar de emplear el sistema tradicional de conducciones enterradas. El ámbito temporal estimado del proyecto de galerías de servicios se establece en 50 años.

No se ha calculado la deseabilidad económica de las galerías de servicios frente a las conducciones aéreas, por cuanto la comparación de un proyecto debe realizarse en oposición al mejor proyecto alternativo, para no aumentar de forma artificial la rentabilidad. Se da por supuesto que el sistema de conducciones enterradas, en una ciudad, domina al de conducción aérea. Los agentes económicos involucrados son:

- a) Compañías de servicios.
- b) Usuarios de los servicios.
- c) Usuarios de la vía pública.
- d) Usuarios del subsuelo.

e) Administración local.

3.2.1 Costes y beneficios

Se han computado los conceptos de coste y beneficio tangibles y relevantes. Se han valorado los siguientes elementos de coste y beneficio:

- 1 - Ahorro en el espacio empleado
- 2 - Construcción
- 3 - Mantenimiento
- 4 - Substitución

1 - Ahorro en el espacio empleado. Al espacio efectivamente ocupado se le añade el espacio hipotecado (el que queda inutilizable para los demás usuarios, porque se trata de un bien hiperprivado), por ejemplo para respetar las distancias de seguridad entre dos conducciones de media tensión. Se ha calculado el precio del subsuelo urbano empleando la fórmula presentada en el Apartado 3.2.2, escogiendo como mejor alternativa la construcción de aparcamientos. El precio de venta de una plaza de aparcamiento es de $P = 15.000$ € (precio medio neto), el coste total es de $c = 7.200$ € suponiendo una tasa de rendimiento del 35%. Con estos datos resulta un precio total para el subsuelo de $u = 3.900$ €. El precio por metro cúbico se halla considerando el espacio total ocupado por una plaza de aparcamiento resultando un precio para el subsuelo urbano de 190 €/m³.

La diferencia de subsuelo ocupado entre los dos sistemas depende del volumen de zanjas que la galería de servicio pueda sustituir. La capacidad total de la galería de servicio no se emplea desde el primer período sino que se va ocupando paulatinamente, a medida que se van substituyendo los cables obsoletos enterrados. Se supone que en el primer año, la galería de servicio ahorra la única zanja para servicio telefónico y la mitad de las diez de electricidad. En este primer período, se produce un ahorro negativo de $3,15$ m³ de subsuelo por cada metro lineal de galería de servicio.

El coste de este espacio, en rigor, es privado. Sin embargo, dada la peculiar asignación de los derechos de propiedad, tiene el carácter de coste externo para los usuarios ya que el precio que pagan por el consumo de subsuelo es nulo.

2 - Construcción. Se consideran costes privados el coste de la obra civil (que incluye los accesorios, como iluminación, soportes, entradas y sistemas de seguridad) la longitud diferencial entre el sistema de galería de servicio y el tradicional. Se tiene también en consideración el coste externo que supone las perturbaciones que provocan las obras. El coste de material se supone idéntico en ambos sistemas.

Los costes externos, las molestias causadas por las obras, son mayores con el sistema tradicional. Se ha estimado que el coste para los residentes en la zona que está en obras es de un tercio del alquiler de su vivienda o comercio. Como la cifra resultante (unos 84.000 € para el sistema tradicional) es muy pequeña en términos relativos, este coste externo que se reduce con las galerías de servicio no se incorpora al cálculo de la rentabilidad. Por el mismo motivo y en aras de la simplicidad, tampoco se computa el coste para conductores y peatones, que es favorable a las galerías de servicio aunque resulta fácil de calcular, por otra parte.

3 - Mantenimiento. Las compañías de servicios no realizan trabajos de mantenimiento preventivo en ninguno de los dos sistemas. Se tienen en consideración únicamente los costes de mantenimiento de las propias galerías de servicio, que suponen 6.000€ por km al año aproximadamente, es decir, poco más de 150.000 € al año. El coste de las averías se reduce con el sistema de galería de servicio en un 80% para las conducciones eléctricas y en un 70% para comunicaciones respecto al sistema tradicional.

La reducción en el número de averías y el tiempo empleado en su reparación comporta una disminución de los efectos negativos debidos a la interrupción del servicio y a las obras de reparación. Con todo, estos costes externos no parecen muy importantes, porque el sistema de distribución en red permite suplir rápida y fácilmente un tramo averiado, y no se computan.

4 - Substitución. Se estima que la vida media de los cables es de 30 años. A medida que los cables ubicados mediante el sistema tradicional llegan al fin de su vida útil se van substituyendo, ubicándose en las galerías de servicio hasta ocupar su capacidad total. Por el sistema tradicional, la substitución afectaría a cinco zanjas de dos circuitos de 25 kv. Cada uno, lo que supone abrir una zanja y reponer los dos circuitos cada seis años.

El sistema de galería de servicio ahorra costes de reposición en cada uno de los años 2, 8, 14, 20, 26, 38 y 44. En el año 30 caducan las canalizaciones que se instalaron en el año 0; el coste de los materiales es el mismo en ambos sistemas por lo que el ahorro se reduce al coste de abrir y volver a cerrar cinco zanjas por el sistema tradicional y es favorable al sistema de galería de servicio. Simultáneamente, se va incrementando el ahorro en la cantidad de subsuelo ocupado con cada canalización que se ubica en la galería de servicio en lugar de seguirse el sistema tradicional en cada uno de los años 2, 8, 14, 20 y 26.

3.2.2 Cálculo de la rentabilidad

Como medida de rentabilidad se emplea la tasa interna de rendimiento. Se distinguirán dos tipos de rentabilidad, la privada, que solo contemplará costes y beneficios privados, y la social o total, que tendrá en consideración también los costes y beneficios externos. En este caso, de todos los flujos computados, únicamente el valor del subsuelo ahorrado con el sistema de galería de servicio tiene carácter de externo.

La tasa real de rentabilidad privada es del orden del 7% y la social o total tasa interna de rendimiento resulta superior al 30%, expresada también en términos reales partiendo de una ocupación del 6% de la capacidad de las galerías de servicio en el período uno. La rentabilidad efectivamente alcanzada es muy sensible al ritmo de ocupación de las galerías de servicio; así en el caso de ocupación completa desde el primer año las tasas de rentabilidad privada y social serían del orden del 40% y 900% respectivamente.

3.3 Financiación de las galerías de servicio

El cálculo de la rentabilidad privada de las galerías de servicios ofrece un resultado positivo para el conjunto de usuarios. La tasa de rendimiento interno de la inversión bajo hipótesis muy modestas es del 7% en términos reales, sin contar el beneficio que comporta el ahorro de espacio ocupado en el subsuelo. En consecuencia, los propios usuarios podrían financiar las galerías, por lo menos en parte, siguiendo el principio impositivo del beneficio.

No obstante lo anterior, la peculiar configuración de los derechos de propiedad proporciona un resultado desigual para cada usuario. En efecto, el sistema establecido legalmente para financiar las galerías, la Ley Reguladora de las Haciendas Locales 39/88, obliga a repartir el coste entre los usuarios – las compañías de servicios públicos - en proporción al espacio ocupado, con lo que se incumple el principio de equidad vertical. De esta forma, los servicios de comunicaciones obtendrían una muy alta rentabilidad al precisar poco espacio; para el suministro de agua potable el cálculo es claramente negativo y para el resto se obtienen resultados intermedios.

Por otra parte, el ahorro en el subsuelo ocupado es un beneficio externo debido a la forma legal de pago de las compañías de servicios públicos a los municipios. Si el titular de este espacio pudiera negociar el precio de uso, el beneficio no tendría carácter de externo para las compañías de servicios públicos sino que lo computarían adecuadamente como beneficio propio, lo que aumentaría de forma espectacular la rentabilidad privada. En consecuencia, superadas las limitaciones que impone actualmente el Sector Público, la iniciativa privada estaría interesada en el uso de las galerías de servicios.

En resumen, aunque la rentabilidad potencial de las galerías de servicios es alta, la forma de financiación de las galerías de servicios establecida en la Ley supone un freno importante al establecimiento de esta nueva tecnología urbana al imponer importantes transferencias económicas a las compañías de servicios públicos que requieren más espacio (suministro de agua potable) en beneficio de las que requieren menos (comunicaciones).

SEGUNDA PARTE: ESTIMACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE LAS GALERÍAS DE SERVICIO

En la actualidad la predicción de la vida útil de las estructuras representa un área de investigación reciente, no obstante está muy relacionada al concepto de durabilidad, el cual se viene estudiando desde hace muchos años.

Resulta compleja la predicción de la vida útil de toda la estructura, debido a diversos factores que son susceptibles de incidir en su determinación, entre los cuales están: los fenómenos mecánicos, funcionales, químicos o ambientales; de igual manera, añade complejidad a la predicción de la vida útil, el hecho de que los elementos estructurales pueden encontrarse sujetos a condiciones de utilización o bien de exposición ambiental diferentes y variables con el tiempo. Como consecuencia de esto, la obtención de datos necesarios para caracterizar cada caso, halla grandes dificultades tanto técnicas (limitaciones técnicas de medidas), como documentales (datos históricos insuficientes).

En el concepto de vida útil, es imprescindible fijar un valor mínimo aceptable de vida, elegido por la propiedad del proyecto: no hay estudios suficientes enfocados a la elección de las variables de control y fijación de los valores mínimos aceptables.

La estimación de la vida útil se ve limitada a distintos requerimientos, técnicos (no están relacionados con el uso de la estructura), funcionales (capacidad de la estructura para cumplir con las funciones para la cual ha sido diseñada) y económicos (coste de mantenimiento necesario para garantizar que la estructura siga en uso).

1 DIFERENTES MÉTODOS PARA LA PREDICCIÓN DE LA VIDA ÚTIL

Hasta la fecha los métodos propuestos para la predicción de la vida útil no se pueden considerar una ciencia exacta debido a los múltiples factores que hay que considerar, lo que hace de la predicción de la vida útil una actividad interdisciplinaria. Los principales métodos utilizados en la predicción de la vida útil se pueden dividir según los siguientes enfoques:

- **Métodos deterministas:** Los métodos deterministas se basan en el estudio de los factores que influyen en la degradación de los elementos estudiados, en la comprensión de sus mecanismos de actuación y, por último, en su determinación traducida en funciones de degradación. Los factores se traducen en fórmulas que expresan su acción en el tiempo, hasta que se alcanza el rendimiento mínimo aceptable del elemento estudiado. Estos métodos son fáciles de entender, pero están sujetos a diversas críticas sobre la simplicidad con la que se refieren a fenómenos complejos, como los fenómenos de degradación. Los métodos deterministas de durabilidad no tienen en cuenta la dispersión de la degradación (o el rendimiento o la vida útil). Con valores conocidos de los parámetros, el modelo abarca sólo un valor (de la degradación o el rendimiento o la vida útil), que es a menudo el valor medio. Debido

a esto, en muchos casos, la información obtenida por los modelos deterministas no es suficiente para evaluar el riesgo de no llegar a la vida útil objetivo.

El ejemplo más conocido de este enfoque es el método de los factores, el cual se explicará en profundidad más adelante por aparecer éste en la normativa ISO 15686 Parte 1.

- Métodos probabilísticos: Los métodos probabilísticos consideran la degradación como un proceso estocástico, donde se define la probabilidad de deterioro para cada propiedad durante un periodo de tiempo. Estos métodos, debido a la dificultad de aplicación en situaciones reales, sólo son rentables en proyectos a gran escala. Para la aplicación de métodos probabilísticos, es necesario poseer datos reales recogidos durante un dilatado periodo de tiempo. Este tipo de métodos sirven para mejorar la comprensión de los fenómenos físicos de degradación y deben ser utilizados para completar la experiencia y el conocimiento de los materiales. Se establecen tres inconvenientes que pueden producir una reducida aplicación de estos métodos: La complejidad de los métodos matemáticos utilizados; la necesidad de recopilación de un gran número de datos durante largos periodos de tiempo y la fuerte dependencia del trabajo de campo.

La norma ISO 15686 Parte 8 se establece que en la aplicación del método de los factores explicado en la ISO 15686 Parte 1 se puede utilizar distribuciones o funciones de probabilidad. De hecho se aportan ejemplos de esta aplicación, los cuales se resumirán en apartados posteriores.

El modelo más utilizado en los métodos probabilísticos es el *modelo de Markov*:

- *Modelo de Markov*: Este método se basa en la hipótesis de que un modelo de deterioro se puede definir a partir de un número limitado de condiciones. El modelo de Markov supone que el deterioro es un proceso estocástico que se rige por variables aleatorias. La estructura se puede dividir en un número de componentes, que se deterioran al azar. Para cada componente se establecen los parámetros principales de la degradación, junto con las variables de deterioro, todo ello en función del tiempo. En la norma ISO 15686 Parte 7 se propone este modelo en el anejo B en la predicción de la vida útil residual. En la figura siguiente se muestra una función de deterioro utiliza dando siete etapas:

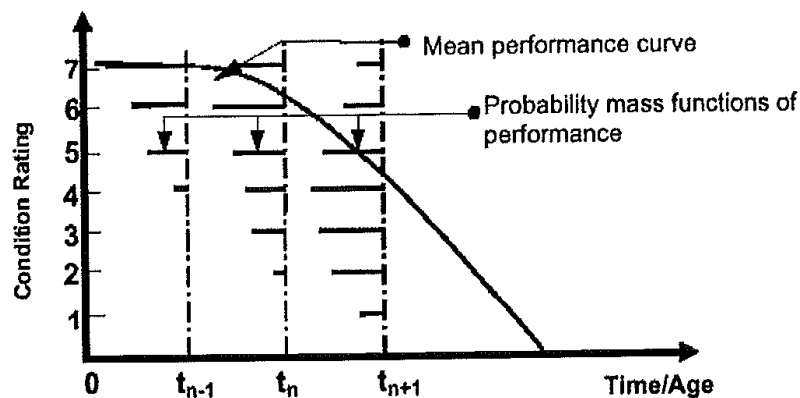


Figura 1. Función de deterioro de Markov

- Métodos de ingeniería: Tras la explicación de los métodos deterministas y los métodos probabilísticos, es necesario identificar otro método que armoniza los dos métodos anteriores. Así surgieron los métodos de ingeniería que son de fácil aplicación como el método de los factores, y además describen los procesos de degradación de una forma probabilística. Los métodos de ingeniería se pueden utilizar para identificar los fenómenos de degradación de forma más analítica, pudiendo así controlarlos en proyecto a través de la planificación del mantenimiento. Algunos de los métodos de ingeniería más conocidos son:
 - Análisis Modal de FALLOS y Efectos del Proceso AMFE (Fail Modeeffects Análisis FMEA): Desarrollado inicialmente en los años sesenta en el sector aeronáutico, su transposición al mundo de la construcción ha sido reciente y ha consistido en su utilización en la evaluación de la vida útil de productos. Uno de los objetivos de este método es obtener una lista lo más completa posible de los agentes de degradación que pueden operar en los edificios durante su fase operativa.
 - Método de Estados Límite (Performance Limits Methods). Este método pretende evaluar la durabilidad de los elementos de construcción mediante la simulación de su comportamiento en el tiempo, hasta que llegue al final de su vida útil. En este método, el fenómeno de degradación se mide por una cadena de relación:
Agentes → Acciones → Efectos → Degradación

La siguiente figura describe la relación entre los diferentes enfoques:

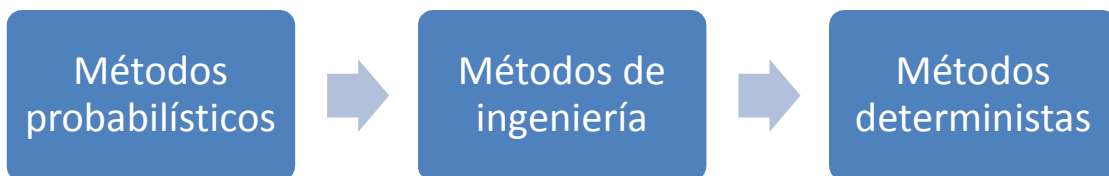


Figura 2. Relación entre los diferentes métodos de predicción de la vida útil.

Estos tres enfoques sientan las bases para el desarrollo de métodos de predicción de vida útil de diferente complejidad, con diferentes requisitos de aplicación y con diferente necesidad de entrada de datos.

1.1 ANTECEDENTES

La importancia de la predicción de la vida útil se refleja en diversas iniciativas y actividades que se han desarrollado en las últimas décadas. Hay que destacar que fue a partir de la década de 1990 cuando realmente se comienza a investigar en el campo de la durabilidad y la vida útil de los elementos constructivos y materiales.

Algunas de éstas se mencionan brevemente en los siguientes párrafos:

- Los conceptos de vida útil y durabilidad han formado parte del lenguaje de la construcción desde hace 50 años. R. Legget fue el primero en hablar de durabilidad, o más apropiadamente de vida útil, como un campo de investigación específico en la década de 1950 [Legget and Hutcheon 1958]. Estos primeros esfuerzos dieron paso a diferentes proyectos de investigación.
- Muchas de las actividades se iniciaron después de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD) que tuvo lugar en Río de Janeiro, Brasil, 1992. Esta conferencia dio como resultado dos acuerdos internacionales, dos declaraciones de principios y una Agenda para un Desarrollo Global Sostenible, la Agenda 21.
- Actividades de I+D dentro de CIB “International Council for Research and Innovation in Building and Construction”, especialmente las comisiones de trabajo W60 “Performance concept in building”, W70 “Management, maintenance and modernisation of building facilities”, W80 “Prediction of service life of building materials and complements”, y W094 “Design for durability”. El trabajo del grupo W080 se lleva a cabo en colaboración con un Comité Técnico de RILEM “International Association for Building Materials and Structures”. El número y el título de la comisión mixta es W080/RILEM 175-SLM “ServiceLifeMethodologies”. Una de las actividades de mayor relevancia de este comité ha sido el respaldo de las conferencias relativas a la durabilidad de materiales y elementos constructivos llevadas a cabo en los últimos 30 años que han proporcionado una gran masa de conocimiento. Destacan 12 conferencias internacionales.
- RILEM “International Association for Building Materials and Structures” publicó en 1989 un documento de recomendaciones para la estimación de la vida útil de los sistemas y materiales de construcción [Masters and Brandt 1989]. Este documento fue la base para el desarrollo de las normas para la estimación de la vida útil dentro de ISO “International Organization for Standardization”.
- Trabajos de normalización internacional con las normas ISO: En 1984, ISO publicó una norma que describe los principios para la elaboración de normas ISO 6241 “Performance standards in building – Principles for their preparation and factors to be considered”. En la norma, se presentan los agentes que influyen en la durabilidad de los edificios como por ejemplo, la exposición a los agentes atmosféricos. El comité técnico más relevante constituido sobre la vida útil para el sector de la construcción es TC 59 “Building Construction”, donde un subcomité, SC 14 “Designlife”, está trabajando exclusivamente en la vida útil. Durante la última década se han ido editando una serie de normas para la planificación de la vida útil de los edificios:
 - ISO 15686-1 General principles [ISO 2000]: Contiene los principios generales para la planificación de la vida útil. La norma es aplicable tanto a las nuevas construcciones como a la rehabilitación de edificios existentes. El método de los factores se describe en un anexo. La norma sugiere una serie de valores para la vida de diseño de distintos tipos de edificios.

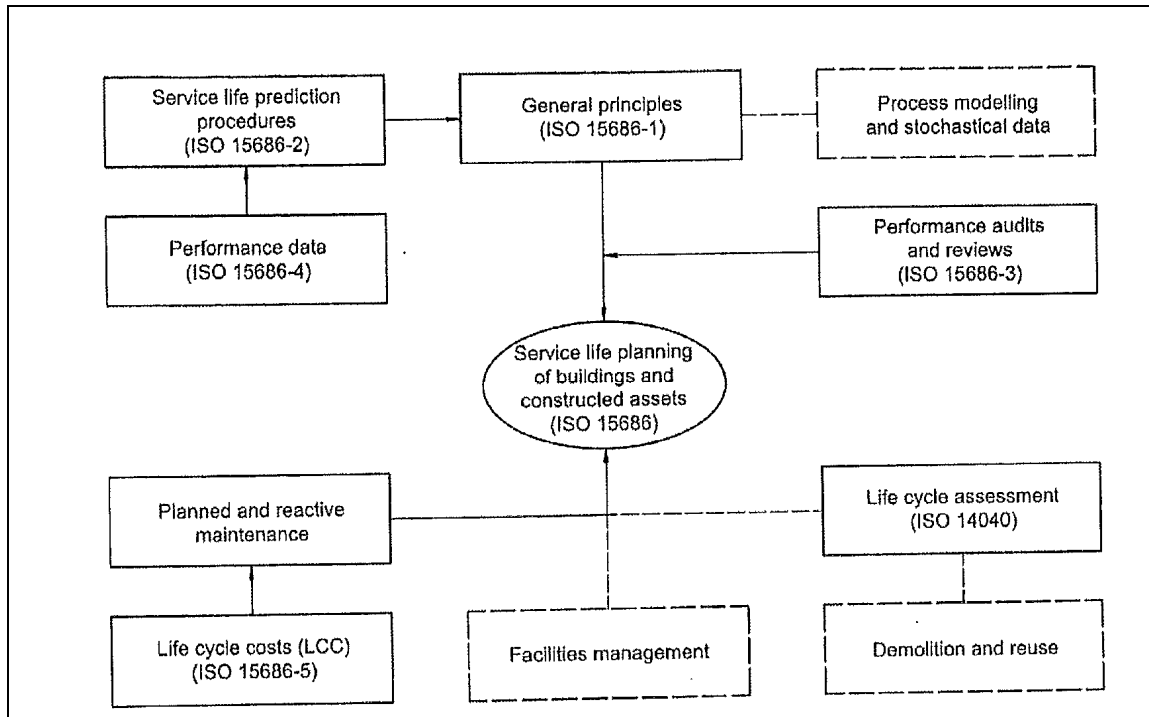


Figura 3. Esquema sobre normas ISO 15686-1

- ISO 15686-2 Service life prediction procedures [ISO 2001]: Describe procedimientos generales que facilitan la predicción de la vida útil de los elementos constructivos basándose en la [Masters and Brant 1989]. Este documento no describe en profundidad las técnicas de predicción de vida útil, principalmente se centra en establecer una metodología a la que puedan acogerse en la redacción de normativas, fabricantes,...etc, para establecer una vida útil de referencia que poder utilizar para hacer una predicción de la vida útil según el método de los factores.
- ISO 15686-3 Performance audits and reviews [ISO 2002]: se ocupa de asegurar la aplicación efectiva de la planificación de la vida útil. En ella se describe el enfoque y los procedimientos que deben aplicarse para la toma de datos previa, el diseño, la construcción y, en su caso, la inspección, mantenimiento y el derribo de los edificios. También se tratan las consecuencias económicas de la planificación la vida útil.
- ISO 15686-4 Data Dictionary: Está en desarrollo. Se trata de un catálogo de datos de vidas útiles.
- ISO 15686-5 Wholelifecycloosting [ISO 2008a]: da las pautas para la realización del coste del ciclo de vida (LCC).
- ISO 15686-6 Procedures for considerin genviron mental impacts [ISO 2004]: describe como evaluar, en la fase de diseño, los impactos ambientales potenciales de los diseños alternativos de un bien construido. Identifica la relación entre la evaluación ambiental del ciclo de vida y la planificación de la vida de servicio (SLP).
- ISO 15686-7 Performance evaluation for feed baak of service life data frompractise [ISO 2006]: Proporciona una base genérica para la retroalimentación de los datos

de la vida útil de los edificios existentes y los activos de construcción, incluida la definición de los términos que se utilizarán.

- ISO 15686-8 Referencie service life [ISO 2008b]: Proporciona orientación para la selección y el formato de la vida de servicio de referencia y sobre la aplicación de estos datos para el cálculo de la vida útil estimada utilizando el método de los factores. La ISO 15686-8 no orienta como calcular los factores modificadores.
- ISO 15686-9 Guide of service life the clarations for building products [ISO 2008c]: sirve de guía para la obtención y representación de los datos de la vida de servicio de referencia. Es aplicable para los fabricantes que pretendan aportar datos sobre la vida útil de referencia para su uso en la planificación de la vida útil, de conformidad con la norma ISO 15686-1, ISO 15686-2, ISO 15686-3, ISO 15686-5, ISO 15686-6, ISO 15686-7 e ISO 15686-8.
- ISO 15686-10 Serviceability: Establece cuando se deben ensayar los materiales a lo largo de su vida útil para verificar su correcto funcionamiento.
- ISO 15686-11 Terminology: Está aún en desarrollo. Establece la terminología.
- En 1988, la Comisión de la Unión Europea (UE) adoptó la Directiva sobre productos de la construcción 89/106/CEE relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados Miembros sobre los productos de construcción [Unión Europea, 1988]. Dentro de la directiva, se definen seis requisitos esenciales que deben cumplirse en un edificio durante la vida útil. Los requisitos esenciales se explican más en detalle en los seis documentos interpretativos [Unión Europea, 1994]. El objetivo principal de los documentos interpretativos es establecer el vínculo entre los requisitos esenciales y los mandatos que la Comisión da a los organismos europeos de normalización para establecer normas armonizadas y para que la Organización Europea “EuropeanOrganizationforTechnicalApprovals” establezca directrices para la idoneidad técnica europea. En España el Código Técnico de la Edificación el que armoniza la normativa en esta materia con la Directiva, transpuesta al derecho interno mediante el Real Decreto 1630/1992, de 29 de Diciembre, sobre disposiciones para la libre circulación de productos de construcción. Actualmente se está llevando a cabo la redacción de una nueva propuesta “Construction Products Regulation” que reemplazará a la actual próximamente.
- En Japón se lleva trabajando desde hace décadas sobre cómo tratar con los métodos para predecir la durabilidad y la vida útil de los materiales y los edificios, tanto en el diseño como en la fase de mantenimiento de un edificio. El resultado de las investigaciones fue expuesto en la publicación “Principal Guide” en 1989 que más tarde fue resumida en una versión abreviada en inglés en 1993. Esta Guía tiene como propósito principal mostrar establecer una definición de durabilidad mediante la definición de cada etapa del ciclo de vida de los edificios, tales como la planificación, el diseño, la construcción, el uso, el mantenimiento, la modernización y la demolición.
- En muchos países se están haciendo esfuerzos para establecer una normativa que permita direccionar el estudio de la durabilidad y la vida útil hacia la planificación, el diseño, la construcción el uso de un edificio. En Nueva Zelanda, se introdujeron requisitos cuantitativos para la vida útil de los sistemas constructivos en el Código de Construcción en 1992. El Reino Unido publicó una norma en 1992 para la predicción de la durabilidad y la vida útil de los edificios, sistemas, productos y materiales de

construcción. En Canadá se publicó una norma similar en 1995. En Noruega, se ha publicado una normativa con las especificaciones para operaciones de mantenimiento y rehabilitación de edificios, obras de ingeniería civil y condiciones para el control de obra.

- En 1996, durante el Simposio Intenacional “Applications of the performance concept in building” organizado en Israel, se identificó la necesidad de establecer la vida útil de diseño y se comenzó a trabajar en una estandarización. Nireki [1996] Propuso varios enfoques para resolver los problemas de durabilidad y vida útil, y estableció las necesidades para continuar la línea de investigación. En 1997, se llevó a cabo un estado del arte sobre la vida útil de diseño.
- La Organización Europea de Aprobación Técnica (EOTA) se estableció bajo disposición de la Directiva del Consejo de la Unión Europea 89/106/CEE [Unión Europea, 1988]. Su ámbito de aplicación es la producción de las Directrices de Aprobación Técnica Europea (ETAG) para la reparación y la concesión de idoneidad técnica europeos (ETA). EOTA publicó unos documentos que describen la forma de evaluar la vida útil de los productos relacionados a la durabilidad. Este documento se basa en documentos publicados por RILEM e ISO mencionados anteriormente.
- En 1999, la Comisión Europea publicó un documento de orientación [CE 1999] en relación con la durabilidad y la Directiva sobre productos de construcción [Unión Europea, 1988]. El alcance de este trabajo abordó la cuestión de la durabilidad en el contexto de la aplicación de la Directiva 89/106/CEE. El documento está destinado a las autoridades dentro de la Unión Europea.
- En 2001 se inició en la UE la red temática PeBBu (Performance Based Building) como parte del quinto marco de la CE para I investigación temática sobre Crecimiento Competitivo y Sostenible. El objetivo del PeBBu en el campo temático de los elementos y materiales de construcción es abordar las cuestiones relacionadas con la mejora y adopción de la norma ISO 15686. El impulso para esta iniciativa surgió de la Directiva Europea de Productos de Construcción [Unión Europea, 1988]: Al especificarse en la directiva europea los requisitos esenciales que deben cumplir las construcciones durante su vida útil se establece la necesidad de establecer requisitos a todos los productos de la construcción.

1.2 LA NECESIDAD DE HERRAMIENTAS PARA LA PREDICCIÓN DE LA VIDA ÚTIL

Muchas de las actividades y los documentos mencionados en el apartado anterior muestran el estado de las necesidades en la predicción de la vida útil de los productos y sistemas constructivos. La mayoría de ellos describen requisitos generales o específicos a nivel nacional o regional y al mismo tiempo reflejan una importante y creciente tendencia a centrarse en esta cuestión. En este capítulo, se presentan algunos de los requisitos para ilustrar cómo se han expuesto éstos.

Unión Europea

En Europa, la Directiva sobre productos de construcción CPD [Unión Europea, 1988] afirma que cualquier tipo de producto de la construcción que está cubierto por el CPD, deberá tener

propiedades de tal manera que el edificio o estructura sea capaz de cumplir los requisitos esenciales, específicamente en relación con:

1. Estabilidad y resistencia mecánica
2. Seguridad en caso de incendio
3. Higiene y salubridad
4. Seguridad de utilización
5. Protección contra el ruido
6. Ahorro de energía

Los requisitos deberán cumplirse durante el periodo de vida de los productos económicamente razonable. El concepto de la vida de trabajo correspondiente a la vida útil. Cada uno de los seis requisitos esenciales se explican con más detalle en seis documentos correspondientes [Unión Europea, 1994]. Estos documentos contienen especificaciones de lo que se entiende por vida útil y de cómo tratar las cuestiones referentes a la durabilidad de los productos de construcción. En estos documentos se dan las siguientes definiciones de vida útil:

“1.3.5 Vida útil económicamente razonable:

- (1) *La vida útil es el periodo de tiempo durante el cual el uso del edificio se mantiene a un nivel compatible con el cumplimiento de los requisitos esenciales.*
- (2) *Una vida útil económicamente razonable supone que todos los aspectos relevantes se tienen en cuenta, tales como:*
 - *Costes de diseño, construcción y uso.*
 - *Costes derivados de los riesgos y consecuencias derivadas del uso del edificio durante su vida útil.*
 - *Costes de seguros que cubran estos riesgos.*
 - *Costes de inspecciones, mantenimiento, cuidado y reparaciones.*
 - *Costes de administración, disposición y aspectos medioambientales.”*

Los documentos interpretativos, también contienen los siguientes comentarios sobre la vida útil y la durabilidad:

“5.1 Tratamiento de la vida útil en el sector de la construcción en relación a los requisitos esenciales

- (1) *Corresponde a los Estados miembros, cuando y donde lo consideren necesario, tomar medidas relativas a la vida útil que puede considerarse razonable para cada tipo de construcción, o para algunas de ellas, o partes de ellas, en relación con el cumplimiento de los requisitos esenciales.*
- (2) *Cuando las previsiones sobre la duración de las construcciones en relación con la del requisito esencial se relacionan con las características de los productos, los mandatos para la preparación de las normas y directrices para la Idoneidad Técnica Europea relacionada con estos productos, también cubrirá aspectos de durabilidad.*

5.2 Tratamiento de la vida útil de los productos de construcción en relación con los requisitos esenciales.

- (1) *Las especificaciones y directrices para la aprobación técnica europea deben incluir indicaciones sobre la vida útil de los productos en relación con los usos previstos y los métodos para su evaluación.*
- (2) *Las indicaciones dadas sobre la vida útil de un producto no pueden ser integradas como garantía otorgada por el fabricante, sino que se considera sólo un medio para elegir los productos adecuados en relación con las expectativas de vida útil económicamente razonable de la construcción.”*

La Directiva sobre productos de la construcción en la actualidad es una base para las normativas de los sectores de la construcción en los países que conforman la Unión Europea, y por tanto los requisitos de durabilidad y vida útil de los productos de construcción se han incorporado en las normativas relativas a la construcción de toda Europa. En España es el Código Técnico de la Edificación el que armoniza la normativa en esta materia con la Directiva, transpuesta al derecho interno mediante el Real Decreto 1630/1992, de 29 de diciembre, sobre disposiciones para libre circulación de productos de construcción.

En la “GuidancePaper” [CE 1999] publicado por la UE en 1999, se aporta una tabla de vidas útiles establecida para los elementos constructivos.

VIDA ÚTIL ESTIMADA DE LOS EDIFICIOS (AÑOS)		VIDA ÚTIL ESTIMADA DE ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS (AÑOS)		
CATEGORIA	AÑOS	CATEGORIA		
		<i>Reparable o fácilmente reponible</i>	<i>Menos fácilmente reparable o reponible</i>	<i>Elementos no reparables o de sustitución no viable económicamente</i>
CORTO	10	10*	10	10
MEDIO	25	10*	25	25
NORMAL	50	10*	25	50

*En casos excepcionales y justificados, se pueden establecer una vida útil de 3 ó 6 años.

Figura 4. Vida útil de las construcciones y elementos constructivos

La European Organization for Technical Approvals (EOTA) publicó un documento de orientación en 1999 [EOTA 1999b] que presenta la vida útil supuesta para edificios y materiales de construcción. La tabla recuerda a la publicada en [CE 1999] ya que fue la propia EOTA la encargada de su elaboración. La vida útil se muestra en la siguiente Tabla:

VIDA ÚTIL HIPOTÉTICA (AÑOS)		VIDA ÚTIL DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PARA SER ASUMIDA EN ETAFS, ETAS Y HENS (AÑOS)		
CATEGORIA	AÑOS	CATEGORIA		
		<i>Reparable o fácil de reponer</i>	<i>Reparable o reemplazable con algunos esfuerzos</i>	<i>Permanente²</i>
CORTA	10	10 ¹	10	10
MEDIA	25	10 ¹	25	25
NORMAL	50	10 ¹	25	50
LARGA	100	10 ¹	25	100

¹ En casos excepcionales y justificados, por ejemplo, para determinados productos de reparación, se permite una vida útil de 3 años (cuando así se acuerde por la EOTA TB o CEN, respectivamente).

² Cuando no es reparable o fácilmente reemplazable.

Figura 5. Vida útil hipotética de los edificios y materiales de construcción

Reino Unido

También en 1992 se publicó la normativa británica British Standard BS 7543:1992 [BSI 1992] donde se afirma que los requisitos de durabilidad son muy diferentes en función del tipo de edificio y del tipo de elemento. Los requisitos dependerán del uso del edificio, de la financiación y del mantenimiento que se vaya a llevar a cabo. Según la norma será el propietario del edificio el que establezca la vida útil necesaria del mismo. El arquitecto debe tener información sobre la durabilidad para satisfacer las necesidades del propietario del edificio y para desarrollar una política racional para la durabilidad del edificio. En lo referente a los requisitos de durabilidad según el tipo de edificio y componente, se publican las siguientes tablas relativas a la vida de diseño del edificio y de sus componentes:

CATEGORIA	DESCRIPCIÓN	VIDA ÚTIL DE DISEÑO PARA EDIFICIOS	EJEMPLOS
1	Temporales	hasta 10 años	Construcciones no permanentes Los edificios de exposiciones temporales
2	Vida Corta	mínimo de 10 años	Aulas temporales
3	Vida Media	mínimo de 30 años	La mayoría de los edificios industriales Rehabilitaciones de edificios de viviendas

4	Vida Normal	mínimo de 60 años	Centros sanitarios Centros educativos Edificios de viviendas de nueva planta Rehabilitaciones de edificios públicos
5	Vida Larga	mínimo de 120 años	Edificios públicos y otros de alta calidad

Nota 1: Se determinarán los periodos específicos en las categorías 2-5, asegurándose de que no se exceda el periodo sugerido para la categoría siguiente en la tabla.

Nota 2: Los edificios pueden incluir elementos fungibles y que requieran de un mantenimiento.

Figura 6. Categorías de la vida de diseño para edificios

CATEGORIA	DESCRIPCIÓN	VIDA ÚTIL	EJEMPLOS
1	Reemplazables	De vida más corta que la vida útil del edificio cuyo reemplazo puede ser previsto en la etapa de diseño	Los pavimentos y determinado componentes de las instalaciones
2	Mantenibles	Con un mantenimiento adecuado y periódico tendrá una durabilidad al menos equivalente a la vida útil del edificio	La mayoría de revestimientos exteriores y las ventanas y puertas.
3	Larga vida	Su vida útil es al menos la del edificio	Las cimentaciones y demás elementos estructurales.

Figura 7. Categorías para la vida de diseño de los diferentes componentes.

Canadá

La normativa canadiense CSA 478-95 [CSA 1995] define la vida útil como:

“El periodo de tiempo durante el cual el edificio ó cualquiera de los elementos constructivos se desenvuelve sin costes imprevistos ó trastornos en el mantenimiento.”

En el Capitulo 6, de la misma, describe la relación entre la vida de diseño de un edificio o un elemento constructivo, y la durabilidad de los materiales:

“6.1 Edificios y elementos constructivos

Los requisitos para la durabilidad pueden variar de un edificio a otro y de un elemento constructivo a otro. Estos requisitos están relacionados con el uso previsto, con su coste, y con la frecuencia, la dificultad y la accesibilidad de cara al mantenimiento, sustitución y reparación. Los requisitos de durabilidad se expresan en términos de vida útil de diseño. La vida útil de

diseño del edificio ofrece la base para la determinación de la vida útil de diseño de los elementos constructivos.”

Los datos sobre vida útil de diseño más comunes para los edificios que se dan en la norma se muestran en la siguiente tabla, que de alguna forma recuerda a la publicada en la normativa británica [BSI 1992]:

CATEGORIA	VIDA ÚTIL DE DISEÑO PARA EDIFICIOS	EJEMPLOS
Temporales	Hasta 10 años	Construcciones no permanentes: Oficinas de ventas, barracas. Los edificios de exposiciones temporales.
Vida Corta	De 10 a 24 años	Aulas temporales.
Vida Media	De 25 a 49 años	La mayoría de los edificios industriales. La mayoría de aparcamientos.
Vida Larga	De 50 a 99 años	La mayoría de los residenciales, comerciales, edificios de oficinas. Centros sanitarios y centros educativos. Aparcamiento de bajo edificios diseñado para larga vida.
Permanente	Duración mínima	Edificios monumentales: Museos nacionales, galerías de arte, archivos... Edificios de patrimonio.

Figura 8. Cat. de la vida útil de diseño para edif. en Norma CSA 478-95.

Australia

El Código de Edificación australiano, Australian Building Codes Board, ABCB, incorpora, *“Guide line On Durability In Buildings”* (Guía sobre la durabilidad de las edificaciones). Esta guía se desarrolló en respuesta a preocupaciones del gobierno en materia de durabilidad, identificada por la industria de la construcción como una cuestión que requiere de orientación nacional uniforme. La guía aborda la durabilidad en términos genéricos y proporciona mejores prácticas y consejos. La norma es de carácter no obligatorio y con intención de orientar sobre la durabilidad. La expectativa de la ABCB es que la industria utilice el documento para desarrollar soluciones relevantes sobre la durabilidad de los materiales específicos de conformidad con los principios genéricos y criterios contenidos en las Directrices. El documento fue elaborado en consulta con la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation y varias asociaciones de la industria.

Nueva Zelanda

En 1992 se publicó un nuevo Código de Edificación en Nueva Zelanda [*Building Industry Authority, 1992*] que contiene requisitos específicos para la vida útil de las diferentes partes de un edificio y para materiales de construcción. En la clausula B2 Durabilidad, se establece los requisitos de la siguiente forma:

“B2. 3.1 Los elementos constructivos deben, con solo el mantenimiento normal seguir cumpliendo con los requisitos de uso de este código para la menor vida útil especificada del edificio, de haber sido establecida, o bien:

- a) *Una vida del edificio no inferior a 50 años, si:*
 - (i) *Los elementos constructivos proporcionan estabilidad estructural a la construcción.*
 - (ii) *Los elementos constructivos son de difícil acceso o difícil de reemplazar.*
 - (iii) *El fallo de estos elementos constructivos cumpliendo con la norma no se detectarían durante el uso normal y mantenimiento del edificio.*
- b) *15 años, si:*
 - (i) *Los elementos constructivos son moderadamente difícil de acceder o reemplazar.*
 - (ii) *El fallo de los elementos constructivos cumpliendo con la norma no se detectarían durante el uso normal de los edificios, pero si durante el mantenimiento normal.*
- c) *5 años, si:*
 - (i) *Los elementos constructivos son de fácil acceso y reemplazo.*
 - (ii) *El fallo de elementos constructivos cumpliendo con la norma se detectarían fácilmente durante el uso normal del edificio.*

B2. 3.2 Los elementos constructivos que son componentes de un sistema y son de difícil acceso o sustitución deberán:

- a) *Tener toda la misma durabilidad.*
- b) *Instalarse de forma que permita la sustitución de los elementos de menor durabilidad sin retirar elementos que tienen mayor durabilidad y no están diseñados específicamente para la eliminación y sustitución.”*

Normativa ISO

La norma ISO 15686 Parte 1 [ISO 2000] contiene una tabla de sugerencias para vidas de diseño mínimas para elementos constructivos:

VIDA DE DISEÑO DEL EDIFICIO	COMPONENTES			INSTALACIONES
	INACCESIBLE O ESTRUCTURAL	REPOSICIÓN CARA O DIFÍCIL*	FACIL DE REPONER	
ILIMITADA	ILIMITADO	100	40	25
150	150	100	40	25
100	100	100	40	25

60	60	60	40	25
25	25	25	25	25
15	15	15	15	15
10	10	10	10	10

Nota 1: Componentes fáciles de reponer pueden tener vidas de diseño de 3 a 6 años.

Nota 2: La vida de diseño ilimitada debe ser raramente utilizada, ya que reduce considerablemente las condiciones de diseño.

*Incluyendo el drenaje de agua bajo tierra.

Figura 9. Sugerencias de vida de diseño mínimas por componentes

La tabla anterior sugiere unas vidas mínimas de diseño de algunos componentes del edificio en función de la vida de diseño que se establezca para el mismo, basándose en su accesibilidad para el mantenimiento. En la norma no se establece en función de que parámetro se le debe asignar a un edificio una u otra vida de diseño, sino que una vez decidida una vida de diseño establece la vida útil de sus componentes. Hay que puntualizar que la vida útil de un edificio está limitada por la degradación de sus componentes no reemplazables.

1.3 CONCEPCIÓN DE FIN DE LA VIDA ÚTIL

Todos los métodos de diseño requieren una definición clara del final de la vida útil. Sin embargo este término no es universal ni es fácil de definir. En términos generales, es el punto en el tiempo cuando la función para la que fue concebido un edificio ya no es útil.

La Directiva sobre los productos de la construcción [CPD1993] aboga por la vida útil como el periodo de tiempo durante el cual los requisitos esenciales se cumplen, por lo que se desprenden, de esta definición que el final de la vida útil se dará cuando los requisitos generales dejen de cumplirse.

Las propiedades de los diferentes elementos constructivos del edificio pueden determinar diferentes definiciones para el final de la vida útil:

- **Seguridad:** No se alcanza el final de la vida útil de un elemento mientras la integridad de esa parte del edificio se mantiene en el nivel estándar de seguridad.
- **Función:** No se alcanza el final de la vida útil de un elemento mientras la función proyectada se cumple, (es decir, una ventana puede ser fácilmente abierta y cerrada, etc).
- **Aspecto:** No se alcanza el final de la vida útil de un elemento mientras se mantenga el aspecto previsto, (es decir, la superficie de esa parte del edificio es de apariencia aceptable, los cristales de las ventanas no se han deteriorado o se han vuelto opacos, etc.).

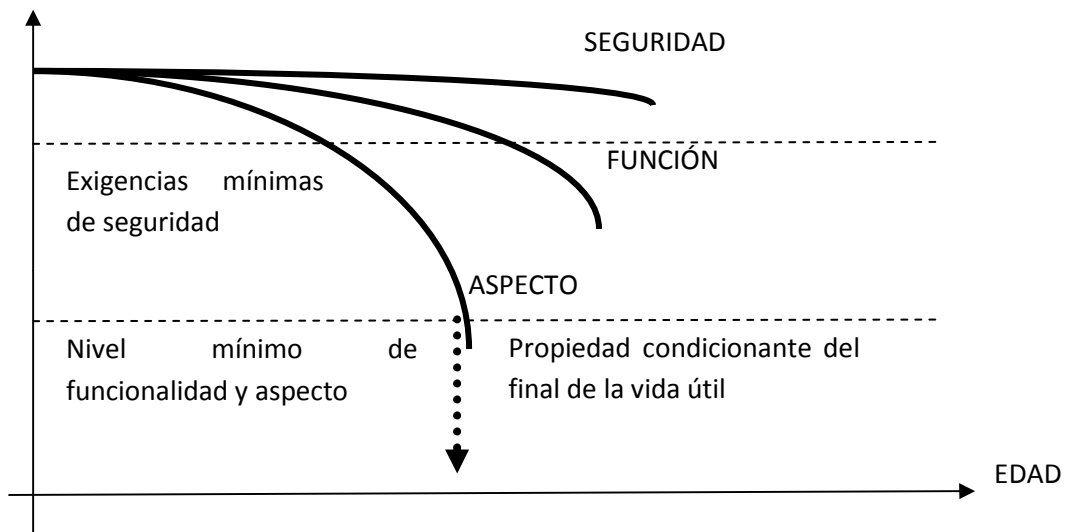


Figura 10. Degradación de las propiedades de un elemento constructivo Ferreira [2009]

En ingeniería estructural, dependiendo de la función de la parte del edificio o del tipo de estructura, a menudo se utilizan criterios de ingeniería para establecer el final de la vida útil, a fin de permitir un cálculo indicador de la vida útil como tal. A modo de ejemplo se muestran criterios típicos para establecer el final de la vida útil en el campo de las estructuras:

- Se pueden considerar el final de la vida útil de una estructura un recubrimiento mínimo de hormigón en las armaduras para un entorno determinado. Esta definición es una práctica estándar en base a la experiencia, pero no está basada en una vida útil específica claramente definida.
- Se puede considerar el final de la vida útil de una estructura la llegada del frente de carbonatación a la cara exterior de las armaduras.
- Se puede considerar el final de la vida útil de una estructura la toma de contacto de cloruros con la cara exterior de la armadura.
- Se puede considerar el final de la vida útil de una estructura el inicio de desprendimientos.

Aikivuori en *“Criticalloss off performance-whatfailsbeforedurability”* [1999] puntualizó, que rara vez, la vida útil es alcanzada por la durabilidad, pues los componentes se reponen antes debido a otras razones, lo que le lleva a cuestionar el concepto de vida útil establecido:

“Se han llevado a cabo investigaciones para averiguar las razones reales que llevan a los propietarios a reformar sus viviendas. Estas investigaciones han demostrado que la gran mayoría de las reformas se realizan fuera del periodo de riesgo de fallo por durabilidad.

Solo el 17% de los proyectos de reformas estudiados se iniciaron teniendo como causa principal su deterioro. La mayor parte de las actuaciones se iniciaron por motivos que entran dentro del campo de la percepción subjetiva del edificio. La racionalidad técnica

o económica pocas veces influye en las decisiones reales que llevan a la rehabilitación de los edificios. En la mayoría de los casos el factor limitante para la vida útil no es la durabilidad de los diferentes elementos o materiales.

El ciclo de vida económica de los edificios se ha evaluado (de acuerdo con los resultados empíricos), con una base técnica y económica irracional. Los responsables políticos prestan poca atención al potencial del resto de vida útil de los componentes del edificio. Ellos no les dan importancia a las expectativas económicas. La optimización de los factores económicos de los edificios es el objetivo principal de al menos el 10% de los proyectos de reforma.

Si la vida útil es entendida como el tiempo real de uso de los componentes del edificio, la base de los modelos de predicción de la vida útil no debe basarse en la durabilidad o el coste de los materiales de construcción. La durabilidad es, el factor limitante para la vida útil en el sentido, que la vida útil no puede exceder las limitaciones impuestas por la durabilidad, pero en realidad la vida útil actual rara vez llega a agotar el tiempo completo de la vida potencial de los componentes limitados por la durabilidad. Por lo tanto, la previsión de las necesidades de rehabilitación no debería basarse solo en conceptos derivados de la durabilidad. La inspección de los edificios y su mantenimiento debería prestar más atención a la percepción de la calidad de los edificios.”

1.4 REQUISITOS GENERALES DE LOS MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE LA VIDA ÚTIL

Muchas de las actividades y los documentos mencionados en el apartado anterior muestran requisitos generales que deben cumplir los métodos de predicción de la vida útil de los productos y sistemas constructivos. [Ortega, 2010]. A continuación, se presentan algunos de los requisitos para poder realizar más adelante una evaluación de los métodos propuestos:

En 1987, Masters proporcionó algunos requisitos generales que se deben cumplir en un sistema de predicción de la vida útil [Masters 1987]:

- 1. Se debe definir el problema de manera explícita antes de intentar resolverlo*
- 2. Se debe definir la vida útil de tal manera que se pueda medir cuantitativamente y pueda ser relacionada con el uso.*
- 3. Se debe estar abierto a nuevos enfoques y métodos en lugar de aceptar ciegamente los que se adoptan por tradición.*
- 4. Se deben utilizar procedimientos simples y sistemáticos que estén basados en la lógica, en el sentido común, y en la ciencia de los materiales.*
- 5. Se debe ser consciente de que datos no sistemáticos, acelerados, cualitativos y/o desfasados se pueden utilizar para hacer que cualquier cosa parezca buena, mala o indiferente.*
- 6. Se debe reconocer que es imposible simular todas las condiciones climáticas en el laboratorio y que no es necesario hacerlo de todos modos.*
- 7. Se debe asegurar que la degradación de los procesos inducidos por ensayos acelerados son los mismos que los encontrados en la realidad.*
- 8. Se deben medir los factores de degradación.*

9. *Se debe ser cuidadoso con la trampa de la correlación.*
10. *Se debe reconocer que usando procedimientos sistemáticos cuantitativos, se pueden desarrollar pruebas de aceleración válidas.”*

RILEM “International Association for Building Materials and Structures” publicó en 1989 un documento de recomendaciones para la estimación de la vida útil de los sistemas y materiales de construcción [Masters and Brandt 1989]. Este documento fue la base para el desarrollo de las normas y la estimación de la vida útil dentro de ISO “International Organization for Standardization”. En relación a los requisitos generales en este se desarrolla un procedimiento recomendado en el que se resumen un enfoque sistemático de la metodología para la predicción de vida útil de materiales de construcción y elementos constructivos. La metodología incluye la identificación de la información necesaria, la selección o el desarrollo de las pruebas, la interpretación de los datos y la presentación de los resultados. Utiliza un enfoque de investigación interactivo, de ese modo permite mejorar las predicciones haciendo que los conocimientos tomados como base se enriquezcan. Los análisis matemáticos necesarios para la predicción de la vida útil no se describen en detalle, pero se pueden utilizar bien los análisis deterministas o probabilísticos.

Las recomendaciones de RILEM están destinadas a ser genéricas, y por lo tanto aplicables a todos los tipos de materiales de construcción y elementos constructivos. Los métodos de ensayo y equipos específicos variarán en función de los materiales o elementos que se estén evaluando, así como las necesidades de los usuarios. Las recomendaciones establecidas en este documento han sido utilizadas como base para el desarrollo de la Norma ISO 15686 Parte 2 [ISO 2001].

En la *British Standard BS 7543:1992* [BSI 1992] se exponen los problemas en la predicción de la durabilidad y vida útil en los edificios y se dan unas directrices sobre los agentes que pueden afectar a la vida de servicio. Además se afirma lo siguiente:

“4. Predicciones de durabilidad:

Un arquitecto tiene que tener información sobre la durabilidad para satisfacer los requerimientos del propietario del edificio y para desarrollar una política racional sobre la durabilidad de la totalidad de la construcción.

Es importante señalar lo siguiente:

- (i) *La predicción de la durabilidad está sujeta a muchas variables y no puede ser una ciencia exacta. Un edificio de nueva planta es un diseño único que debe cumplir con un conjunto de condiciones en un sitio específico. A menos que estas condiciones sean las mismas que las registradas con anterioridad precisamente con el mismo método constructivo, la vida prevista para el edificio y sus partes solo puede ser una estimación.*
- (ii) *Las pruebas aceleradas de elementos por separado rara vez se podrán utilizar como base precisa para predecir la vida útil de sistemas constructivos. Las pruebas aceleradas no suelen ser factibles para los elementos constructivos compuestos por materiales muy variados.*

- (iii) *Los certificados de ensayos correspondientes no siempre están disponibles por parte de los fabricantes y se tienen que obtener testando cada proyecto.*

9. Vida útil prevista / 9.1 Método de Evaluación

La vida útil prevista del edificio debe ser evaluada de una de la siguiente manera:

- (a) Evaluar la vida útil en función de la experiencia anterior con el mismo o similar sistema constructivo, en ubicaciones similares o condiciones climáticas parecidas.*
- (b) Evaluar la vida útil mediante la medición de la tasa natural de deterioro en un corto periodo de uso o exposición y la estimación del tiempo que se tardará en alcanzar el límite.*
- (c) Evaluar por interpolación a partir de ensayos acelerados que se han ideado para acortar el tiempo de respuesta a la acción de un agente.*

La predicción de la vida útil normalmente se aplicará a los componentes y elementos constructivos a pequeña escala. Edificios enteros y grandes elementos constructivos son más a menudo únicos en los diseños lo que hace que las experiencias anteriores en materia de durabilidad sean menos relevante. Debido a su tamaño es más difícil de probar su rendimiento bajo menos condiciones controladas.

Cualquiera que sea el método utilizado para su evaluación, la vida útil prevista es improbable que sea una cifra exacta porque el efecto de una acción en cualquier edificio no es probable que sea exactamente predecible. Se pueden hacer predicciones más fiables cuando hay una correlación entre los resultados de diferentes evaluaciones.”

Martin, Saunders, Floyd y Wineburg [1994] llevaron a cabo un amplio estudio sobre las metodologías para predecir la vida útil de los revestimientos. Los autores presentan una serie de criterios para juzgar la adecuación de cualquier propuesta de metodología de la predicción de la vida útil. Estos criterios incluyen la capacidad para:

1. Barajar la gran variabilidad en el tiempo hasta el fallo de especímenes idénticos.
2. Análisis de multivariedad de datos.
3. Discriminar entre estas variables. Es decir la metodología de predicción de la vida útil debe ser capaz de separar las pocas variables significativas de las muchas variables insignificantes.
4. Adecuados modelos de fallos empírico y mecanicista para obtener resultados de laboratorio a corto plazo basados en resultados de exposición.
5. Establecer una conexión entre los ensayos de laboratorio a corto plazo y ensayos insitu a largo plazo.
6. Proporcionar técnicas matemáticas para predecir la vida útil de un sistema de recubrimiento expuesto en su supuesto emplazamiento real.

En la “CS Canadian Standard 478-95” [CSA 1995] hay también una descripción general de métodos para la predicción de la vida útil. Los métodos se describen de la siguiente manera:

“7. Predicción de vida útil de los elementos y sistemas.

7.1 General

Se entiende que la vida útil prevista para cualquier elemento constructivo, incluyendo las reparaciones, así como los nuevos componentes, da por hecho unas determinadas condiciones ambientales y de construcción, un determinado uso y unas condiciones de mantenimiento.

7.2 Los métodos para predecir la vida útil

7.2.1 La vida útil prevista de los elementos o sistemas constructivos pueden ser hallada con uno o más de los siguientes tres métodos:

- a) Por eficacia demostrada, de conformidad con la Cláusula 7.3.*
- b) Modelización del proceso de deterioro, de conformidad con la Cláusula 7.4.*
- c) Mediante ensayos, de conformidad con la Cláusula 7.5.*

7.2.2 Todos los métodos utilizados para determinar la vida útil prevista deben basarse en la comprensión y aplicación de los principios de la ciencia de la construcción, de conformidad con la Cláusula 7.6.

7.2.3 Para la predicción de la vida útil:

a) La eficacia demostrada podrá aplicarse cuando se trate de los mismos sistemas constructivos.

- i) Llevados a cabo y con éxito.*
- ii) En las mismas condiciones ambientales.*

b) La modelización del proceso de deterioro podrá aplicarse a:

- i) Un elemento o sistema constructivo similar que se haya utilizado con éxito en condiciones ambientales similares.*
- iii) Elementos o sistemas constructivos utilizados con éxito, pero en entornos moderadamente diferentes.*

c) La modelización y los ensayos deberán aplicarse en:

- i) Elementos y sistemas constructivos innovadores*
- ii) Elementos o sistemas probados para ser utilizados en entornos muy diferentes.*

El grado en que un sistema o elementos constructivos son innovadores o en que el ambiente son diferentes a uno experimentado previamente deben ser establecidos por la aplicación de los principios de la ciencia de la construcción.”

En septiembre de 1995 en Finlandia se celebró un taller RILEM [RILEM 1995] sobre los aspectos ambientales de los materiales y sistemas constructivos. Resumiendo muy brevemente el taller se concluyó que:

“Las condiciones ambientales forman un problema muy complejo con muchos factores a ser tenido en cuenta en la evaluación. Esto normalmente lleva a complejas metodologías de evaluación que son difíciles de aplicar.”

Basándose en estas conclusiones, se afirma que existe una gran necesidad de metodología de diseño y de método que sean capaces de analizar, evaluar y optimizar los impactos ambientales junto otros requisitos de funcionamiento múltiple.

SarjaVesikari [1996] editaron un estudio RILEM sobre la predicción de la durabilidad de las estructuras de hormigón. Los autores han identificado las siguientes necesidades, para los modelos de durabilidad:

1. El desarrollo de material técnico.
2. Evaluación ecológica de los materiales.
3. Una red de sistemas de inspección para el mantenimiento, reparación y rehabilitación de las estructuras.
4. Planificación de las reparaciones a nivel de proyecto.
5. Análisis del riesgo en estructuras importantes.
6. Diseño de los detalles constructivos y garantía de calidad en la obra.
7. Diseño de durabilidad estructural.

El Comité Europeo de Hormigón CEB (*Comité Euro-International du Béton*) [1997] concluyeron:

“Un procedimiento moderno para el diseño de la durabilidad debe cumplir con las siguientes condiciones:

- *La durabilidad se debe tratar de forma explícita. Se deben definir el uso y el mantenimiento de la estructura durante su vida útil.*
- *La base del procedimiento deben ser los requisitos funcionales y de rendimiento.*
- *El procedimiento debe tener un formato similar al procedimiento para el cálculo de las estructuras.*
- *El procedimiento debe ser extensible a elementos no estructurales.”*

En un ensayo sobre la predicción de vida útil, Bourke y Davies [1997] presentaron una lista de requisitos esenciales y/o características deseables de un sistema de predicción de la vida útil. Afirman que:

“La importancia relativa de cada método es discutible, pero las características importantes que se deben considerar son las siguientes:

- *Fácil de aprender.*
- *Fácil de usar.*
- *Rápido de usar.*
- *Exacto.*
- *Fácil de actualizar.*

- *Fácil de comunicar.*
- *Adaptables.*
- *Apoyados por los datos.*
- *Vínculos con los métodos de diseño y las herramientas existentes.*
- *Libre de exceso de burocracia.*
- *Debe reconocer la importancia de la innovación.*
- *Aplicable a diferentes ambientes.*
- *Aceptado por los profesionales y clientes.*
- *Debe reflejar los conocimientos actuales.*
- *Un nivel de sofisticación flexible para un esquema o una planificación detallada.”*

2 MÉTODO DE LOS FACTORES

Este capítulo presenta el estado del arte sobre el desarrollo, uso y evaluación del método de los factores para la predicción de la vida útil, específicamente el método de los factores presentado en la norma ISO 15686 Parte 1. [Ortega, 2010]

El método de los factores utiliza un enfoque determinista permitiendo determinar la vida útil de un elemento o conjunto de elementos sujeto a condiciones específicas. El método se basa en una vida útil de referencia y unos factores modificadores relativos a las condiciones específicas de cada caso.

Inicialmente el método fue promovido por los Japoneses en la década de los 90 con la publicación “Guide for Service Life Planning of Buildgs” aunque no se ha documentado el uso de un método previo, en la publicación se sugiere el método como alternativa de estimación de vida útil a una metodología ya existente. Más recientemente ya en la década actual, se ha publicado la Norma ISO 15686 “Service life planning”.

Existe un interés creciente en todo el mundo alrededor de este método. El reto para el futuro consistirá en aplicar el método de los factores para estimar la vida útil de una amplia variedad de materiales y componentes en los edificios, afín de consolidar el método y obtener datos reales. Esto crea una necesidad inmediata de entrada de datos, tanto para la vida útil de referencia de materiales y componentes, así como los valores prácticos de los distintos factores incluidos en el método. Recientemente se han llevado a cabo algunos proyectos en relación con la aplicación práctica del método de los factores que podrían ayudar en este terreno.

2.1 DESCRIPCIÓN DE MÉTODO DE LOS FACTORES

2.1.1 Planteamiento inicial del método de los factores en Japón

Durante la década de 1980 en Japón se invirtió mucho esfuerzo para desarrollar métodos y herramientas para la predicción de vida útil de los edificios, sistemas, elementos constructivos e instalaciones. Como se mencionó anteriormente, el documento “*Principal Guide for Service*

Life Planning of Buildings” se publicó en 1989. Se presentan los siguientes principios para la predicción de la vida útil:

- Evaluación de la degradación física.
- Evaluación de la obsolescencia.

En este documento se presenta un método general para la predicción de la vida útil basado en el deterioro físico. La descripción del método contiene una lista de las condiciones que influyen en la vida útil y que se reflejan en los factores utilizados en el método de los factores propuesto. [Ortega, 2010]

El método para la predicción de vida útil determinada por el deterioro se presenta más a fondo con la aplicación de algunos ejemplos en el apéndice 2 del documento citado. Se utilizan los términos siguientes:

- **Vida útil estándar:** El tiempo hasta que se alcanza una fase de deterioro extendiéndose ésta como el momento en el que el conjunto del edificio o alguna de sus partes, elementos, sistema o instalaciones se han degradado en cualquiera de las condiciones especificadas, en circunstancias de “normal” diseño, construcción, uso, mantenimiento y condiciones climáticas. La vida útil estándar ha de ser predicha en base a la experiencia.
- **Vida útil estimada:** La vida útil estándar, multiplicada por diferentes factores basados en una consideración más cuidadosa de las condiciones reales de diseño, construcción, uso, mantenimiento y condiciones climáticas de exposición de un edificio específico, parte del edificio, elemento, sistema o instalación.

En el apéndice 2 del documento, se dan los siguientes ejemplos de la predicción de la vida útil de elementos y de sistemas constructivos:

- Construcciones de madera (En el caso de deterioro biológico).
- Elementos estructurales de edificios de hormigón armado.
- Edificios con estructura de acero (con los elementos de acero recubiertos con pintura).
- Capa de impermeabilización (Sistemas de impermeabilización de asfalto).
- Acabados exteriores (revestimientos) de un edificio de hormigón armado.
- Fachada de azulejo de edificios de hormigón armado.
- Accesorios de aluminio.
- Tuberías.

Por cada ejemplo se enumeran los siguientes factores:

- Factores relativos a las características de durabilidad inherentes al:
 - Rendimiento de los materiales.
 - Nivel de diseño.
 - Nivel de calidad en la ejecución.
 - Nivel de mantenimiento.
- Factores relacionados con el deterioro:

- Lugar de emplazamiento y condiciones ambientales.
- Las condiciones del edificio.

Los factores que luego son cuantificados y combinados en diferentes ecuaciones dependen de una evaluación de cómo y en qué medida influyen en la vida útil del edificio actual, sus sistemas constructivos y materiales. La vida útil estimada se calcula como la vida útil estándar multiplicada por los diferentes factores combinados de diferentes maneras, dependiendo del producto real a ser evaluado.

2.1.2 Método los factores para la estimación de la vida útil de los elementos y sistemas constructivos como se presenta en la norma ISO 15686 Parte 1.

El concepto de factores para una estimación de la vida útil como se describe en el documento Japonés ha sido introducido en la International Standard for Service Life Planning of Building, ISO 15686 Parte 1. El método se presenta de la siguiente manera:

“9. Métodos de los factores para estimar la vida útil.

9.1 Esquema de método de los factores.

El método permite una estimación de la vida útil ESLC para un determinado elemento o sistema de condiciones específicas. Se basa en una vida útil de referencia RSLC (Normalmente la vida útil esperada en un conjunto bien definido de condiciones de uso que se aplican a ese tipo de elemento o sistema) y una serie de modificaciones de los factores que se relacionan con las condiciones específicas de cada caso.

El método utiliza la modificación mediante factores en cada uno de los siguientes casos:

- *Factor A: calidad de los elementos.*
- *Factor B: nivel de diseño.*
- *Factor C: nivel de calidad en la ejecución de obras.*
- *Factor D: condiciones interiores.*
- *Factor E: condiciones de exposición exterior.*
- *Factor F: condiciones de uso.*
- *Factor G: nivel de mantenimiento.*

Cualquiera (o cualquier combinación) de estas variables pueden afectar la vida útil. El método de los factores puede expresarse mediante la siguiente fórmula:

$$ESLC = RSLC \times \text{Factor A} \times \text{Factor B} \times \text{Factor C} \times \text{Factor D} \times \text{Factor E} \times \text{Factor F} \times \text{Factor G.}”$$

La vida útil de referencia es similar a la vida útil que definen los Japoneses. En la ISO 15686 Parte 1, la vida se define como:

“Vida útil que se espera de un edificio o sus partes en un determinado conjunto de condiciones de uso.”

En la norma también se trata la utilización del método de los factores y se dan indicaciones de cómo establecer la vida útil de referencia y cada uno de los factores.

2.1.3 Aportaciones en la aplicación del método de los factores de la Norma ISO 15686 parte 8.

En la Norma ISO 15686 (2008), la cual proporciona orientación para la selección y el formato de la vida útil de referencia y sobre la aplicación de estos datos para el cálculo de vida útil estimada utilizando el método de los factores. La ISO 15686 Parte 8, no orienta sobre como calcular los factores modificadores, pero introduce novedades en relación al método presentado en la Parte 1 de la misma norma.

Como novedades establece tres niveles de aplicación del método de los factores:

“6.4 Niveles de aplicación.

6.4.1 General

El método de los factores se puede aplicar con diferentes niveles de sofisticación, desde un nivel de simple control hasta un nivel en el que se establece complejos cálculos. El nivel se debe establecer teniendo en cuenta factores como el objetivo de la estimación, el tipo y la calidad de datos y modelos disponibles, y el nivel de formación del usuario que va a realizar la estimación, así como los medios y el tiempo disponible para la realización.

6.4.2 Nivel de control

En este nivel se llevará a cabo un procedimiento “Step by step”, en el cual la diferencia entre el objeto caso de estudio y las condiciones de referencia de cada factor se considerarán y estimarán por separado en pasos sucesivos.

Se puede hacer una estimación de la vida útil usando la experiencia en combinación con las diferencias entre el objeto caso de estudio y las condiciones de referencia y su influencia en la vida útil de referencia.

6.4.3 Nivel de multiplicación

En este nivel, la estimación de la vida útil se deben de llevar a cabo multiplicando el valor de la vida útil de referencia por los factores numéricos de la A a la G, cada uno de los cuales refleja una dependencia entre la vida de servicio objeto específico y las condiciones de referencia en su factor correspondiente.

6.4.4 Nivel de función

En este caso, la estimación de la vida útil se debe de llevar a cabo multiplicando el valor de la vida de referencia por una función matemática adecuada con sus respectivas

variables, cada una de las cuales reflejará las diferencias entre el objeto específico y las condiciones de referencia.

6.4.5 Nivel de combinación

Una vida útil estimada se debe estimar con la combinación de los niveles de multiplicación y función para grupos de diferentes factores. El valor de la vida útil de referencia se multiplicará por una o más funciones o uno o más factores.”

Otra importante novedad introducida en relación a la aplicación del Método de los factores es que la Norma da la posibilidad de utilizar un enfoque semideterminista-semiprobabilístico a través del uso de funciones o distribuciones de probabilidad, como hemos podido observar en el texto citado anteriormente. Más adelante se alude explícitamente al tema de la siguiente forma:

“6.5 Distribuciones de probabilidad

Cualquiera de las funciones o variables pueden aplicarse en forma de distribuciones o funciones de probabilidad. En ese caso la vida útil estimada resultante será a su vez una distribución de probabilidad.”

Además de estas novedades la Norma introduce indicaciones en relación al formato de la vida útil estimada introduciendo intervalo de confianza:

“6.6.2 Confianza de la vida útil estimada

Para cada vida útil estimada se debe estimar un intervalo de confianza. La estimación del intervalo de confianza se debe basar tanto en la confianza en los datos usados como en la incertidumbre del proceso de estimación. En el caso de haber utilizado el nivel de multiplicación o de función, el intervalo de confianza se debe determinar usando intervalos de confianza para las variables o los factores incluidos.”

Como en la Parte 1 de la Norma, la Parte 8 incluye en el anexo C dos ejemplos de aplicación.

2.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LOS FACTORES

Hasta la fecha, la aplicación práctica del método de los factores de la ISO para la predicción de la vida útil de los materiales y los elementos constructivos ha sido muy limitada. La mayoría de los casos publicados se describen en artículos teóricos donde se proporcionan ejemplos de su utilización. La aplicación práctica del método ha sido limitada debido a la falta de conocimiento del método entre los profesionales (Arquitectos, ingenieros, constructores) o también debido a la necesidad de valores útiles de los diversos factores. Se presentan algunos ejemplos de la aplicación del método de los factores.

Strand y Hovde llevaron a cabo el estudio de cómo los datos de la vida útil de la superficie exterior de los materiales (madera, ladrillo...) influyen en el ACV (Análisis de Ciclo de Vida) de los mismos los autores querían hacer hincapié en la necesidad de datos de la vida útil en el ACV, como se llega a los datos y como podrían influir en los resultados. Los materiales y elementos constructivos se utilizan por un largo periodo de tiempo más que mucho otros productos. El ACV de un producto de construcción por lo tanto requiere de la recopilación de datos que deben ser válidos durante un largo periodo de tiempo.

Los autores aplican el método de los factores tal como se describe en la Norma ISO 15686 Parte 1, pero sobre todo destaca el uso de los Factores E (condiciones ambientales exteriores) y Factor G (Nivel de mantenimiento). El ACV es llevado a cabo en dos ambientes (industriales y rurales) y para fachadas orientadas al Norte o al Sur. También se utilizan carencias diferentes en la reposición de la pintura, en la limpieza y en la sustitución. En las conclusiones se afirma que:

“Los métodos de predicción de la vida útil y el análisis del ciclo de la vida (ACV) se refieren a problemas comunes. La mayoría de los datos de la predicción de la vida útil son necesarios también en el ACV.

La información relativa a la variación asociada con la predicción de la vida útil es información crucial en el ACV. Es extremadamente importante que la base de la predicción de la vida útil y el ACV estén claros, como por ejemplo, el tipo de mantenimiento y sus cadencias. De hecho en este estudio se ve como el mantenimiento es el dato más relevante.”

Hovde presento la necesidad de la predicción de la vida útil de los sistemas de protección pasiva contra el fuego. El artículo se refiere al método de los factores tal como se describe en la ISO 15686 parte 1. La protección pasiva contra incendios tiene un creciente interés e importancia en relación con la introducción normativa de construcción basada en el fuego. Por eso es importante predecir la durabilidad y la vida útil de la protección contra incendios, ya que se convertirá con el tiempo en un área específica de aplicación de los métodos de predicción de la vida útil.

Una comisión mixta entre el CIB y RILEM (Métodos de diseño ambiental en los materiales y la ingeniería estructural) ha estado trabajando en el desarrollo de métodos para el diseño ambiental de los materiales y estructuras. Sarja presentó un estudio de los trabajos realizados. En la introducción del estudio se explica que para la incorporación de un punto de vista sostenible en el diseño de materiales y estructuras, es necesario volver a examinar todo el proceso de diseño con el fin de integrar los aspectos medioambientales. Más allá, este tipo de proceso se conoce como diseño integrado del Ciclo de Vida, y se dice que el objeto del proceso consiste en asimilar, de forma práctica, las múltiples necesidades de funcionalidad, economía, rendimiento, resistencia, estética y ecología en todas las especificaciones técnicas y en los diseños detallados de materiales de estructuras.

El Comité RILEM junto con CIB está elaborando un manual en el que proporcionan métodos y metodologías para el diseño estructural con el fin de cumplir con los requisitos del desarrollo

sostenible durante toda la vida útil de las estructuras. El ámbito de aplicación del manual incluye estructuras isostáticas como hiperestáticas, de edificios, puentes, torres, presas y otras.

En la descripción del proceso del diseño mencionan métodos alternativos que pueden ser aplicados para el diseño de la durabilidad. Estos son:

- Diseño de la durabilidad con reglas de detalles estructurales.
- Diseño de las condiciones ambientales de las estructuras para una mayor durabilidad.
- Protección de los materiales y estructuras contra el deterioro.
- Método de los factores de seguridad de vida útil.
- Método de los factores de referencia.

El método de los factores de referencia es el mismo método de la ISO.

Hed llevó a cabo un estudio sobre la planificación de la vida útil de un edificio plurifamiliar, construido en Gävle, Suecia en 1999. Los resultados han sido presentados en diferentes publicaciones. Hed utilizó la ISO 15686 parte 1, como base para el estudio. Se integró la planificación de la vida útil en el diseño del edificio y se siguió en el proceso desde la fase de proyecto hasta el inicio de la construcción del edificio. El estudio consta de tres volúmenes separados y en uno de los documentos se expone la aplicación del método de los factores tal y como se presentan en la norma ISO, el autor afirma que:

“Uno de los problemas es que todavía hay pocos ensayos realizados de materiales y elementos en relación a su vida útil, comprendiendo todos los requisitos necesarios de los componentes de un edificio cuando están en uso, es decir, siguiendo la metodología de la predicción de la vida útil de la ISO.

La precisión de la estimación de la vida útil hereda esta carencia, así que cada uno tiene que analizar si vale la pena el esfuerzo de hacer los cálculos o no. Si el objetivo es encontrar un valor exacto, está claro que el objetivo no se alcanza. Pero si el objetivo es mejorar la situación general en la planificación de la vida útil la respuesta entonces es sí.”

El método de los factores de la norma ISO 15686 – 1 pretende ser una herramienta para mejorar la estimación de la vida útil. En el estudio nos encontramos que este método no mejora las estimaciones de la vida útil. Esta opinión se resume en la siguiente:

“La incertidumbre de RSLC y los valores de los factores: La fórmula factorial comprende por un lado un valor de referencia (RSLC) y por otro los factores de ajuste desde Factor A hasta Factor G. Si el valor de referencia no se puede determinar con precisión no es apropiado para ajustar estos valores.

La incertidumbre de los efectos de los factores: La estimación se basa en sucesos incontrolables, que puede actuar de forma independiente el uno del otro.”

En Finlandia se ha llevado a cabo un proyecto para desarrollar un sistema de gestión de la información sobre la vida útil de los productos de construcción. El objetivo del sistema es

servir a arquitectos, ingenieros, contratistas y organizaciones responsables del cuidado y mantenimiento de los edificios. El tema se aborda desde el punto de vista de los fabricantes de productos. Los resultados del proyecto se presentan en un estudio en el cual se introducen un sistema de información comprensible sobre el comportamiento durante la vida útil de los productos del sector de la construcción. La idea es que esta información sea dada por los fabricantes, siendo esta necesaria en el diseño del edificio, la construcción y el montaje y en el uso cuidado y mantenimiento de edificios.

Una parte importante del proyecto fue destinado a desarrollar los métodos de predicción de la vida útil para recubrimientos de fachadas y cubiertas. Cubría fachadas de hormigón, mampostería, madera y planchas de acero y revestimientos de cubierta de membrana de asfalto, chapa de acero y baldosa de hormigón. Se utilizó el método de los factores descrito en la Norma ISO 15686 Parte 1. La aplicación del método de los factores para estimar la vida útil del hormigón en las fachadas fue presentada por Vesikari. Como novedad se utilizó una simulación por ordenador para producir los valores de los factores. Esto hace que sea relativamente fácil determinar las propiedades esenciales y los factores estructurales y sus efectos sobre la vida útil. El estudio mostró que el uso de un solo factor no fue suficiente para cubrir todos los efectos materiales o los efectos ambientales. Por tanto se establecieron dos factores parciales para los parámetros de material, es decir A1 (dependiendo de la porosidad del aire) A2 (dependiendo del agua - ratio del cemento). Del mismo modo, dos factores parciales fueron establecidos para los parámetros ambientales, E1 (dependiendo de la orientación) y E2 (dependiendo de la ubicación geográfica). Estos factores prácticos se multiplican para obtener el efecto total debido a los materiales y a los parámetros ambientales. La aplicación del método de los factores se ilustra con una fachada de un bloque de viviendas en el sur de Finlandia con una vida de diseño de 50 años. El método de los factores resultó ser un método de predicción adecuado para el diseño práctico de la vida útil.

El centro de investigación técnica de Finlandia (VTT) ha desarrollado ENNUS, un software de apoyo en la evaluación en la vida útil de edificios. El programa ayuda a los diseñadores a determinar los parámetros que afectan a la vida útil del edificio y a predecir la vida útil de conformidad con el método de los factores presentado en la Norma ISO 15686 parte 1. El programa actualmente se puede utilizar para la evaluación de los elementos estructurales de hormigón armado, fachadas y cubiertas de acero y para paredes de madera al exterior.

2.3 EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS DE LOS FACTORES

2.3.1 Evaluación Método de los factores tal cual se describe en la ISO 15686 Parte 1

El método, desde su presentación en el primer borrador de la norma, ha sido evaluado en varios artículos de investigación, tanto sobre una base teórica, así como basándose en algunas aplicaciones sencillas, algunas de las cuales se exponen a continuación. La evaluación del método de los factores que se hace en este capítulo, se requiere el método tal cual se describe en la ISO 15686 Parte 1.

Un antecedente interesante para la evaluación del método de los factores es un estudio que publicó Assaf. Los autores no se refieren al método de los factores de la ISO, pero se describen

los resultados de una encuesta a 90 contratistas, 30 empresas de arquitectura/ingeniería y 20 propietarios de la provincia de Arabia Saudí. En este estudio, se establecen 35 factores durante la etapa de construcción de grandes edificios. Todos los factores están englobados en los seis grupos siguientes:

- Control de obra.
- La mano de obra.
- La gestión del contratista.
- Los materiales de construcción.
- Equipos de construcción.
- Planos de proyecto.

Estos grupos están relacionados mayoritariamente con algunos de los factores incluidos en el método de los factores de la ISO. Los resultados del estudio indican que en la práctica probablemente tendrán que considerarse un gran número de factores y parámetros que influyen en la vida útil de la construcción, edificio o elemento constructivo. Se establece como una tarea muy difícil evaluar la influencia de todos estos factores y de los parámetros que a su vez influyen en estos. También será complicado establecer valores fiables para cada uno de los factores del método de la ISO.

Bourke y Davies presentaron un análisis a fondo sobre el método de los factores. El artículo pretende ofrecer una contribución al desarrollo del método escrito en la norma ISO 15686. El contenido principal de los diversos capítulos es:

- Una introducción con una breve reseña sobre enfoques alternativos para la predicción de la vida útil de elementos.
- Características del enfoque factorial para la predicción de la vida útil, principalmente enfocado a la ISO.
- Sistema factorial.
- Análisis crítico de los factores que afectan a la vida útil.
- La experiencia con los sistemas de factores y recomendaciones sobre el número de factores, incluyendo la descripción de algunas de las normas británicas anteriores.
- Tres ejemplos resueltos que se presentaron en un anexo informativo en la norma ISO.
- Conclusiones incluyendo una lista con la necesidad de futuras investigaciones.

En el resumen general y las conclusiones del artículo, los autores afirman que:

“El sistema puede servir inicialmente como un medio de comparación objetiva y de análisis y no como una predicción fiable de vida útil.

La adopción del sistema debe servir para optimizar la selección de elementos, poniendo remedio a los procesos a gran escala, costosos perjudiciales e innecesarios que hoy en día se llevan a cabo. De la misma manera, se podría reducir las especificaciones excesivamente exigentes para edificios de corta vida. También destacaría la facilidad con la que la durabilidad se puede mejorar “en el tablero de dibujo”, logrando así un mejor rendimiento para un coste mínimo. Se podrían alcanzar finalmente los beneficios tan reclamados por los análisis de ciclo de vida, así mismo se podría resolver la cuestión

fundamental de cuánto tiempo deben de durar los componentes. También podría contribuir a reducir los costes globales de la construcción y mejorar así la competitividad del sector.”

La mayor parte del documento se centra en el desarrollo enfocado hacia la normalización de métodos de predicción de la vida útil basados en la metodología cuantitativa a través de modelos estocásticos basados en la utilización de una cadena de Markov aplicados a la colocación de la impermeabilización de la cubierta. Esta parte del texto se explicará con mayor detalle más adelante, cuando se traten los métodos probabilísticos. Sin embargo, en el documento también se describen formas alternativas para establecer los métodos de predicción de la vida útil que se pueden aplicar en relación a la impermeabilización de las cubiertas. Los autores hacen referencia la elaboración y evaluación del método de los factores que se realizó en el CIB W080 “Predicción de la vida de servicio de materiales elementos constructivos”. Afirman que:

“A pesar de su viabilidad este enfoque tienen muchas deficiencias, que incluyen:

- 1) No tienen en cuenta el uso, como tal, no establece requisitos mínimos respecto a este;*
- 2) Elección arbitraria de la vida estándar y ajustes de factores.*
- 3) Enfoque determinista, a pesar de la gran incertidumbre y la variabilidad de la vida útil.*

Parece entonces, que este método no es de fácil aplicación, ni que probablemente se consigue en un futuro cercano.”

En las conclusiones los autores afirman que el uso de datos actuales para desarrollar su modelo estocástico permite superar las dificultades asociadas con las pruebas de vida acelerada y con los enfoques empíricos factoriales.

Parte de las deficiencias que defienden estos autores, específicamente el enfoque determinista del método han sido interpretadas en la Parte 8 de la Norma ISO 15686, donde, como se ha comentado anteriormente no solo se permite, si no que se ejemplifica el uso de funciones estadísticas en combinación con el enfoque determinista del método de los factores.

Hovde presentó una evaluación del método de los factores tal y como se presenta en la Norma ISO 15686 Parte 1. No se basa en una aplicación práctica del método, solo se basa en consideraciones y aportaciones, por ejemplo del CIB W080 / RILEM 175 – SLM. Hovde explica que hay una fuerte necesidad de una nueva evaluación del método. Ve necesario, a corto plazo, los datos de entrada tanto para la cuantificación de la vida útil de referencia (RSL), así como para los diferentes factores de la ecuación. A largo plazo, habrá necesidad de una evaluación más exhaustiva del método de los factores, incluidas las posibilidades de una descripción cuantitativa de la RSL y de los factores. Hovde también señaló que el método debe ser evaluado de acuerdo a los requisitos generales para los métodos de predicción de vida útil, tales como se indican en capítulos anteriores de este trabajo. Habre un breve debate sobre los siguientes puntos que considera deberían revisarse:

- Estimación de la vida útil de referencia (RSL)
- Factores importantes

- Número necesario y tipo de factores
- El uso de factores en una ecuación
- Rango razonable de los valores de los diferentes factores
- La importancia relativa de los factores
- La incertidumbre de los factores
- Factor de dependencia del material o elemento a ser evaluados
- Consideraciones de cada uso práctico

Muchas de las revisiones propuestas por el autor han sido incorporados en la parte 8 de la Norma ISO 15686: La estimación de la vida útil de referencia, un rango razonable de los valores de los diferentes factores, la importancia relativa de los factores, la incertidumbre de los mismos y algunas consideraciones de cara al uso práctico.

Teply, describe las posibilidades y limitaciones para el desarrollo del método de los factores. Después de la descripción del método, el autor ilustra su uso con la estimación de la vida útil de una estructura de hormigón armado en una fábrica. En las conclusiones, Teply afirma que las siguientes circunstancias críticas afectan la vida útil y por lo tanto requieren atención:

- Una estructura puede estar expuesta a un efecto combinado de procesos agresivos.
- Combinación de materiales y diseño de los encuentros.
- Los elementos móviles y las tolerancias de estos movimientos.
- Capas de protección.
- Accesibilidad para la inspección, reparación o sustitución de algunas piezas.

El autor también concluye que al fin de lograr un mayor desarrollo y utilización del método de los factores, los contratistas y los futuros propietarios tienen que empezar a utilizar métodos basados en datos existentes y en la experiencia.

Aarseth y Hovde, estudiaron una mejora del método de los factores con la introducción de una evaluación estadística de los factores individualmente. Los autores proponen un método semi-determinístico llamado "Step by step" surgido en Dinamarca en la época de 1970. El principio de "Step by step" es una herramienta para mejorar la calidad de la base sobre la que se establece las decisiones en la planificación de proyectos bajo incertidumbre.

El método "Step by step" utiliza el método de los factores pero añadiendo un parámetro de incertidumbre a los factores: Se atribuyen a cada factor 3 valores, un valor mínimo, un valor máximo y el valor más esperado. Se utiliza una función de densidad de Erlang con el fin de dar una representación estadística razonable de las estimaciones de los tres valores. Los autores aplican esta modificación del método de los factores a la estimación de la vida útil de una ventana de madera que también se utiliza como ejemplo en la Norma ISO 15686 Parte 1. Utilizando el método de los factores simple, como se muestra en la Norma ISO. La vida útil estimada de la ventana es de 62,20 años, es decir 60 años. Al utilizar el principio, del "Step by step", en una modificación del método de los factores, la vida útil estimada se calcula en 50 ± 6 años. Este método se explicará más en profundidad en el apartado de los métodos de ingeniería. En las conclusiones los autores afirman que:

“El principio del “Step by step” permite un manejo estocástico de los factores modificadores en el método de los factores de la ISO realizando una estimación triple para cada factor. Después del cálculo estadístico la vida útil estimada se expresa en tres valores: el valor más común, más / menos una desviación estándar.”

Moser, también ha llevado a cabo una evaluación y una mejora del método de los factores mediante el uso de métodos estadísticos, utilizando un enfoque de Ingeniería. En lugar de un tratamiento estadístico del conjunto de todos los factores como se muestra en Aarseth y Hovde con el principio “Step by step”, se aplica una estadística individual para el tratamiento de cada factor. Esto se hace mediante el uso de diferentes distribuciones estadísticas para cada factor es decir (determinista, normal, lognormal o Gumbel) y dando a las cifras individuales el valor mínimo, el más probable y el máximo. En el apartado referente a los métodos de ingeniería se profundizará más en el método. En sus conclusiones el autor afirma que:

“El uso de herramientas probabilísticas para la planificación de costes de mantenimiento o sustitución ya no se restringe solo a proyectos que tengan necesidades de financiación de gran tamaño o numerosos activos. Haciendo pleno uso de la información, por ejemplo, que figura en la Norma ISO 15686 y modificada por la opinión profesional permite el uso de variables en lugar de los factores deterministas en la ecuación de la vida útil estimada. Los resultados dan una visión mucho más detallada de la vida útil de los componentes de los edificios en cuestión y permiten una mejor planificación de las inversiones necesarias.”

De nuevo Moser, publicó junto a Hovde, el CIB W 080 / RILEM 175 – SLM, donde exponen otras propuestas de métodos de predicción de vida útil que emplean relaciones matemáticas. En el estudio se muestran tres ejemplos para ilustrar el procedimiento propuesto para diferentes ecuaciones básicas y distinta calidad de datos de entrada. Será este estudio el que sirva para el desarrollo de la Parte 8 de la Norma ISO 15686, con todas las nuevas aportaciones sobre la aplicación del método.

El estudio tenía los siguientes objetivos:

- “1. Obtener una visión general sobre los métodos utilizados en los principales proyectos de investigación.*
- 2. Buscar posibles modificaciones del método de los factores que le proporcione un carácter más científico.*
- 3. Establecer la complejidad de los modelos y el tipo y la cantidad de datos a utilizar.*
- 4. Proponer un método de ingeniería y desarrollar ejemplos de aplicación.”*

Rudbeck, realizó un amplio análisis de los métodos de predicción de la vida útil en el que describe la evaluación de la vida útil de referencia (RSL). En el estudio se describen diferentes métodos de determinación de RSL, y se sugiere una guía para elegir entre estos métodos. Las reflexiones del autor van en la línea con las nuevas aportaciones realizadas en la Parte 8 de la Norma ISO 15686.

El autor también establece un debate sobre el método de los factores para la predicción de la vida útil, y concluye que:

“Antes que se determine un método más correcto, con la aportación de datos de campo, solo se puede ver las posibles ventajas y desventajas de los métodos actuales. Desde este punto de vista los métodos basados en la propuesta de la ISO con enfoque probabilísticos, descritos por Aarseth y Hovde y Moser, parecen ser la forma más aplicable. Los requisitos de entrada para desarrollar las funciones de formas diferentes. El método sugerido por Aarseth y Hovde presenta los datos de una manera muy agregada (un mínimo, una media y un máximo para cada parámetro), mientras que el método descrito por Moser permite el uso de todos los datos disponibles. Desde un punto de vista más estadístico este último método parece ser el más fiable.

La conclusión del debate planteado sobre la comparación de los diferentes métodos para estimar la vida útil de los componentes es que a menos que se consideren tamaños de muestras muy grandes el enfoque probabilístico puede no ser la mejor solución. Los elementos constructivos son producidos en grandes cantidades, pero a medida que se aplican en numerosas maneras, las mediciones de rendimiento en el tiempo pueden no ser comparables. En cambio el enfoque acertado puede estar en los métodos híbridos, en el acoplamiento del enfoque de los factores y del enfoque probabilístico, debido a las ventajas de esta forma de proceder puede ofrecer.

Si las matrices de probabilidad de transición para el modelo de Markov se pueden desarrollar y ser validadas, este modelo sería el que recomiendo la hora de predecir la vida útil de los elementos constructivos.”

Según Hovde y Moser, las deficiencias principales que se han detectado sobre el método de los factores expuesto en la Norma ISO 15686 se pueden resumir como sigue:

- La multiplicación igualitaria de los factores debería tener un peso diferente.
- El resultado es solo una cifra en lugar de un resultado que refleje la variación de la realidad. Teniendo en cuenta los esfuerzos en la recopilación de datos de entrada, un resultado tan exacto y no un rango de actuación que no parece ser adecuado.
- Los datos aún no han sido estudiados.
- La falta de una relación directa con los datos recogidos por ejemplo, sobre el medio ambiente, el clima, condiciones de uso, etc.
- Los factores por lo general se basan directamente en el comportamiento de los componentes de unas determinadas condiciones, en vez de basarse en la influencia de los parámetros individuales tales como los regímenes de precipitaciones, la temperatura, la humedad, el tiempo, el tipo de uso, etc.

Una vez más parte de estas deficiencias han sido subsanadas con la publicación de la Parte 8 de la Norma ISO 15686.

Marteinsson, publica un artículo analizando el método de los factores según la norma ISO. En su estudio se utiliza información publicada por el autor anteriormente para evaluar el comportamiento de las ventanas en función del tiempo. La encuesta sobre el estado de las

ventanas mostró poca variación para las ventanas de diferente orientación. Sobre esta base, el autor supone que el efecto de diferentes entornos y diferente nivel de mantenimiento hacen de contrapeso entre sí. Se analizaron los resultados de la encuesta, junto con la información de los dueños de las casas con respecto a las sustituciones anteriores de las ventanas (la distribución tiene que ser corregida para este efecto). Fue posible aplicar una distribución de Weibull a los datos, y utilizarla para definir el límite de confianza del 80% para la vida útil de las ventanas de madera. La degradación de las ventanas se discute, con el efecto de la degradación de diferentes agentes, así como se discuten los factores que afectan a la degradación y la vida útil de un componente, como se describe en la Norma. A los factores se les asigna un valor basado en el entorno y el tipo de casas inspeccionadas. Finalmente se afirmó que la recopilación de información de encuestas de los dueños de casas es un método útil para obtener datos de entrada para determinar la vida útil de un componente. La metodología utilizada es de especial interés para determinar la vida útil de referencia de un componente con respecto a un entorno determinado. Finalmente el artículo analiza el método de los factores en términos generales y señala algunos problemas que actualmente enfrenta un usuario en general cuando utiliza la metodología.

2.3.2 Evaluación del método de los factores con las novedades expuestas en la Norma ISO 15686 Parte 8

Con la publicación del borrador de la Norma ISO 15686-8, Marteinson, afirma:

“El proyecto de la norma circuló un tiempo que puedo ser discutido y criticado por muchos autores. La formula fue interpretada en el sentido que la metodología era puramente determinista y en general se acepta que los procesos de degradación son de naturaleza altamente estocásticos. Los temas principales de debate han sido: (i) el método es demasiado simple y poco fiable; (ii) los factores son difíciles de estimar y la incertidumbre en los resultados grande; (iii) el método es determinista. El debate ha sido sin duda de interés para la evaluación del método. En el borrador de la Norma ISO, se proponen diferentes niveles en la aplicación del método. Se estipula, además, que todas las variables y los factores se pueden aplicar en forma de distribuciones de probabilidad. Sin embargo, el método no requiere explícitamente esto. De esta forma, se han abordado algunos de los temas criticados, pero la estimación de la incertidumbre en el método es aún, sin duda un tema de debate.

El enfoque determinista del método de los factores (multiplicación de los factores y un valor de referencia) es criticado por algunos autores, pero la discusión anterior muestra que el enfoque no es necesariamente malo, técnicamente, habida cuenta de algunas simplificaciones. Sin embargo, se podría reforzar en el caso que existiera un procedimiento similar, experimentado en otros campos de aplicación, como puede ser el campo de los ensayos acelerados. El uso del método de los factores requiere el estudio de los mismos procesos de degradación, etc. El único cambio es la velocidad de degradación, y por lo tanto los datos de la vida útil son diferentes.

La forma de estimar el proceso (Norma ISO 15686-8), tal como se presenta en el proyecto y en la ecuación 6.1, abre varias posibilidades:

(i) *El efecto de las diferentes variables sobre el resultado no tiene por qué ser una multiplicación llana, podrá por ejemplo, ser aditivo en uno o más de los factores. Esta modificación atiende a la crítica con respecto a la fórmula utilizada como se debatió con Hovde.*

(ii) *Los factores pueden ser funciones y por lo tanto la información resultante incorpora la variabilidad causada por las distribuciones. Esta modificación asiste, al menos en parte, al debate sobre las características estocásticas, como se debatió.*

Los factores del método de los factores los han de decidir el usuario, lo que ha sido objeto de críticas así como la imprecisión en los resultados. El uso de funciones probabilísticas en lugar de valores deterministas de los factores no va a cambiar la incertidumbre en los resultados, ya que las funciones en sí no se saben con certeza. Muchos críticos del método han señalado la posibilidad de decidir las funciones (o más bien los parámetros de la función) por el método Delphi como una forma de mejorar la precisión y la confianza en el método.

El método de los factores aceptando que la fiabilidad puede ser cuestionable en algunos casos, cumple con algunos de estos requisitos. El método está estructurado de forma similar a los métodos ya conocidos por los diseñadores, por ejemplo, el Método Factorial en el Diseño Estructural y esto debería ayudar en la adquisición en la confianza en el método.

La ventaja de la metodología es que el concepto pueden ser fácilmente comprendido y el usuario obtener rápidamente una sensación de que factores son importantes y cuáles son los valores que pueden tener.”

El trabajo futuro a realizar según el autor, se puede resumir como sigue:

- Método de los factores: Guías sobre la metodología de estimación de la vida útil. Esto también ayudará a los diseñadores en la evaluación de los factores de diseño propios.
- Bases de datos: Bases de datos sobre las propiedades del material y la degradación ambiental son muy necesarias.
- Caracterización de factores de degradación y mecanismos: Estos han de ser a la vez basados en las pruebas aceleradas, a largo plazo y encuestas.
- Mantenimiento: Planificación de mantenimiento será interesante ver si esto puede hacerse, por ejemplo, utilizando una combinación del método factorial y un enfoque de cadena de Markov.

Como evaluación más reciente, Cole y Corrigan, en un artículo donde describen los diferentes tipos de información que se pueden obtener para definir la vida útil de los elementos constructivos, hacen la siguiente reflexión sobre el método de los factores:

“La predicción de la vida útil de los edificios más precisa es la que se lleva a cabo por elementos constructivos lo que requiere el desarrollo de grandes bases de datos de la vida útil de los elementos constructivos bajo diversas condiciones. Existe una amplia variedad de usos para la información derivada de la predicción de la vida útil:

1. *La predicción de la vida útil de productos concretos en ambientes conocidos – esto es importante para el fabricante que proporciona garantías sobre su producto, y el diseño que selecciona el material.*
2. *Selección comparativa de materiales basada en estimaciones de la vida útil de los materiales concretos en ambientes conocidos – esta aplicación está ganando protagonismo en el campo de las herramientas para el cálculo del ciclo de vida (ACV).*
3. *Predicción de vida útil en nuevos ambientes – como para los puntos 1 y 2 anteriores.*
4. *Efectos de los cambios de diseño en la vida de los componentes - como el número 3.*
5. *Estimación de los programas de mantenimiento de edificios existentes – fundamental para el técnico.*
6. *Estimación de los programas de mantenimiento desde el diseño de los edificios – esto es importante para el diseñador, constructor, ingeniero.*
7. *Efecto de la mano de obra y los factores humanos en el mantenimiento y la vida útil de los componentes – crítico para el constructor.*
8. *Predicción de la vida remanente de los edificios inspeccionados – crítica para los propietarios o administradores de fincas.*

Hay una serie de cuestiones o limitaciones que afectan actualmente al método. Sobre una base teórica no hay ninguna razón rigurosa por la que los diversos factores deban ser tratados de forma independiente. Por ejemplo, la calidad de la ejecución de las obras podría fácilmente influir tanto en las condiciones interiores como en las condiciones exteriores. En segundo lugar se necesitan grandes bases de datos para definir los factores, y la consecución de estas bases de datos se complica por el hecho de que factores no son verdaderamente independientes. Sin embargo, el método de los factores es actualmente el único aceptado internacionalmente en relación a la predicción de la vida útil. Sí que es verdad que el método extiende significativamente la utilidad de las bases de datos sobre la vida útil, pudiendo esta ser aplicada fuera del ámbito de aplicación para el que fuera creadas. Así, la combinación de las bases de datos de vidas útiles de referencia y el método de los factores se pueden utilizar en teoría para todos los usos 1 - 7 que figura en la introducción con la excepción tal vez de 5. Por el contrario, las bases de datos de vidas útiles de referencia por separado sólo podrían ser útiles para los usos 1 y 2.”

2.4 EXPECTATIVA DEL MÉTODO DE LOS FACTORES

Todavía hay muchos temas que han de ser evaluados antes de que se estandarice su aplicación práctica. Estos son los temas que se han considerado de mayor relevancia a tratar:

- La determinación y la recopilación de datos para la vida útil de referencia (RSL) y los factores individuales.
- El uso práctico de los métodos en los casos de estudio de determinados materiales y componentes de los edificios.

- Aplicación de los métodos de evaluación de ciclo de vida de los materiales de construcción y componentes y métodos de evaluación ambiental para los edificios.
- Aplicación de los métodos de diseño integrado del ciclo de vida y el diseño para la durabilidad de los edificios.

3 OTROS MÉTODOS DEL CÁLCULO DE LA VIDA ÚTIL

La revisión de la bibliografía se ha realizado concentrándose en las actas de congresos. Revisando la bibliografía disponible, se observó que, si bien los títulos de los documentos en conferencias anteriores a 1996 trataban temas muy específicos en la predicción de vida útil, su contenido parece ser bastante general. Ello es debido a que fue en 1996, durante el tercer simposio internacional “*Applications of performance Concept in Building*” organizado en Israel, cuando se identificó la necesidad de establecer la vida útil de diseño y se comenzó a trabajar en una estandarización. Nireki propuso varios enfoques para resolver los problemas de durabilidad y vida útil, y estableció las necesidades para continuar la línea de investigación. En 1997, se llevó a cabo un estado del arte sobre la vida útil de diseño.

Como consecuencia de lo expuesto, este estado del arte se concentra en las publicaciones no más allá de 1996. En general, se han revisado las referencias más recientes disponibles de los temas tratados.

3.1 MÉTODOS PROBABILÍSTICOS

Como ya se introducía en el primer capítulo, los métodos probabilísticos consideran la degradación como un proceso estocástico, donde se define la probabilidad de deterioro para cada propiedad durante un periodo de tiempo. Según este autor, estos métodos, debido a la dificultad de aplicación en situaciones reales, sólo son rentables en proyectos a gran escala. Para la aplicación de métodos probabilísticos, es necesario poseer datos reales recogidos durante un dilatado periodo de tiempo. El modelo más utilizado en los métodos probabilísticos es el modelo Markov, en la Norma ISO 15686 Parte 7 se propone este modelo en el anexo B en la predicción de la vida útil residual.

Ejemplos de predicciones de la vida útil utilizando herramientas probabilísticas pueden encontrarse en numerosas publicaciones. La mayoría tratan un solo material o un solo ambiente de exposición. Los principales campos de aplicación son la vida útil de hormigón armado, la vida útil de los pavimentos (calles o aeropuertos), y la vida útil de elementos de la envolvente del edificio, especialmente de madera, tales como ventanas o revestimientos de paredes y techos.

El hormigón es un material dominante en la medida en que la durabilidad se analiza en condiciones ambientales severas. Son muy comunes ejemplos de durabilidad a la vista de una posible penetración de cloruro en el hormigón. En muchos de los estudios se trabajan estados fijos de exposición, sin embargo algunos autores, los han considerado variables (humedad, humectación, secado, etc.).

Las bases de datos, resultado de las investigaciones no parecen estar disponibles todavía. Este tipo de métodos, se aplican en proyectos con apoyo económico privado, lo que hace que no se haga difusión pública de los resultados, lo cual dificulta en gran medida la investigación al respecto.

3.1.1 Aplicación de métodos de predicción probabilística: Modelo de Markov para el deterioro

Como ya se ha comentado, el modelo más utilizado en los métodos probabilísticos es el modelo de Markov. Este método se basa en la hipótesis, que un modelo de deterioro se puede definir a partir de un número limitado de condiciones. El modelo de Markov supone que el deterioro es un proceso estocástico que se rige por variables aleatorias. La estructura se puede dividir en un número de componentes, que se deterioran al azar. Para cada componente se establecen los parámetros principales de la degradación, junto con las variables de deterioro, todo ello en función del tiempo. Los proyectos de investigación y los grandes proyectos de ingeniería a menudo se basan en modelos como el modelo de Markov, para estimar la vida útil.

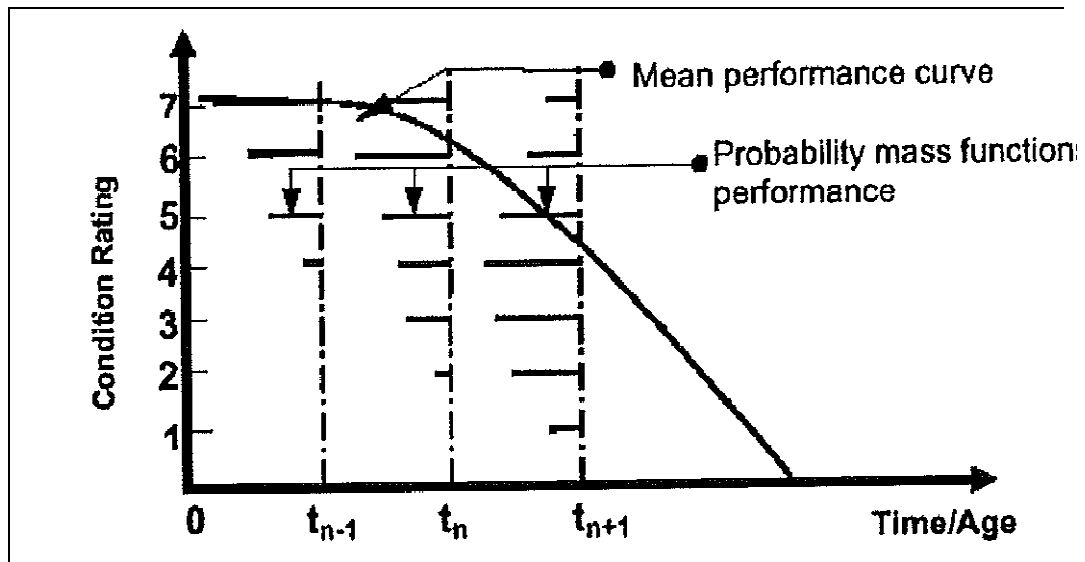


Figura 11. Función de deterioro de Markov

Se muestran a continuación ejemplos de aplicación de métodos probabilísticos utilizando el modelo Markov:

- Abraham y Wirahadikusumh en *“Development of Prediction Models for Sewer Deterioration”* Tratan la vida útil de líneas de alcantarillado:

“Debido a su escasa visibilidad, a menudo se descuida el mantenimiento del alcantarillado, se descuidan hasta el punto, que llegan a ocurrir fallos catastróficos. El descuido de un mantenimiento regular de estos servicios públicos subterráneos se añade a los costes del ciclo de vida. La incorporación de datos del estado y deterioro de los sistemas de drenaje de la ciudad es fundamental para obtener una evaluación realista de las infraestructuras. El documento explora la probabilidad de un enfoque basado en modelos de deterioro de Markov. Este enfoque se basa en el supuesto que, dado que el comportamiento de las líneas de alcantarillado, es decir, (la tasa de deterioro) es incierta, la selección de una estrategia adecuada de reparación es

también un procedimiento incierto. Los modelos de predicción basados en probabilidad, permiten la comparación de las proporciones esperadas en un estado de condiciones dado con las proporciones reales observadas, y de esta manera identificarse posibles defectos en la construcción, los materiales, control de calidad, etc. El Departamento de Gestión de Activos de Capital (DCAM) ha utilizado las conclusiones de ingenieros expertos que han llevado a cabo la inspección visual del alcantarillado en la ciudad de Indianápolis, para validar los modelos de deterioro desarrollados en la investigación. Modelos de deterioro más realistas ayudarán a las administraciones en una mejor modelización de la infraestructura de alcantarillado y también en la determinación de los costos del mantenimiento de esta infraestructura sobre una base de estimaciones sobre su posible deterioro.”

- Leira, en “Degradation analysis by stadistical methods” (Análisis de la degradación a través de métodos estadísticos) trataron diversos métodos:

“A fin de mejorar la toma de decisiones en el mantenimiento y rehabilitación, es esencial mejorar nuestra comprensión acerca de los procesos de deterioro. Se deben desarrollar un conjunto de herramientas que permitan tomar decisiones con criterio. Estas deben basarse en, o como mínimo tener en cuenta, el conocimiento existente de los fallos ocurridos. Los métodos estadísticos pueden ser considerados como una forma de organizar estos datos. Este artículo describe como los métodos estadísticos se pueden aplicar en la previsión de las necesidades de rehabilitación. Se muestran ejemplos de métodos básicos de tendencias (TrendPlots), métodos de supervivencia (survivalmethods), condición de transición de clase (condition class transition) y el método estocástico de análisis de parámetros (stochastic model parameter analyses)”

Year	i/j	t + 1			
		1	2	3	4
T	1	p ₁₁	p ₁₂	p ₁₃	p ₁₄
	2	p ₂₁	p ₂₂	p ₂₃	p ₂₄
	3	p ₃₁	p ₃₂	p ₃₃	p ₃₄
	4	p ₄₁	p ₄₂	p ₄₃	p ₄₄

Where

- t = year t
- t+1 = the following year
- 1,2,3,4 = condition state number
- i = condition state in year t
- j = condition state in year t+1
- p_{ij} = probability of transition from condition state i to j in the time period from year t to year t+1

En la siguiente tabla los autores hacen un resumen de los métodos estocásticos usados hasta el momento:

CLASE	MÉTODOS	SECTOR/CASO	NECESIDAD DE DATOS
Gráficos de tendencias	Nelson Aalen Plots	Red de agua Autopistas Puentes Presas Muelles Elementos constructivos	Registro de datos a largo plazo
Métodos de supervivencia	Distribuciones de Poisson Weibull Cox Herz	Tuberías de agua	Registro de datos a largo plazo
Condición de transición de clase	Cadena de Markov	Autopistas Carreteras Red de Agua Presas Puentes Muelles	Gran volumen de datos
Modelo estocástico de análisis de parámetros en modelos determinados	Métodos estructurales de fiabilidad. Diseño de los estados límite.	Elementos y sistemas estructurales	Datos de ensayos de campo y de laboratorio

Figura 12. Aplicación de diferentes métodos estadísticos para análisis de la degradación.

- Ansell, presenta un modelo de Markov para estimar la vida útil de los elementos del puente de Suecia:
*“La vida útil de los puentes de carreteras de Suecia ha sido previamente estudiada por la recogida de informes de inspecciones y otra información relevante en 353 puentes. Se reunieron un total de 3747 inspecciones de puentes con el tipo y la causa de los daños, y a cada elemento se le dio una clasificación. Esta información se introdujo en la base de datos.
 El deterioro de las partes del puente se puede analizar numéricamente utilizando el modelo de Markov. El deterioro de un elemento estructural concreto, debe ser definido por una serie de estados, en este caso concreto por los estados clasificados previamente. Un vector de estado que da lugar a un nuevo estado después de la multiplicación a través de una matriz de transición de probabilidad definida por una población de elementos. Se demuestra como una matriz de transición de probabilidad puede describir el proceso de deterioro de un elemento del puente a partir de la información de la base de datos.”*
- Kaempfer, aplicó un modelo de deterioro simplificado a la red de alcantarillado:

“el estado de conservación de las tuberías de alcantarillado y sus conexiones se evalúa respecto a los daños producidos. Los daños concretos se asignan a una de las cinco clases de daños. Las diferentes clases van desde daños muy graves a insignificante.

En una segunda etapa, el estado de conservación de la red de alcantarillado se evalúa de acuerdo a daños mayores. Los datos de la evaluación se introducen en una base de datos de alcantarillado de acuerdo a su funcionalidad y variables estables tales como las sección de alcantarillado, la capacidad hidráulica, frecuencia de desbordamiento, material, año de construcción, geometría, tamaño de la protección y la carga de tráfico. En una tercera fase la correlación entre las secciones de la red y el año de construcción o la diferente funcionalidad y las diferentes variables se describen gráficamente. Las curvas de envejecimiento se derivan de los datos disponibles de las inspecciones y el año de construcción para cada estado de conservación el promedio de vida útil residual de la red de alcantarillado y el punto de intersección con la curva de envejecimiento del estado de conservación. Las diferentes intersecciones en la línea horizontal con la curva de envejecimiento de los distintos estados de conservación indican la edad en que la red es probable que descienda en un nivel de estado de conservación, de la misma forma que en la etapa anterior estaba en un estado mejor de conservación.”

- En la norma ISO 15686 Parte 7 Performance evaluation for feed back of service life data from practise, en el anejo B para la predicción de la vida útil residual, se propone el modelo de la cadena de Markov para la predicción del rendimiento de un edificio en el tiempo. La ISO 15686-7 proporciona una base genérica para la retroalimentación de los datos de la vida útil de los edificios existentes.

“La vida útil residual debe predecirse a partir de distribuciones del nivel de rendimiento de la construcción, por estados límites o niveles de aceptación. El nivel de deterioro de un componente puede estar directamente relacionado con el rendimiento, y cuando se conocen las funciones de deterioro, se puede calcular la vida útil directamente. La evolución en el tiempo del nivel de rendimiento y, posteriormente, la vida útil, también se puede calcular mediante el modelo de la cadena de Markov.

B.2 Predicción del rendimiento en el tiempo a partir de la cadena de Markov.

Los modelos markonianos de degradación son matrices de probabilidad de transición, que indican las probabilidades de transición de una estructura para pasar de un estado de condiciones B a un estado de condiciones A en un periodo de un año ($B > A$). En ellas se describe el tipo medio de degradación de las estructuras de una forma probabilística. Estos modelos permiten al usuario reproducir matemáticamente los efectos de las acciones de mantenimiento y acciones de reparación para un estado y una velocidad de degradación de la estructura. Con el método de la cadena de Markov, se puede evaluar la probabilidad de que la estructura esté en cualquier estado en cualquier momento durante periodo de trabajo.

Los modelos de las acciones de mantenimiento, reparación y restauración de los modelos matriciales markonianos que muestran la probabilidad de una estructura que se desplaza de una condición de estado a cualquier otra condición de estado como

resultado de la acción (B<A). Los recubrimientos y otros métodos de mantenimiento y protección se deben incluir en los modelos de degradación y acción.”

3.1.2 Variables definidas como distribuciones: enfoques semideterministas – semiprobabilísticos

Los métodos probabilísticos a menudo cuantifican las incertidumbres en forma de distribuciones de densidad. En la Norma ISO 15686 Parte 8, se establece que en la aplicación del método de los factores explicado en la ISO 15686 Parte 1, se puedan utilizar distribuciones o funciones de probabilidad. De hecho se aportan ejemplos de esta aplicación, los cuales se resumirán más adelante. Se podría considerar que en este caso la norma permite utilizar un enfoque semideterminista – semiprobabilísticos.

En este apartado se han considerado algunos ejemplos de este tipo de aplicaciones, ya que este concepto puede ser útil para la aplicación de los métodos de ingeniería. Para la evaluación de la vida útil utilizando fórmulas con varias variables, en lugar de los valores estándar, se pueden utilizar las distribuciones.

- Enright y Frangopol, estudiaron el deterioro de los puentes de las carreteras utilizando series de variables temporales, donde la fiabilidad tanto de la carga como de la resistencia dependen del tiempo. El mínimo nivel de seguridad rige el final de la vida útil. El objetivo del análisis consiste en el desarrollo de una estrategia basada en el mantenimiento:

“La experiencia ha demostrado que los puentes de las carreteras son vulnerables a los daños causados por la exposición a las condiciones climáticas, tales como la reacción alcali-sílice, la corrosión, o los ciclos de hielo-deshielo. Para tomar decisiones racionales en una perspectiva de coste del ciclo de vida, es necesaria la predicción realista de la vida útil de los puentes. Para obtener un conocimiento fidedigno de este problema, se deben utilizar métodos basados en variables temporales. La aplicación de estos métodos en el rendimiento y la evaluación de la seguridad estructural son relativamente nuevas. En este estudio, se investiga la fiabilidad de las vigas de hormigón armado de los puentes bajo condiciones ambientales agresivas, usando un sistema de series de variables temporales de fiabilidad variable, en el que tanto la carga como la resistencia dependen del tiempo. Se utiliza una simulación Monte Carlo para encontrar el sistema acumulativo de probabilidad de colapso. Se analizó un puente existente de vigas de hormigón armado cerca de Colorado. Se estudiaron distintos parámetros como la variabilidad en las cargas, pérdida de resistencia, tiempo de inicio de la degradación y el número de vigas en exposición durante el tiempo de estudio de las variables”.

- Lounis, en “Further steps towards a quantitative approach to durability desing” presentan nuevos avances:

“Se propone un enfoque alternativo utilizando la teoría de proceso estocástico para formular el problema de la predicción de la vida útil como un problema cruzado para el

que la probabilidad de fallo de las vidas útiles de los componentes se obtiene de el primer paso del sistema estocástico. Además se presenta una formulación basada en la vida de servicio utilizada para su predicción con el fin de ilustrar su equivalencia con la formulación llevada a cabo.

Se demuestra que, en principio, los mismos enfoques probabilísticos utilizados para la seguridad y el mantenimiento en el cálculo estructural son también aplicables para la predicción de la durabilidad. El objetivo de la predicción de la durabilidad es mantener la probabilidad de fracaso dentro de un intervalo de tiempo determinado (o la vida de servicio) por debajo de un cierto valor límite que dependa de las consecuencias del fallo del componente o sistema.

El modelo Markov considera constantes los sistemas degradantes, donde para la propiedad, durante cada periodo de tiempo, se define la probabilidad de deterioro. Este método, requiere una entrada de datos muy sofisticada en forma de probabilidades, que no son fáciles de estimar, ya que no se extraen de una forma directa, no se pueden leer directamente el comportamiento real de la estructura.”

- Fagerlund, trata el ataque del hielo utilizando esta variación del enfoque probabilístico:

“Los principales parámetros: La saturación, crítica y efectiva, y las heladas, se introducen como distribuciones. Los daños por heladas importantes no se producen hasta que se transgrede un cierto nivel crítico de humedad. El nivel de humedad crítico es un “valor acorde”, que puede compararse con la capacidad de carga en el ámbito del diseño estructural. Se trata de una propiedad del material que parece estar bastante influenciada por variaciones normales en el medio, como un número de ciclos de hielo y deshielo y la temperatura mínima de congelación. El contenido de humedad dentro de la estructura depende de las condiciones de humedad exterior, en un ambiente más húmedo, mayor es la humedad interior el contenido, y mayor por lo tanto el riesgo de daños por heladas. El contenido real de humedad en la estructura de un material puede ser comparado con la carga real en el diseño estructural.”

- Flourentzou, utiliza cuatro esquemas típicos de degradación para cuantificar el comportamiento de un elemento:

“La vida útil de los edificios es un factor importante, por ejemplo en la evaluación del ciclo de vida y en la evaluación de los costes globales. Hoy en día hay mucha información disponible sobre la vida útil de los elementos constructivos testada. Sin embargo, en los edificios existentes esa información es de poca utilidad, pues la cuestión clave es la fecha estimada de reparación/sustitución. MEDIC “Prediction Method of probable Deterioration Scenarios and Refurbishment Investment Budgets” (Método de predicción de los escenarios probables de deterioro y de inversión en propuestos de rehabilitación) se desarrolla con teorías de probabilidades condicionales

para ayudar a evaluar la vida útil residual y por lo tanto las inversiones necesarias en rehabilitación.

Cuando se pasa de trabajar con objetos generales, como la vida útil del hormigón, a trabajar con objetos específicos, por ejemplo estructuras de hormigón de 29 años de edad, se debe tener en cuenta el estado actual del objeto. Por esta razón, la evaluación de la vida útil residual debe estar estrechamente conectada a un buen método de diagnóstico. En el proyecto europeo EPIQR “Energy Performance Indoor Environment Quality Retrofit”, el deterioro de los componentes y materiales de un edificio se describen a través del uso de un sistema de clasificación con cuatro clases cualitativas. MEDIC calcula la probabilidad de cambiar de una clase a otra con el tiempo. La predicción se basa en la combinación de la probabilidad, a priori basada en la experiencia, de un gran número de investigaciones/rehabilitaciones anteriores y en el estado actual del objeto en estudio.”

3.2 MÉTODOS DE INGENIERÍA

Los métodos de ingeniería son de fácil aplicación como el método de los factores, y además describen los procesos de degradación de una forma probabilística, como los métodos probabilísticos. Según Daniotti, los métodos de ingeniería se pueden utilizar para identificar los fenómenos de degradación de forma más analítica, pudiendo así controlarlos en proyecto a través de la planificación del mantenimiento.

Según Hovde y Moser, los requisitos para los métodos de diseño de ingeniería deben ser:

1. El método debe ser fácil de entender.
2. El método debe ser fácil y rápido de aplicar.
3. Los resultados deben ser (para las simplificaciones que se han considerado) realista.

Algunos de los métodos de Ingeniería más conocidos son el Análisis Modal de Fallos y Efectos del Proceso AMFE (Failure Mode effects Analisis FMEA) y el Método de los Estados Límite (Performance Limits Methods).

3.2.1 Análisis Modal de Fallos y Efectos del proceso AMFE

El Análisis Modal de Fallos y Efectos del Proceso (AMFE) se desarrolló inicialmente en los años sesenta en el sector aeronáutico. Su transposición al mundo de la construcción ha sido recientemente y ha consistido en su utilización en la evaluación de la vida útil de productos. Uno de los objetivos de este método es obtener una lista lo más completa posible de los agentes de degradación que pueden operar durante su fase operativa.

Talon, realizó un estado del arte de la aplicación de este tipo de métodos en el campo de la edificación denominado “Failure modes effects and criticality analysis research for and application to the building domain”.

“Este informe presenta un estado de la técnica en materia de investigación y aplicación de FMEA en el campo de la edificación. Empezando en resumen de los objetivos,

enfoques y aplicaciones de las organizaciones y personas que trabajan en FMEA y FMECA, este informe ofrece una lista bibliográfica de artículos, informes y documentos relacionados con el trabajo: Por último, se han incluido en los Apéndices una selección de trabajos publicados y los informes no publicados que han sido utilizados para la elaboración de este informe.

Con la presentación de varios estudios de investigación y aplicaciones en el campo de la edificación, este documento pone de relieve la evidente utilidad de métodos FMEA y FMECA para ayudar a promover futuras investigaciones y nuevas aplicaciones de estos métodos.”

En el documento se nombran las siguientes aplicaciones de los métodos AMFE en el campo de la edificación:

- Sistemas de cubierta
- Ventanas de madera
- Muros de piedra
- Vidrio doble
- Vidrio aislante
- Paneles solares
- Muros tradicionales italianos

Se muestra a continuación algunos ejemplos de aplicación de este enfoque:

- Lair, predice la vida útil utilizando dos enfoques. Por un lado, llevan a cabo un Análisis Modal de Fallos y Efectos del Proceso. Este método permite la identificación de los modos de fallo, es decir, el incumplimiento de una de las funciones para las que esa parte del edificio fue diseñado. Por otro lado, recogen información de la vida útil de todas las fuentes disponibles (opinión de expertos, estudios estadísticos, modelización artificial y envejecimiento natural, etc...) evaluando su calidad, y, por medio de un procedimiento de fusión de datos, dar una probabilidad de fracaso, junto con los valores más optimistas y pesimistas (límites superior e inferior).

“La evaluación de la vida útil de los productos de la construcción es importante para todos los sectores que intervienen en la construcción de un edificio (las compañías de seguros, fabricantes, propietarios de edificios y arquitectos). De hecho, el conocimiento de la vida útil de un producto lleva a una reducción de los costes de mantenimiento y del impacto medioambiental además de una mejora de la seguridad. Este artículo trata de un enfoque metodológico para la evaluación de durabilidad. Los pasos principales son:

- *Búsqueda de los datos disponibles sobre durabilidad y su organización en gráfica seguida de la evaluación de la fiabilidad de los mismos.*
- *Un análisis modal de fallos y efectos del proceso, incluyendo uno estructural y uno funcional. Análisis con el fin de buscar todos los posibles fallos.*

El método propuesto es un multi-modelo y tiene enfoque multi-escala, multi-modelo con el fin de ajustar el modelo con nuestro conocimiento (la modelización de la vida real de los edificios, pero no un modelo demasiado complejo e inutilizable), multi-escala para tener en cuenta los vínculos entre las tres escalas geométricas materiales/productos/edificios. Por último, se da:

- (1) Distribución de la vida útil nominal, para el proceso normal de la intemperie, con fiabilidad correspondiente y grados de plausibilidad.*
 - (2) Detalles sobre el diseño y la aparición de problemas, en situaciones excepcionales, que podrían conducir a una vida útil más corta.”*
- El objetivo de mejorar la calidad de los productos y el mantenimiento en el campo de la edificación, integrando los objetivos de desarrollo sostenible lleva a Talon a proponer un método original basado en el uso y adaptación de los Análisis Modales de Fallos y Efectos del Proceso (FMEA).

“Esta herramienta tiene como objetivo mejorar la fiabilidad y la calidad de los productos innovadores mediante el desarrollo de acciones preventivas de análisis de riesgos y de gestión de la calidad en las etapas de diseño e instalación. Tratamos de facilitar el seguimiento operativo de los productos existentes mediante la creación de planes de mantenimiento y procedimientos de inspección de mantenimiento. Estas acciones correctivas se realizan durante la etapa de explotación. Esta herramienta también nos permite reunir la experiencia de los expertos. Queremos informatizar este método a fin de ofrecer una herramienta útil para los agentes de la edificación.

Los primeros pasos del método incluye un análisis estructural (definición del producto, sus componentes y el medio ambiente), un análisis funcional (identificación de funciones que asumen el producto y sus componentes), y un análisis de procesos (estudio de las etapas del proceso).

A continuación, se llevó a cabo un Análisis Modales de Fallos y Efectos del Proceso (AMFE) con el fin de identificar modos de fallo (investigación de las degradaciones y los fallos de los componentes), sus causas y efectos, teniendo en cuenta los posibles problemas y errores durante el proceso de construcción.

Un análisis cuantitativo nos permitirá representar a la evolución temporal de las degradaciones, la intensidad del fenómeno involucrado y la densidad geométrica de las degradaciones. Por otra parte, un análisis crítico nos permitirá seleccionar los modos de fallo más comunes.

En primer lugar, tenemos la intención de tener en cuenta todo el conocimiento disponible sobre el producto estudiado: su composición físico-química, la topología, la morfología, el funcionamiento, y el medio ambiente...

En segundo lugar, buscamos usar, analizar, tratar y aprovechar toda la información de las degradaciones y los fallos que puedan dañar el producto examinado: Causas,

modos de degradación, las consecuencias, los riesgos para el producto y su entorno, el encadenamiento de las degradaciones que provocó el fracaso del producto...

En tercer lugar, nuestro objetivo es que el método sea fácil de aplicar para los agentes del sector de la construcción. Esto motiva el desarrollo de bases de datos y representaciones gráficas.

Nuestro objetivo final es desarrollar un software asociado al método. Por lo tanto queremos que cada paso pueda ser fácilmente automatizado.”

3.2.2 Método de los estados límite

El Método de los Estados Límite, pretende evaluar la durabilidad de los elementos de construcción mediante la simulación de su comportamiento en el tiempo, hasta que llegue al final de su vida útil. En este método, el fenómeno de degradación se mide por una cadena de relación:

Agentes → Acciones → Efectos → Degradación

Como el ejemplo más representativos de aplicación de este método, en 2008 se publicó la norma ISO 13823 General Principles on the Design of Structures for Durability (Principios generales en el diseño de estructuras para la durabilidad). Esta norma especifica principios generales y los procedimientos recomendados para la verificación de la durabilidad de estructuras sometidas a condiciones climáticas conocidas, incluidas las acciones mecánicas, provocando la degradación del material produciendo un fallo. El enfoque adoptado en la norma asegura su fiabilidad a través del diseño de la vida útil de la estructura. Fue pensado para mejorar la evaluación y diseño de estructuras para una mayor durabilidad mediante la incorporación de un enfoque de ingeniería. Además, esa norma establece un marco para el desarrollo de modelos matemáticos para predecir la vida útil de los componentes de la estructura. El objetivo es organizar que todos los modelos de análisis se incorporan en el método de estados límites, el mismo que se utilizan actualmente para la verificación y el diseño de estructuras. Abarca: conceptos básicos para la verificación de la durabilidad; requisitos de durabilidad, la vida de diseño de una estructura y sus componentes; predicción de la vida útil, y, estrategias para el diseño de la durabilidad. La norma ya ha sido utilizada para su uso en la evaluación de la durabilidad de estructuras arquitectónicas históricas.

Introducción de la variable tiempo en la evaluación de acciones para estructuras de edificación.

Desde la publicación en 2006 del Código Técnico de la Edificación (CTE), para los Estados Límite Últimos (ELU), la seguridad en la evaluación de las acciones que actúan sobre las estructuras de edificación se debe realizar siguiendo las directrices marcadas por los Eurocódigos Estructurales. No he encontrado normativa alguna sobre el cálculo de vida útil de GALERÍA DE SERVICIO, por lo que empleo los datos del CTE sobre hormigón. [Cabrera y De las Heras, 2008]

La idea de que un edificio y sus instalaciones es para toda la vida, es decir sin límite temporal, ha dejado de ser un referente. CTE establece que la vida útil de una estructura, normal, de edificación CTE es de 50 años. Añadiendo la referencia de que si la vida útil difiere de este valor, estándar, se indique el oportuno en las bases de cálculo.

En general la seguridad en las acciones que actúan sobre una estructura se logra, multiplicando sus valores representativos por unos coeficientes de seguridad pactados.

Las situaciones de cálculo contempladas por CTE son tres:

- 1/ Situaciones permanentes o transitorias.
- 2/ Situaciones accidentales.
- 3/ Situaciones sísmicas.

Evaluar las acciones sobre una estructura de edificación, CTE no introduce la variable tiempo en la vida útil estructural. Por ello no llega a distinguir, a nivel de cálculo, las situaciones permanentes de las transitorias.

Si se introduce la variable tiempo en estructurales provisionales, como por ejemplo en un andamio, un apeo o un apuntalamiento (vida útil ≤ 10 años), parece evidente que puedan utilizarse valores distintos en las acciones que los utilizados para un edificio normal (50 años) o un edificio monumental (100 años).

El presente apartado profundiza en los valores las acciones que actúan sobre una estructura conforme a la vida útil para la que se proyecta, especialmente cuando su vida útil es menor de 50 años como sucede, frecuentemente, en el campo de la rehabilitación y todo ello sin merma de la seguridad pactada.

El siguiente apartado sigue las directrices y formulaciones dadas en los Eurocódigos Estructurales y no incorporados, hasta el momento, en CTE.

La vida útil de una estructura de edificación en CTE.

El CTE, establece en 50 años la duración útil estándar, es decir, el periodo de servicio normal de una estructura de edificación. También indica que si el periodo de servicio previsto para un proyecto difiere de éste valor de 50 años, se indicará su duración prevista en las bases de cálculo y en su caso, en el correspondiente anejo de cálculo.

El documento contenido en el Eurocódigo UNE EN-1990. Bases de cálculo de estructuras establece la duración correspondiente a cada tipo estructural de referencia, tal como se indica en la siguiente tabla:

Vida útil de cálculo indicativa

Categoría de vida útil de cálculo	Vida útil de cálculo indicativa	Ejemplos
1	10	Estructuras temporales (1)
2	10 a 50	Partes de estructuras reemplazables, por ejemplo: vigas de rodadura, aparatos de apoyo
3	15 a 30	Estructuras agrícolas y similares
4	50	Estructuras de edificios y otras estructuras comunes
5	100	Estructuras de edificios monumentales, puentes y otras estructuras de ingeniería civil.

(1) Estructuras o partes de estructuras que puedan desmontarse con la intención de volver a usarse no deberían considerarse como estructuras temporales.

Tabla 1 “Vida útil de las estructuras según Eurocódigo EN-1990”

Parece, entonces, que no se deben utilizar los mismos valores de cálculo en la evaluación de las acciones para una estructura provisional como un apeo o apuntalamiento (vida útil ≤ 10 años), que para un edificio normal (50 años) o para un puente o edificio monumental (100 años).

Combinación de las acciones.

Para Estados Límite Último (ELU) el CTE establece la expresión:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} * P_{k,j} + \gamma_P * P + \gamma_{Q,1} * Q_{K,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} * \psi_{O,i} * Q_{k,i} \tag{1}$$

Donde:

$\gamma_{G,j}$ es el coeficiente de seguridad para las acciones permanentes.

γ_P el coeficiente de seguridad para la acción del pretensado.

$\gamma_{Q,1}$ el coeficiente de seguridad para la acción variable determinante.

$\gamma_{Q,i}$ 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 el valor característico de la acción del pretensado, el valor característico de cada acción variable y los coeficientes de combinación (simultaneidad) para las acciones variables (definido en CTE).

Cuando la duración de una estructura difiere del valor estándar fijado en 50 años, cabe actuar de manera unitaria siguiendo una de estas opciones:

- 1/ Definir distintos coeficientes de seguridad (γ) según la vida útil estructural.
- 2/ Definir distintos coeficientes de combinación ($\psi_{0,i}$) según la vida útil.
- 3/ Distinguir distintos valores característicos de las acciones según la vida útil.

El Eurocódigo se define por la última y por ello se convierte en guía de este estudio.

Documentación de apoyo.

El Eurocódigo proporciona los principios generales y las orientaciones para la aplicación de los métodos probabilísticos en los cálculos estructurales. EN-1990 y en las normas internacionales ISO 2394 e ISO 13822, se indican unas bases teóricas para la utilización del método de los coeficientes parciales y unos procedimientos para su determinación.

Principios generales.

Los métodos probabilísticos básicos se emplean para analizar principios de diferenciación de la fiabilidad. Se distinguen esencialmente dos casos:

1/ La vida de uso calculada T_d es breve en comparación con la vida útil estándar (por ejemplo, 5 ó 10 años); éste es el caso de estructuras temporales o auxiliares.

2/ Se considera un periodo alternativo de referencia T_a (por ejemplo 100 años), que resulta diferente de la vida de uso estándar $T_d = 50$ años. Este caso es aplicable cuando modelos de probabilidad asociados al periodo T_a son más creíbles que los asociados a T_d .

El Eurocódigo y los métodos de fiabilidad.

En el método de los coeficientes parciales, se dan valores de cálculo a las variables básicas, es decir, acciones, resistencias, y propiedades geométricas. Mediante el uso de coeficientes de seguridad parciales γ , y de unos coeficientes de simultaneidad ψ se efectúa una comprobación para asegurarse que no se ha superado ningún estado límite pertinente.

Como principio los valores numéricos de los coeficientes parciales γ y de los coeficientes ψ pueden determinarse por uno cualquiera de estos dos métodos:

Método "a". Sobre la base de calibración a una larga experiencia de tradición en la edificación. Para la mayoría de los coeficientes parciales γ y de los coeficientes ψ propuestos en los Eurocódigos, hasta la fecha, este es el principio predominante.

Método "b". Sobre la base de evolución estadística de datos experimentales y observaciones de campo. Esto debe llevarse a cabo dentro del marco de una teoría probabilística de la fiabilidad.

Cuando se emplee el método "b", bien individualmente o bien en combinación con el método "a", se deberían calibrar los coeficientes parciales de los estados límite últimos para las distintas acciones de forma que los niveles de fiabilidad de las estructuras estén lo más próximos posible al índice de fiabilidad deseado.

El índice de fiabilidad β .

En los procedimientos de nivel II se define convencionalmente una medida alternativa de la fiabilidad mediante el índice de fiabilidad “ β ”. EN-1990 proporciona los siguientes datos para este índice y su relación con la probabilidad de fallo

Relación entre β y P_f

P_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
β	1,28	2,32	3,09	3,72	4,27	4,75	5,20

Tabla 2 “Relación entre la probabilidad de fallo y el índice de fiabilidad, EN-1990”

La fórmula que los relaciona es:

$$P_f = \phi(-\beta) \tag{2}$$

Donde ϕ es la función de distribución acumulada de la función de probabilidad normal estándar (valor medio: $0\mu=$ y desviación típica: $\sigma= 1$). β es el denominado índice de fiabilidad, definido para una distribución normal como:

$$\beta = \frac{\mu}{\sigma} \tag{3}$$

Los datos estadísticos alcanzan mayor interés si se relacionan conjuntamente con los índices objetivos de fiabilidad para elementos estructurales y con el tiempo de vida útil de una estructura.

Valores objetivo del índice de fiabilidad β .

Los valores objetivo del índice de fiabilidad β para las distintas situaciones de proyecto, y para los periodos de referencia de 1 año y 50 años, se presentan en la tabla siguiente (Eurocódigo EN-1990) y corresponde a niveles de seguridad para elementos estructurales de la clase de fiabilidad denominada RC2.

Índices objetivo de fiabilidad β para elementos estructurales ¹⁾ de clase RC2		
Estado límite	Índice objetivo de fiabilidad	
	1 año	50 años
último	4,7	3,8
de fatiga	–	1,5 a 3,8 ²⁾
de servicio (irreversible)	2,9	1,5
1) Véase el anexo B.		
2) Depende del grado de aptitud a la inspección, a la reparación y de la tolerancia a los daños.		

Tabla 3 “Índice objetivo de fiabilidad β para elementos estructurales RC2 en ELU”

En la siguiente tabla se aclara la división de estructuras en las tres clases de fiabilidad: RC3, RC2 y RC1 (del inglés reliability classes) en función de las tres clases de consecuencias.

Clases de fiabilidad	Consecuencias en pérdida de vidas humanas, económicas, sociales y medio ambientales	Valores mínimos del Índice de fiabilidad β		Ejemplos de edificios y obras de ingeniería civil
		β para $T=1$ año	β para $T=50$ años	
Alta (RC3)	Graves (CC3)	5,2	4,3	Estadios, puentes, edificios públicos con aglomeraciones.
Media (RC2)	Moderadas (CC2)	4,7	3,8	Edificios residenciales y de oficinas, edificios públicos.
Baja (RC1)	Leves (CC1)	4,2	3,3	Edificios agrícolas, almacenes, invernaderos

Tabla 4 "Clasificación estructural por nivel de fiabilidad, EN-1990"

Ahora para ELU, se puede completar la (Tabla 2) con objeto de relacionar mejor la vida útil de una estructura con el índice objetivo de fiabilidad. En la tabla siguiente se dan los valores para: 1, 5, 10, 25, y 50 años.

P_f	$1,4 * 10^{-6}$	$7,2 * 10^{-6}$	$1,4 * 10^{-5}$	$3,6 * 10^{-5}$	$7,2 * 10^{-5}$	$1,4 * 10^{-4}$
β	4,7	4,3	4,2	4,0	3,8	3,6
Años	1	5	10	25	50	100

Tabla 5 "Probabilidad de fallo, índice de fiabilidad y vida útil para el riesgo RC2"

Calibración de los valores característicos de cálculo de las acciones.

EN-1990 (Anexo C.7 Aproximación a la calibración de los valores de cálculo), indica las funciones de distribución recomendadas para modificar el valor característico de una acción definido en un determinado código, por ejemplo en CTE.

Tabla C.3 Valores de cálculo para varias funciones de distribución	
Distribución	Valores de cálculo
Normal	$\mu - \alpha\beta\sigma$
Log-normal	$\mu \exp(-\alpha\beta V)$ para $V = \sigma/\mu < 0,2$
Gumbel	$u - \frac{1}{a} \ln \{- \ln \Phi(-\alpha\beta)\}$ donde $u = \mu - \frac{0,577}{a}$; $a = \frac{\pi}{\sigma\sqrt{6}}$

Tabla 6 "Valores de cálculo para varias funciones de distribución"

En la tabla anterior: μ , σ y V son respectivamente, el valor medio, la desviación típica y el coeficiente de variación de una variable dada. Para acciones variables, éstas se deberían basar en el mismo periodo de referencia que para β .

Los valores de los efectos de las acciones de cálculo E_d y de las resistencias de cálculo R_d deben definirse de forma que la probabilidad “ P ” de tener un valor más desfavorable sea como se indica a continuación:

$$P(E > E_d) = \phi(+\alpha_E \beta) \quad (4a)$$

$$P(R > R_d) = \phi(-\alpha_R \beta) \quad (4b)$$

Donde: β es el índice de fiabilidad, α_E, α_R con $|\alpha| \leq 1$, son los valores de los coeficientes de sensibilidad FORM. El valor de α es negativo para las acciones y efectos de las acciones desfavorables, y positivo para las resistencias.

α_E, α_R pueden tomarse como -0,7 y 0,8 respectivamente, siempre que:

$$0,16 < \frac{\sigma_E}{\sigma_R} < 7,6 \quad (5)$$

En donde α_E, α_R son las desviaciones estándar del efecto de las acciones y de la resistencia, respectivamente. En las expresiones (4 a y 4 b) esto da:

$$P(E > E_d) = \phi(-0,7\beta) \quad (6a)$$

$$P(R \leq R_d) = \phi(-0,8\beta) \quad (6b)$$

Cuando no se satisface la condición (ec. 5), debería usarse $1,0\alpha = \pm$ con la variable con la mayor desviación estándar y $0,4\alpha = \pm$ con la variable con menor desviación estándar.

Cuando el modelo de acción contenga varias variables fundamentales, se debería emplear la expresión (ec. 6 a) con la variable predominante. Para las acciones de acompañamiento, los valores de cálculo pueden definirse por:

$$P(E \leq E_d) = \phi(-0,4 * 0,7 * \beta) = \phi(-0,28\beta) \quad (7)$$

Con $\beta = 3,8$ los valores definidos por la última expresión corresponden aproximadamente al fractil 0,90.

Las expresiones que se dan en el Anexo C de EN-1990, ver (Tabla 6) deberían utilizarse para deducir los valores de cálculo de las variables con la distribución de probabilidad dada.

Calibración de los valores característicos en las acciones permanentes.

Consideramos una acción permanente por ejemplo un peso propio G que sigue una distribución normal. Para este caso EN-1990 indica la fórmula (Tabla 6):

$$\mu - \alpha * \beta * \sigma \quad (8)$$

Cuando se emplea en la verificación de la fiabilidad de una estructura un periodo de referencia alternativo T_a en vez de la vida útil estipulada T_d , entonces el valor de cálculo G debe determinarse mediante T_a en lugar de T_d . El valor característico G_k de G se define, para una acción permanente, como su valor medio μ_G (según CTE, ISO-2394 y EN -1990):

$$G_k = \mu_G \quad (9)$$

El valor de cálculo G_d viene dado por la expresión:

$$G_d = \mu_G - \alpha_G \times \beta \times \sigma_G = \mu_G - (-0,7) \times \beta \times \sigma_G = \mu_G (1 + 0,7 \times \beta \times V_G) \quad (10)$$

μ_G es la media.

σ_G la desviación típica.

V_G el coeficiente de variación.

$\alpha_G = -0,7$ es el coeficiente de sensibilidad de G en el método FORM.

El coeficiente parcial de seguridad de G se define, EN-1990 e ISO-2394, como:

$$\gamma_G = \frac{G_d}{G_k} \quad (11)$$

Tomando las expresiones (ec.9), (ec. 10) y (ec. 11) se obtiene:

$$\gamma_G = (1 + 0,7 \times \beta \times V_G) \quad (12)$$

Con un índice de fiabilidad $\beta = 3,8$ y si el coeficiente de variación se toma, como es usual para acciones permanentes, $V_G = 0,1$, entonces tenemos:

$$\gamma_G = (1 + 0,7 \times 3,8 \times 0,1) = 1,266 \quad (13)$$

EN-1990 incrementa la seguridad en, aproximadamente, un 5% para considerar la posible incertidumbre sobre el modelo, tendremos ahora:

$$\gamma_G = 1,05 * (1 + 0,7 \times 3,8 \times 0,1) = 1,05 * 1,266 = 1,33 \cong 1,35 \quad (14)$$

Que es el valor recomendado en EN-1990 y CTE (el valor igual a 1,33 era el coeficiente de seguridad en las acciones que se utilizaba en las estructuras de acero laminado, de la derogada NBE-EA 95, cuando se tenía en cuenta en el calculo estructural: las acciones permanentes, la sobrecarga de uso y las acciones climáticas del viento y la nieve).

Para $\beta = 4,2$ (vida útil = 10 años)

$$\gamma_G = 1,05 * (1 + 0,7 \times 4,2 \times 0,1) = 1,36 \quad (15)$$

Para acciones permanentes se comprueba que, contrariamente a la idea inicial, se debe incrementar ligeramente la seguridad en estructuras temporales.

Jemberg, reflexionan sobre la posibilidad de que los métodos que se han venido utilizando en el cálculo estructural se puedan adaptar al diseño del resto de componentes de un edificio. En el documento realizan una exposición sobre el método de los estados límite:

“El enfoque de diseño estructural en los códigos de construcción moderna se basa en los principios del análisis de fiabilidad. Este enfoque ha demostrado ser muy exitoso, ya que ofrece un diseño racional y objetivo. La base del procedimiento de diseño convencional de la seguridad y la capacidad de funcionamiento de las estructuras con una carga estática se puede expresar como la función de estado límite:

$$R-S=R(X_1, X_2, \dots, X_N) - S(X_{N-1}, X_{N-2}, \dots, X_M) > 0$$

Donde:

R es una función que describe la capacidad de carga de la estructura

S es una función que describe la influencia de la carga en la estructura

Xi es una variable básica para las funciones R o S

Parte de las variables básicas Xi pueden ser factores modelo que representan la incertidumbre en los modelos R y S. El conjunto de estados límite a considerar no está, en principio, limitado al conjunto de estados límite a considerar no está, en principio, limitado al conjunto estándar que está presente en la mayoría de los códigos de construcción.

Un estado límite se puede definir, en general, como la frontera que separa los estados deseados de los estados no deseados o estados negativos. Un estado deseado es una situación que es aceptable para el propietario de la estructura o las autoridades locales o compañías de seguro, donde se define como aceptable para satisfacer las exigencias funcionales primarias.

En todos los códigos de construcción estructurales modernos, se distinguen dos tipos principales de estados límites:

- *Estado límite último (ULS)*
- *Estado límite de servicio (SLS)*

Los estados límite se refieren al colapso, fractura, vuelco, elevación o desplazamiento u otros eventos donde la seguridad de estructura es de importancia. En principio este se refiere a la pérdida de equilibrio estático. El estado límite de servicio estructural se refieren a la funcionalidad (aptitud para el uso).

Este procedimiento de diseño se elabora de tal manera que la probabilidad de fallo está restringida:

$$P \{failure\} = P_f = P \{R - S < 0\} < P_{target} = \Phi(-\beta)$$

Donde:

P_f la probabilidad de fallo de la estructura.

- 1- P_f , la fiabilidad de la estructura.
- 1 - P_{target} el máximo valor aceptado de probabilidad de fallo.
- ϕ , la función de distribución normal estándar.
- B , índice de fiabilidad.

En la siguiente figura se da un ejemplo sencillo de las funciones de densidad de probabilidad de R y S , lo que demuestra que las combinaciones de R y S son posibles cuando la relación (2) no es válida.”

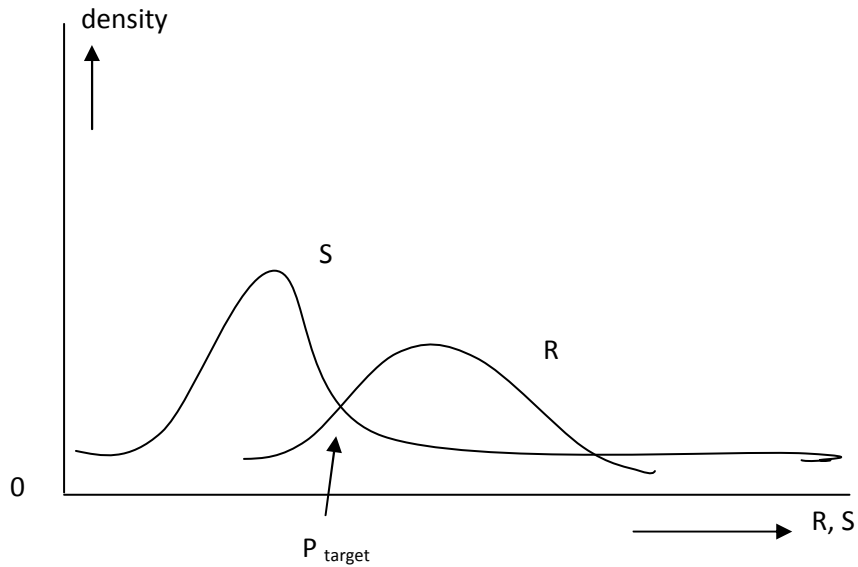


Figura 13. Probabilidad de fallo como consecuencia de la probabilidad de que $S > R$

3.2.3 Ejemplos de métodos de ingeniería propuestos a partir del método de los factores

A continuación se exponen algunos ejemplos de modelos con enfoque de ingeniería basados en el método de los factores según la Norma ISO 15686 Parte 1. Este ejemplo incluido en la Norma se ha incluido en este apartado por incluirse en un estudio que realizaron los autores en el desarrollo de un método de ingeniería, pese a que el ejemplo concreto no es un método de ingeniería en si mismo, sino que corresponde a un enfoque semideterminista-semi probabilística como se ha explicado anteriormente.

- En este contexto Moser, utiliza la definición del método de los factores tal cual la norma ISO 15686 Parte 1, pero emplea variables con funciones de densidad en lugar de cifras. Las variables se basan en los datos facilitados por el fabricante, en ensayos, en la experiencia y en la opinión de expertos. La fiabilidad de los datos en relación a la opinión de expertos se obtienen por aplicación del Método Delphi. La técnica Delphi consiste en una serie de “rondas” de recogida de opiniones a expertos mediante cuestionarios, los resultados de cada ronda se utilizan como base para formulación del cuestionario utilizado en la siguiente ronda. Se les pide a los expertos la estimación del mínimo, la media y el máximo fractales de la variable considerada. Estas estimaciones

se ajustan en la distribución de la densidad de cualquier tipo, tales como: Estándar, simétrica, asimétrica o de otros.

- Aarseth y Hovde, discuten un principio similar en términos más amplios sobre la base de reuniones en Gävle. La función de distribución se limita a la distribución de Erlang con base en las estimaciones del 1% y el 99% fragtales.

“La Norma ISO 15686-1 describe un método determinista que permite una estimación de la vida útil de servicio para un determinado componente o sistema en condiciones específicas. En la “vida real” la vida de servicio tiene una gran dispersión, y debe tratarse como una cantidad estocástica. En esta artículo presentamos el “Step by step” con un enfoque estocástico para el método de los factores de la ISO. El principio del “step by step” proporciona un enfoque más sistemático para el proceso de estimación y hace posible un manejo de los factores estocásticos. Para cada tres estimaciones de un factor se efectuarán, como mínimo, un máximo y el valor más esperado. De esta manera, para cada factor se identifica y estima la incertidumbre. Los factores más inciertos, si es posible, se dividirán en sub-elementos y se reunirá más información con el fin de reducir la incertidumbre.”

También, a diferencia de la propuesta de método de los factores de la ISO Parte 1, las estimaciones se expresan en años, en lugar de un número cercano a 1. Estos cambios facilitan ver las consecuencias de las estimaciones durante el proceso de estimación. Después de un cálculo estadístico de la vida útil estimada, ésta es expresada en tres cifras, el valor esperado más / menos una desviación estándar. La ventaja de este método es la limitación a un conjunto de distribuciones de densidad.

- Hovde y Moser, realizan una propuesta de método para calcular la vida útil. Primero establecen una ecuación que contiene los factores pertinentes en sus niveles relevantes. Esta ecuación puede derivar de la norma ISO 15686-1, u otras fuentes. La ecuación se puede establecer específicamente para resolver un problema concreto. En la ecuación se utilizan, en lugar de simples factores, distribuciones de densidad, con lo que se mejora en gran medida el tipo de información obtenido y la eficacia de los resultados. Los principios generales del método propuesto se definen como sigue:

“1. Establecer una ecuación que describa la vida útil del edificio o componente, teniendo en cuenta todos los parámetros identificados como relevantes. Para los casos estándar, se podrá utilizar la ecuación del método de los factores tal como se dispone en la norma ISO 15686-1. En otros casos, las ecuaciones deberán modificarse o incluso hacerse a medida.

2. Obtener datos sobre los parámetros de la ecuación de la experiencia, de la opinión de expertos, etc. Configurar cualquier tipo de distribución de densidad de probabilidad para los parámetros individuales identificados.

3. Realizar el cálculo de la vida útil.

4. Valorar la verosimilitud de los resultados con la opinión de expertos, y cuando se considere necesario, modificar los datos de entrada en consecuencia.”

En este trabajo Hovde y Moser utilizan un método para la adquisición de datos, el método Delphi, ya utilizado anteriormente por Moser, cuyo origen se remonta a la década de 1980 en el ámbito de la ingeniería. La técnica Delphi consiste en una serie de “rondas” de recogida de opiniones a expertos mediante cuestionarios, los resultados de cada ronda se utilizan como base para la formulación del cuestionario utilizado en la siguiente ronda. En el documento Hovde y Moser explican:

“1. En primer lugar, se reúne un panel de expertos y se les pide opinión profesional sobre la distribución de los siguientes factores, el tipo de distribución (normal, log-normal, Gumbel, etc...), su media y desviación estándar.

Por lo general, es más fácil definir fractiles basados en la experiencia y juicio profesional, digamos, un 5 o un 10%, y la media de los valores y el 90 o 95%. Los expertos, si se les pregunta con precisión, pueden definir perfectamente estos valores.

2. El segundo paso consiste en el cálculo de la vida útil usando los datos de entrada que nos han facilitado el panel de expertos. En las fórmulas matemáticas para el cálculo de la vida útil se utilizan las distribuciones en lugar de los factores simples.

3. El tercer paso es un examen exhaustivo de los resultados y de los parámetros dominantes. Muy amenudo algunos deberán ajustarse para dar resultados que se consideran razonables en aquellas áreas en las que los expertos tienen suficiente experiencia.”

Los ejemplos extraídos del estudio muestran tres variables del método:

“1. Primer ejemplo utiliza los siete factores de la norma ISO 15686-1 bajo el supuesto de que está disponible la información para definir las respectivas distribuciones.

2. El segundo ejemplo trabaja con información limitada. La ecuación tiene que ser modificada, y las distribuciones correspondientes se crean indirectamente, con parte de la información en las diferencias resultantes de la vida útil.

3. El tercer ejemplo se basa en una ecuación totalmente diferente, que se establecerá a partir del sentido común. Se normaliza utilizando un resultado promedio calculado sobre la base de una ecuación basada en una función de fallo.”

Será el primer ejemplo el que será incluido de forma muy similar en la norma ISO 15686 Parte 8. A continuación se exponen un ejemplo propuesto por Hovde y Moser:

Ejemplo 1: Método de ingeniería basado en la simplificación del método probabilístico

Demuestra la predicción de la vida útil utilizando una fórmula relativamente sencilla, diferente a la que se expone en la Norma ISO 15686, se puede hacer de la misma forma, una vez más con la introducción de densidades en los factores involucrados.

Este ejemplo, estudia, la penetración de cloruros en el hormigón. Se basa en un documento que utiliza el enfoque probabilístico sobre la base de funciones de error. En el artículo los autores comparan los resultados de cálculos deterministas y cálculos probabilísticos de la vida útil de estructuras de hormigón armado en dos tipos de clima (+10°C y +30°C). Se determina el recubrimiento de hormigón necesario para una vida útil de 50 años.

Se utiliza el siguiente procedimiento:

“1. El valor medio de la profundidad de penetración de cloruros se calcula como $x = 34$ mm, utilizando la ecuación para 50 años:

$$c(x, t) = c_s - (c_s - c_0) \left(1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right] \right)$$

Donde:

C : concentración de cloruros.

C_s : concentración en la cara exterior.

C_0 : Concentración inicial en el hormigón.

$C_{crit} = 0,1\%$ de la masa de hormigón.

2. Se establece una ecuación simplificada para hallar la profundidad x de penetración de cloruros. Todas las constantes en la ecuación se redondean a una sola constante K :

$$x \approx K(c_s - c_{crit} - c_0)\sqrt{D}$$

3. La constante K se calcula resolviendo la ecuación para el valor medio x . Usando el valor medio de 34mm.

$$K = 38 \cdot 10^3 [s^{0,5}/wt. - \%]$$

VARIABLE	DISTRIBUCIÓN	VALOR MEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
Concentración de cloruros en la superficie	Log-normal	1,0[wt%]	0,3[wt%]
Contenido de cloruro crítico	Normal	0,1[wt%]	0,025[wt%]
Contenido inicial de cloruros	Normal	0,01[wt%]	0,002[wt%]
Coefficiente de difusión de cloruro (10°C)	Normal	$1,0 \cdot 10^{-12} [m^2/s]$	$0,1 \cdot 10^{-12} [m^2/s]$
Coefficiente de difusión de cloruro (30°C)	Normal	$4,0 \cdot 10^{-12} [m^2/s]$	$0,4 \cdot 10^{-12} [m^2/s]$

figura 14. Valores utilizados para los cálculos de la difusión (Hovde y Moser)

La ecuación se lee ahora como:

$$x = 38 \cdot 10^3 (c_s - c_{crit} - c_0) \sqrt{D} [\sqrt{s/\%mass}]$$

Resolviendo esta ecuación mediante una distribución de densidad similar. La asimetría leve de la distribución de densidad resultante es despreciable para indicar las desviaciones estándar.”

En Edvardsen y Mohr, la probabilidad de que se supere el contenido crítico se establece en un 10%. Suponiendo una distribución normal, el valor de fractil del 90% se consigue añadiendo $\lambda=1,28$: $X_{90} = x + \lambda s$. Estos resultados se comparan con los valores exactos del artículo original. Los valores medios son idénticos, así como la desviación estándar para la constante de difusión D1. Para la constante D2, el valor del fractil de esta predicción excede al valor en un 5%.

Constante de Difusión	Valor Medio	Desviación Estándar	Fractil superior del 10%	
			Método de Ingeniería	Edvardsen y Mohr
D1	34 mm	12 mm	49 mm	49 mm
D2	68 mm	23 mm	97 mm	97 mm

TERCERA PARTE: DURABILIDAD DE MATERIALES Y ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

La durabilidad es la capacidad de durar. Un material durable será aquél capaz de resistir las agresiones (provenientes del exterior o de origen interno) debidas a procesos mecánicos, físicos o químicos, en un tiempo razonable conocido por vida útil, prefijado, durante el que ha de permanecer íntegro, con el debido mantenimiento, que actuando externamente o aflorando desde su Interior.

El deterioro es el resultado de procesos alteradores. Todo material es proclive a sufrir alguna alteración, por lo que el conocimiento de sus limitaciones es de vital importancia a la hora de la elección para su empleo. El estudio de las enfermedades de los materiales y elementos con ellos elaborados constituye la disciplina de la patología, éste apartado si bien se aportan algunas reseñas dedicadas a la prevención o a la reparación.

Conocer la naturaleza de la agresión ambiental, elegir el metal adecuado – y dentro del tipo elegido, la composición idónea de la aleación -, y atender al diseño de las piezas, para que su forma por sí misma evite los puntos de acumulación de agua y suciedad, meditando acerca del tipo y diseño de sus uniones, es un trabajo de proyecto y de control de obra ineludible para el Arquitecto y/o Ingeniero. En éste apartado se aborda únicamente la introducción al conocimiento de las manifestaciones típicas de la corrosión, ocasionadas por desatender la naturaleza de la agresión a la que vamos a exponer nuestra construcción, no prestar la suficiente atención a la idoneidad del metal elegido y no poner el suficiente énfasis en el diseño de formas y uniones.

1 ALTERACIONES SEGÚN SU NATURALEZA

Podemos agrupar los principales agentes alteradores de la durabilidad en los siguientes apartados:

1.1 ALTERACIONES DE NATURALEZA MECÁNICA

No pocas veces observamos cómo los materiales y elementos sufren deterioro, llegando incluso a arruinarse, por causa del exceso de tensiones producidas. Las deformaciones excesivas y las grietas son síntomas de una deficiente resistencia mecánica ante una determinada acción exterior.

1.2 ALTERACIONES DE NATURALEZA FÍSICA.

En los elementos construidos apreciamos con frecuencia desórdenes debidos al olvido, en el diseño y/o en su ejecución en obra, de la magnitud de los movimientos que por efecto de las variaciones térmicas o por razones de pérdida o ganancia de humedad se iban a padecer. El agrietamiento y la desolidarización son síntomas de ésta acción patógena. [Guigou, 2000]

II) Debidas a movimientos térmicos.

Todos los elementos expanden en mayor o menor medida con el incremento de la temperatura. Frecuentemente, los elementos constructivos están total o parcialmente coaccionados en sus uniones, y los cambios de temperatura pueden llegar a ocasionar en ellos tensiones considerables. Por incremento de la temperatura se produce una acumulación de energía potencial en el material, que modifica las distancias que fijan sus enlaces internos. El volumen del cuerpo varía proporcionalmente a su tamaño y a la cuantía del cambio de temperatura. La naturaleza del material lo hará más o menos sensible a éstos fenómenos de dilatación o contracción térmicas.

Si se supera la tensión de rotura a tracción del material implicado en el cambio de temperatura, se produce un agrietamiento.

Para prevenir éste hecho patológico, se realiza la provisión de juntas. La junta estructural o constructiva de dilatación es una hendidura linealmente dispuesta de forma premeditada, que divide respectivamente en fracciones un edificio o un componente del mismo, de abertura suficiente para que cada fracción, al dilatar, consuma parte de dicha abertura sin topar con la otra, evitando así el desarrollo de esfuerzos no deseados por perjudiciales para la integridad del componente. Como tal hendidura, la junta constituye una rotura en la estanqueidad del elemento frente al agua que pueda infiltrarse, por lo que precisa un sellado elástico, que permita el movimiento manteniendo los labios de la junta unidos. Cuando dos materiales de distinta naturaleza se proyectan inadecuadamente para trabajar juntos, pueden surgir problemas debidos a que sus variaciones dimensionales por cambio térmico son diferentes, siendo frecuente la aparición de fisuras que denotan la desolidarización de ambos. [Monjo, 2010].

1.3 ALTERACIONES DE NATURALEZA QUÍMICA.

Los desórdenes producidos en la estructura de un material por causa de una reacción química que conduce a una transformación no deseada, atentan contra la durabilidad de lo construido. El material de naturaleza mineral, o metálica u orgánica, va a responder de distinta manera ante un agente patógeno externo, no responderá igual el plomo que el hierro, el PVC que la silicona. [Guigou, 2000]

1.3.1 Agresiones sobre materiales metálicos.

Partiendo de la base del conocimiento descriptivo de los materiales constructivos metálicos, conociendo el tipo de enlace que caracteriza a la estructura cristalina metálica, y sabiendo que la generalidad de los metales son susceptibles de sufrir una agresión que conocemos por corrosión, partimos de que en la naturaleza pocos metales se encuentran en estado libre - entendiéndose bajo ésta denominación a la extracción del metal en estado puro, sin precisar de una intervención metalúrgica para obtenerlo a partir de su mena, lo que nos resulta familiar en algunos metales preciosos, como el oro -.

En la generalidad de los metales, se precisa de unas operaciones que transforman su mena - un óxido, un sulfuro, etc., que son el estado estable del material en su medio, - en el metal libre. Así pues, los metales empleados en construcción se encuentran en la naturaleza de forma combinada - óxido férrico, sulfuro de zinc, etc.- y la metalurgia es la tecnología que

permite obtener el metal a partir de éstos compuestos - el hierro, el zinc, etc.-, empleando energía. La mayoría de los metales - con la excepción de los prácticamente inoxidables oro y platino -, son más estables en estado iónico que en el propio estado metálico, y ésta es la razón de encontrarse en la naturaleza formando compuestos.

Pues bien, los metales generalmente empleados en construcción – destacando el hierro en primer lugar - tienden a volver a su estado originariamente natural, es decir, a adquirir forma de óxido, sulfuro,... Cuando vemos una pieza de hierro que se ha recubierto de herrumbre, generalmente decimos que "esta oxidada" o que " se ha corroído". Así que la oxidación y la corrosión parecen ser las enfermedades más comunes de los metales constructivos.

Sabemos que los metales preciosos no se oxidan a temperatura ambiente. Pero ciertos metales constructivos si que se deterioran, incluso sin presencia de agua, por el sólo contacto con el aire, por lo que precisan de un recubrimiento protector. Éste deterioro por contacto con gases secos, tiene para los arquitectos un ejemplo común en la construcción, que es la oxidación, reacción consistente en la formación de óxido del metal en la superficie de la pieza, mermando la sección de la pieza metálica, o dicho de otro modo, consiste en el incremento de valencias positivas de un elemento metálico por una reacción química, que, comúnmente, al centrarnos en la reacción del metal con el oxígeno, hace que empleemos éste término. La oxidación, pues, se refiere a la combinación de los átomos del metal con los de la sustancia agresiva. Los metales constructivos, generalmente, se deterioran gradualmente en su contacto con el aire, y éste deterioro se incrementa con el aumento de temperatura ambiente, dado que la temperatura en las galerías de servicio no es excesiva, podríamos destacar que el proceso de oxidación será incluso más lento. La tendencia de los metales a la oxidación tiene que ver con el decremento de la energía libre que acompaña a la formación del óxido.

Según sea el metal, la energía libre de formación de su óxido será más o menos negativa (medida en kilocalorías por átomo de oxígeno). En el aspecto termodinámico, se disminuye la energía libre al pasar del estado metálico al estado alterado, esto es, oxidado.

Hay que destacar que la temperatura puede variar la naturaleza del óxido, de forma que un metal que ha permanecido íntegro durante mucho tiempo a bajas temperaturas puede oxidarse muy rápidamente al incrementar la temperatura. En algunos metales, su óxido crece logarítmicamente a temperatura baja, parabólicamente a temperatura media, y linealmente a alta temperatura.

Se puede llegar en el proceso de oxidación a la formación de una capa de óxido que llegue a mermar o incluso consumir totalmente la sección de la pieza, arruinando ésta. Con frecuencia, se observa en los perfiles de acero mal protegidos que el óxido se desprende con la mano, habiendo formado una gruesa costra o una vaina. La transformación del metal en óxido es expansiva, por lo que se incrementa el volumen inicial de la pieza y , además, la capa de óxido y el metal base poseen diferentes coeficientes de dilatación térmica, por lo que es frecuente observar que la gruesa capa de óxido se fisura, y por éstas roturas vuelve a penetrar fácilmente el oxígeno, continuando el ataque.

El concepto de corrosión o corrosión acuosa, en cambio, se reserva para la destrucción involuntaria del metal por un determinado agente externo, en presencia de un medio húmedo, representando la tendencia natural de los elementos componentes de un material a retornar a su estado termodinámicamente más estable. Ésta alteración es de naturaleza electroquímica, pues tiene que ver con el flujo de electrones de un punto a otro de la pieza metálica, originándose una transformación por electrólisis. En la corrosión electroquímica coexisten tres

factores: el ánodo (+), que es el punto o la zona en que los átomos metálicos pierden electrones de valencia, y en donde se produce la oxidación, o dicho de otra manera, es el metal de una celda electroquímica que se disuelve al formar iones (+) y proporciona electrones al circuito exterior ; el cátodo (-), que es la zona donde tiene lugar la reducción, captando electrones y permaneciendo inalterado ; el electrólito, que es el medio agresivo que sirve de transporte de la corriente eléctrica – agua de mar, ácido sulfúrico disuelto.

Algunas atmósferas corrosivas.

La composición del electrólito es frecuentemente el factor que determina la velocidad de corrosión. El propio oxígeno es un constituyente natural del aire, rápidamente absorbe desde el aire al interior de la película de agua sobre la pieza metálica, que, una vez saturada, promueve reacciones de oxidación.

Dado que la corrosión se produce como reacción del metal con el medio ambiente, parece lógico tratar de disponer una capa intermedia que aisle de éste contacto directo. El recubrimiento que se disponga - bien sea una pintura o una capa de otro metal - como ocurre con el acero que se recubre de zinc, y que se denomina acero galvanizado -, deberá poseer una buena adherencia a la base, mínima porosidad, baja permeabilidad al oxígeno y al vapor de agua, y una elevada resistencia al agrietamiento a lo largo del tiempo. Las pinturas, además, exigen una cuidada conservación, operación que resulta a veces muy costosa.

1.3.2 La corrosión

Puede originarse por las siguientes causas, deberemos estar atentos para evitar la corrosión en los diferentes componentes tanto de sujeción como material utilizado para las instalaciones en galerías de servicio. [Guigou, 2001]

A).- POR CAUSAS INTRÍNSECAS AL METAL. Entre éstas manifestaciones, distinguimos:

A.1.- CORROSIÓN UNIFORME. Se presenta por igual en toda la superficie de la pieza, como suele ocurrir con las piezas de acero, sin proteger, expuestas al aire. De atajarse a tiempo, resulta de fácil solución, y puede evitarse con una adecuada protección superficial. Es la forma más simple de corrosión, produciéndose en cierta velocidad de pérdida de material - dependiendo de la severidad del ambiente y de lo adecuado de la protección de la pieza - sobre la superficie expuesta, debido a un ataque químico o disolución de componentes metálicos en iones metálicos, expresándose usualmente en pérdida de grosor de metal por unidad de tiempo (medida en milímetros por año). No solo la pérdida de metal debe ser considerada, sino también la contaminación que se deriva de éste proceso. Este tipo de ataque homogéneo, facilita predecir la vida útil de la pieza en base a la pérdida de sección por año.

A.2.- CORROSIÓN GALVÁNICA. Se origina por contacto directo de metales disímiles, dispuestos en una solución conductora, generándose un potencial eléctrico. Esta diferencia de potencial proporcionará una fuerza dirigida a disolver el metal menos noble o eléctricamente más negativo, así como a reducir la tendencia del más noble a disolverse. Corrosión localizada, no extendida uniformemente. En construcción, éste tipo de corrosión es frecuente en la tornillería inadecuadamente empleada para la fijación de piezas metálicas, provocando, por disimilitud de metales, pares galvánicos en sus contactos, ocasionando la destrucción de éstas

uniones. Igualmente, es frecuente en las conducciones de agua, en las que se emplea tuberías o accesorios de distinta naturaleza, en empalmes, uniones, etc

La velocidad de corrosión galvánica depende de la proporción de área anódica frente a la catódica, de modo que un ánodo muy pequeño frente al cátodo se corroe mucho más aprisa que si la superficie anódica es grande. En el caso de unir dos metales distintos, emplear un material aislante eléctrico en su unión, o, al menos, elegir dos metales muy próximos entre sí en la serie galvánica. En el caso de las uniones mediante tornillos, evitar el contacto directo de la cabeza de éste con el metal, intercalando una arandela no metálica. En cualquier caso, es recomendable revestir la unión con una protección compatible y duradera, de forma que se evite el contacto de la humedad ambiental con la unión atornillada.

También es posible emplear una protección anticorrosiva mediante la conexión con un tercer metal más anódico que los metales unidos. Tal sistema se conoce como protección catódica, y consiste en transformar en catódicos los metales a proteger, mediante un suministro de electrones a éstos, desde una fuente exterior. Con esto, se invierte la oxidación, transformándose en una reducción, de forma que el metal más activo suministra electrones y se corroe, consumiéndose, mientras protege al otro, llamándose "ánodo de sacrificio". También podemos disponer una fuente exterior de corriente continua que suministre electrones al elemento a proteger catódicamente, conectando el terminal negativo a la pieza a proteger y el terminal positivo a un ánodo de sacrificio; en estructuras enterradas, se cierra el circuito eléctrico a través del terreno, que sirve de nexo de unión entre el ánodo y el cátodo. Es frecuente la adopción de éste sistema en estructuras enterradas.

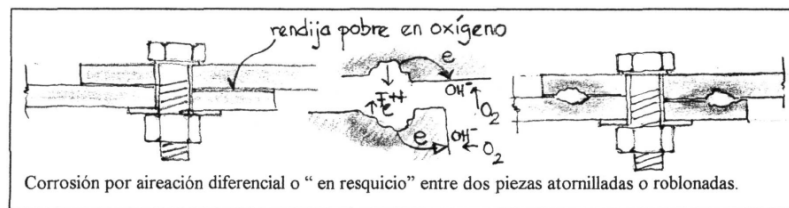
A.3.- CORROSIÓN POR ALTERACIÓN DE LA ESTRUCTURA CRISTALINA. Un metal, al sufrir una acción mecánica (doblado o plegado, deformándolo en frío), o una aportación de calor (soldadura, o calentamiento para forja - que es una deformación mecánica en caliente - o el simple doblado de las barras de acero para hormigón, al hacer patillas de anclaje), sufre una alteración de su estructura interna cristalina, siendo susceptible de experimentar un proceso electroquímico de corrosión. La parte calentada actúa como ánodo, frente a las zonas colindantes catódicas que no han sufrido alteración. Los granos deformados se constituyen en ánodos frente a los no deformados. Es una corrosión localizada. En las piezas metálicas que soportan esfuerzos de cierta entidad, como de tracción, si están expuestas a un ambiente agresivo, es posible la propagación de la corrosión, formándose grietas en dirección perpendicular al esfuerzo aplicado, pudiendo originar una rotura frágil.

A.4.- CORROSIÓN POR PICADURAS. Es en sí misma un mecanismo de corrosión. Su forma se caracteriza por una elevada pérdida localizada de metal, llegando a conformar pequeñas y profundas cavidades en áreas no afectadas por otro mecanismo de corrosión. Pequeñas zonas anódicas junto a zonas catódicas más amplias, las cuales captan electrones de las primeras, en las que la picadura puede llegar a perforar el metal. La iniciación de la picadura está asociada a la ruptura de la película protectora de la superficie del metal. Si la profundidad de la picadura crece rápidamente, es posible que se trate de un medio tal que no permita la reparación o la reposición de la capa protectora. Es una forma de corrosión vinculada a la geometría de la pieza, o a imperfecciones en el material en sí mismo. El

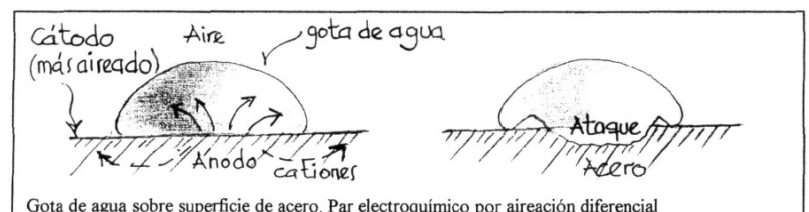
crecimiento de la picadura, una vez iniciada, está estrechamente relacionado con otros mecanismos de corrosión, como, por ejemplo, en hendidura o agrietamiento. Es frecuente en metales como el aluminio, el acero inoxidable y el cobre ; en general, de aquéllos metales que se recubren de óxido protector, al contactar, por ejemplo, con soluciones que contienen cloro. Es una corrosión localizada. La corrosión por picadura no es fácilmente perceptible en su evolución, ya que penetra perpendicularmente a la superficie hacia el interior, concentrándose la disolución en la progresiva oquedad, perdiendo poco material a la vista.

B).- POR CAUSAS INTRÍNSECAS AL ELECTROLITO.

B.1.-POR AIREACIÓN DIFERENCIAL. Se puede dar lugar a ésta corrosión cuando en una misma pieza metálica existen regiones con distinta concentración de iones o gases disueltos, originándose la corrosión en las regiones de menor concentración. Un perfil cualquiera de un metal (o una tubería metálica de conducción de agua), puede tener un tramo embebido en arena o grava húmeda (más oxigenado) y otro en tierra arcillosa húmeda (menos oxigenado). El tramo menos oxigenado será anódico respecto del más oxigenado, y se corroerá. En las rendijas que quedan entre dos piezas unidas por atornillado, por ejemplo, la disolución electrolítica queda estancada, y se empobrece de oxígeno disuelto respecto de la superficie húmeda al aire libre que se encuentra en su proximidad, siendo ésta última catódica respecto de la primera, ya que los electrones se mueven desde el interior de la rendija hacia la zona próxima descubierta, en la que se produce una reducción. En el interior de la rendija, la disolución puede crecer su concentración en iones altamente agresivos, como los de hidrógeno y de cloro. Es conveniente, pues, que las uniones entre piezas queden muy estancas, y no se les permita acumular suciedad, que aumenta la concentración de elementos nocivos. De aquí que se aconseje sellarlas con un material no absorbente. En las uniones soldadas, éste tipo de rendijas son menos frecuentes.

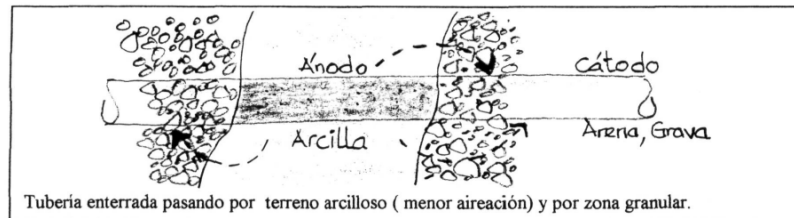


Un ejemplo de formación de un par electroquímico por aireación diferencial lo constituye una gota de agua sobre una superficie de acero. La pequeña superficie cubierta por la gota, menos aireada, se toma anódica respecto a la zona más aireada.



Otro ejemplo de corrosión por aireación diferencial lo constituyen un perfil cualquiera de un metal (o una tubería metálica de conducción de agua) que puede tener un tramo enterrado en hormigón, por ejemplo, y otro al aire. El tramo menos oxigenado será anódico respecto del más oxigenado, y se corroerá más intensamente.

Una tubería enterrada en un terreno, parte del cual es granular (más permeable al aire) y parte cohesivo (menos permeable), sufrirá, igualmente, éste tipo de corrosión.



2 COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES A LOS AGENTES EXTERNOS

En todo tipo de instalación, los cables están sometidos a condiciones adversas, tanto de la propia instalación, como de agentes externos. Ambos casos inciden profusamente en la durabilidad o vida de los mismos. Es por ello que los materiales utilizados en aislamientos y cubiertas deben ser los más adecuados para soportar estas adversidades. Los conductos usados son de las mismas características que los empleados en los enterramientos convencionales y que dadas las mejoras de las condiciones en el interior de las galerías de servicio, aumentaría la vida útil de las infraestructuras y permitiría el uso de conductores más económicos al no ser tan agresivo el medio como el subsuelo. Dentro de estos agentes externos, en galerías de servicio, el que más preocupa es el fuego. La problemática de los incendios puede ser contemplada bajo dos aspectos diferenciados, que se dan antes y durante la evolución del incendio.[Hernandez, 2007]

El primer aspecto, el principal, comprende el estudio y aplicación del conjunto de medidas que deben observarse en el proyecto de cualquier obra de construcción, que tiendan a evitar que el incendio se establezca y que faciliten la extinción del incendio si éste llega a producirse. Un debido estudio de la línea debería situar los cables a una distancia normalizada de los conductos de gas y elegir aquellos que imposibilitaran la creación del incendio.

El segundo aspecto es el humo que aparece por la combustión de los materiales sometidos a la acción del fuego. Es pues importante que los cables elegidos para la instalación sean no propagadores de incendio, para así evitar la emisión de gases tóxicos y corrosivos debido a la combustión de los halogenuros contenidos en la materia orgánica que conforma la cubierta de los cables.

Así pues, se somete a los cables a una serie de ensayos, dedicados a evitar la propagación del incendio y sus consecuencias:

NO PROPAGACIÓN DE LA LLAMA: Con este ensayo se determina la propiedad de autoextinción de la llama cuya ignición ha sido provocada en la superficie del cable por la fuente de calor y las condiciones ambientales.

NO PROPAGACIÓN INCENDIO: Se comprueba la propiedad de que el cable, sometido a las condiciones simuladas de incendio, no se convertirá en vehículo de propagación. Los tres sistemas de ensayo más utilizados internacionalmente y que constatan esta particularidad, tienen como objetivo la misma finalidad, aunque siguiendo procedimientos de ensayo diferentes.

TOXICIDAD Y CORROSIVIDAD: La ausencia de productos halógenos en la combustión de los materiales orgánicos, ofrece la seguridad de que los gases emitidos no contengan características tóxicas ni corrosivas. Los cables convencionales provistos con aislamientos y cubiertas de polímeros halógenos emiten al arder humos y gases con contenidos notables de F, Cl, Br, muy tóxicos.

EMISIÓN DE HUMOS: Los cables, al arder, como consecuencia de un incendio, emiten gran cantidad de humos, ocasionando una pérdida de visibilidad que dificulta la evacuación de las personas. Otras características exigibles a los cables es que sean flexibles, resistentes a aceites industriales y que tengan capacidad de carga.

2.1 COMPOSICIÓN DE CABLE

2.1.1 Cubiertas

Es la envoltura externa de material termoplástico o termoestable que no tiene una función eléctrica per sí de protección.

En general deben tener unas buenas características mecánicas y buenos comportamientos ante agentes externos. Cuando se requieran exigencias frente al fuego, las mezclas de los materiales utilizados como cubiertas exteriores, serán ignífugas.

2.1.2 Aislamientos

Los diferentes tipos de aislamiento de los conductores están dados por su comportamiento térmico y mecánico, considerando el medio ambiente y las condiciones de canalización a que se verán sometidos los conductores que protegen, su resistencia a los agentes químicos, a los rayos solares, a la humedad, a las altas temperaturas, llamas, etc. Entre los materiales usados para el aislamiento de conductores podemos mencionar el PVC o cloruro de polivinilo, el polietileno o PE, el caucho, la goma, el neopreno y el nylon .[Tirado, 2010]

Es la envolvente de material aislante continua y uniforme en toda la longitud del conductor, con un espesor adecuado para la tensión de trabajo del cable.

Los cables de alta tensión pueden aislarse con varios tipos de materiales aislantes. Cuando se exijan comportamientos frente al fuego, las mezclas de los materiales utilizados serán ignifugadas.

Hay varios tipos de materiales aislantes:

➤ **FORRO DE PVC**

Los cables revestidos con forro de PVC (policloruro vinilo) son los cables de uso más simple, normalmente se consideran cables de aplicación general. Este tipo de cables están destinados a instalaciones en sitios sin requerimientos especiales en cuanto a seguridad contra incendios. Como ejemplo puede servir la conexión de un bloque de sistema y de un monitor en casa o en una oficina. En caso de combustión, es posible que los cables revestidos con forro de PVC emitan cloruro de hidrógeno. El cloro sirve de receptor de los radicales libres y aumenta la resistencia contra incendios del material. A pesar de que los gases del cloruro de hidrógeno, debido a su origen, también pueden suponer un peligro para la salud, el cloruro de hidrógeno se desintegra en las superficies, especialmente en espacios donde hay bastante aire frío.

➤ **PLENUM (CMP) RATED CABLE**

Los cables Plenum están indicados para la instalación a través de canales aeroacuáticos (también denominados plenums). Los cables plenum se tienen que auto-extinguir y no inflamarse repetidamente. También emiten menos humo que los cables de PVC tradicionales. El humo y el gas son tóxicos. Este requerimiento normalmente se aplica a la clase de seguridad contra incendios y pertenece al tipo de requerimientos especialmente exigentes en cuanto a seguridad anti-incendios, con el cual este tipo de cable debe estar en conformidad.

➤ **LOW SMOKE ZERO HALOGEN (LSZH, LSOH) RATED CABLE**

Los cables con forro LSZH están destinados al uso en espacios donde tiene que haber tanto gases poco corrosivos y de baja emisión de humos. Se utilizan a bordo de embarcaciones y en centros de comunicaciones de ordenadores, en donde el humo y gas tóxico y ácido pueden ser perjudiciales para las personas y para los equipos. Por ejemplo el halógeno contiene flúor, cloro, bromo y yodo. En caso de combustión, estos materiales emiten humo ácido que puede ocasionar perjuicios a las personas y al equipamiento informático. La baja cantidad de humo, significa que el cable no debe emitir hollín negro y humo parecido a los cables de PVC. Este tipo de cables se apagan, pero no satisfacen las normas UL-910 o UL-1666 para cables Plenum o cables que permiten el tendido en tubos bajantes .[Tirado, 2010]

➤ **GENERAL PURPOSE (CM, CMG, CMX) CABLE (Cable De Aplicación Básica)**

Habrà combustión y se apagará en parte. No apto para el uso bajo suelo técnico y cavidades plenum. Frecuentemente, estos cables se utilizan para centrales de trabajo y patch cords.[Tirado, 2010]

➤ **LIMITED USE CABLE (Cable De Uso Limitado)**

Este cable tiene determinadas limitaciones en tendidos abiertos, por ejemplo se puede utilizar solamente en edificios para viviendas, se permite el cableado de este tipo únicamente en tubos de material ininflamable, o se limita su diámetro máximo etc. [Tirado, 2010]

➤ **FIRE RETARDANT POLYVINYLCHLORIDE (FR-PVC) (Cloruro Polivinílico Resistente Al Fuego)**

El forro de cloruro polivinílico resistente al fuego (FR-PVC) tiene mejores características en cuanto a resistencia al fuego, que el forro de PVC normal. Tiene importantes ventajas como una emisión de ácidos más baja y menor formación de humos. La emisión de cloro por forros de PVC resistentes al fuego es bastante superior (5%) que la que emiten los forros normales de PVC. El PVC ininflamable tiene buenas características de aislamiento en temperatura inferior a 100 °C. [Tirado, 2010]

➤ **HALOGEN FREE FLAME RETARDANT (HFFR) CABLES (Cables Libres De Halógenos Resistentes Al Fuego)**

Los cables resistentes al fuego, sin halógenos, ayudan a prevenir la combustión del cable desde el momento en que surge el fuego, e incluso si el cable ha empezado a arder, la cantidad de humo producida es bastante inferior. La principal ventaja de los cables HFFR son las calidades eléctricas y mecánicas, así como la mejor tecnología fusible; lo que también se puede conseguir por medio de una adhesión óptima de rellenos y polímeros o bien mediante el empalme de polietilenos. Ventajas del compaund resistente al fuego y libre de halógenos: Alto nivel de carga, alta resistencia al fuego, absorción de agua muy baja por parte del polímero, propiedades eléctricas bastante mejores, capacidad de paso muy alta de los cables, propiedades mecánicas mejoradas. [Tirado, 2010]

➤ **PE (Polietileno)**

El polietileno es un material policristalino termoestático y uno de los tipos de plástico más utilizados. Generalmente, se caracteriza por su plasticidad, flexibilidad y baja densidad. Se distinguen dos tipos de polietileno básicos: polietileno de baja densidad (LPDE - low density polyethylene) y polietileno de alta densidad (HDPE - high density polyethylene) .

➤ **HIGH DENSITY POLYETHYLENE (HDPE) (Polietileno De Alta Densidad)**

PEAD (HDPE) es la variedad más resistente de polietileno. Es más resistente y un poco más duro que el polietileno de baja densidad, aunque menos elástico. El uso de estabilizadores UVA (carbono técnico) mejora la resistencia al impacto atmosférico, pero tiñe el polietileno de color negro. El PEAD también es menos transparente y más resistente a altas temperaturas (120°C en periodo de tiempo corto, 110°C en régimen continuo). El polietileno de alta densidad tiene numerosas ventajas: resistente a la corrosión y a los químicos, ligero, absorbe la humedad con dificultad, no tiñe (no deja manchas), no tóxico, alta resistencia a la ruptura. [Tirado, 2010]

2.1.3 Deterioro del Aislamiento

Cuando el sistema eléctrico o conductor son nuevos, el aislamiento eléctrico debe estar perfecto estado. Además, los fabricantes del conductor han mejorado continuamente su

aislamiento para los servicios de la industria. A pesar de todo, aun hoy en día, es aislamiento esta sujeto a muchos efectos que pueden ocasionar que falle: daños mecánicos, vibraciones, calor o frío excesivo, suciedad, aceite, vapores corrosivos, humedad de los procesos, o simplemente la humedad de un día nublado.

En distintos grados, estos enemigos del aislamiento están trabajando conforme pasa el tiempo combinados con el esfuerzo eléctrico que existe. Conforme se desarrollan picaduras o grietas, la humedad y las materias extrañas penetran en la superficie del aislamiento y proporcionan una trayectoria de baja resistencia para la fuga de corriente. Una vez que comienzan, los distintos enemigos tienden a ayudarse entre si y permiten una corriente excesiva a través del aislamiento.

2.1.4 Medición de la resistencia de aislamiento

Un buen aislamiento tiene alta resistencia; un aislamiento pobre tiene baja resistencia relativamente. Los valores reales de resistencia pueden ser más altos o más bajos, dependiendo de factores como la temperatura o el contenido de humedad (la resistencia disminuye con la temperatura o la humedad).

2.1.5 Cálculo de la resistencia

Los valores mínimos del aislamiento de los cables de potencias vienen dado por la siguiente Formula:

$$R = K * Long * 10 * \frac{D}{d}$$

Donde:

R; Resistencia de aislamiento en MΩ*300mts de cables, utilizamos el MEGGER para determinar el valor promedio de la Resistencia de aislamiento R.

D; Diámetro exterior del aislamiento del conductor.

d; Diámetro del Conductor.

K; Constante para el aislamiento del material.

Los valores de la Constante para el aislamiento del material K, viene dado por el material con el que se encuentre elaborada la cubierta aislante del conductor.

TIPO DE CUBIERTA AISLANTE	VALOR DE "K"
Papel impregnado	2640
Barniz cambridge	2640
Polietileno termoplástico	50.000

CONCLUSIONES

Como principales conclusiones del trabajo realizado en relación a las Galerías de Servicio, en cuanto a normativa, métodos de amortización, ejecución y predicción de la vida útil de las mismas se apunta:

El subsuelo urbano es un bien cada vez más escaso y apreciado a medida que aumentan la densidad de población, la renta y la preferencia por la calidad medioambiental. La demanda de subsuelo urbano es extremadamente rígida para determinados servicios, como redes de saneamiento y canalización de aguas pluviales, por citar dos servicios que imponen fuertes servidumbres a los demás usuarios del subsuelo y para los que cualquier desviación respecto a la ubicación idónea conlleva espectaculares incrementos en los costes.

La inadecuada definición de los derechos de propiedad, especialmente para el subsuelo de titularidad pública, comporta serias dificultades. Destaca el hecho que, en la práctica, se ceda el uso del subsuelo público a precio cero, lo que comporta distorsiones en la asignación entre espacios alternativos para la ubicación de determinados bienes y servicios. A la vez, el uso del subsuelo a precio nulo, provoca la concentración de redes de servicios en las cotas más cercanas a la superficie, que son las de más fácil acceso, quedando infrutilizadas cotas más profundas.

A diferencia de todo espacio situado por encima de la cota cero, que es objeto de planificación, con regulación pormenorizada de los diversos usos posibles, el subsuelo suele obviarse, dejando el campo libre para la competencia no reglada entre los usuarios del subsuelo. La ausencia de normas efectivas y la intensa competencia para ubicar en un mismo espacio servicios que se interfieren mutuamente (cuando no son incompatibles), conduce a un resultado que ha sido calificado reiteradamente como caótico.

Las galerías de servicios para la ubicación de servicios ciudadanos constituyen un elemento innovador que permite racionalizar el uso del subsuelo a la vez que evitan en buena medida las interferencias entre servicios de distintas compañías, característica propia del sistema tradicional de canalizaciones enterradas.

Las galerías de servicios públicos presentan una alta rentabilidad, siendo el beneficio principal el ahorro de espacio en el subsuelo. Existen algunos beneficios que no se han computado, como son los menores costes medioambientales, la disminución en los costes debidos a interrupciones del servicio con motivo de averías y las interferencias que provocan las obras en aceras y calzadas. Por ello, la cifra de rentabilidad social resultante ha de considerarse como una cota inferior de la verdadera.

La deficiente asignación de los derechos de propiedad del subsuelo público, la inexistencia de un precio positivo para el subsuelo (incluso como mero precio de cuenta) y las restricciones legales acerca de la forma de financiación de las galerías de servicios, constituyen serios obstáculos para la realización de proyectos de este tipo a pesar de su alta rentabilidad potencial.

Por fortuna, todos los obstáculos mencionados son evitables: los derechos de propiedad pueden reasignarse, determinar el precio del subsuelo es una tarea simple, y las limitaciones a las formas de financiación de las galerías de servicios pueden relajarse, cambiarse por otras más razonables o suprimirse sin más.

La rentabilidad de las galerías de servicios puede medirse mediante el cálculo de la tasa interna de rentabilidad. Para la estimación de los flujos de costes y beneficios relevantes en cada período con un buen grado de aproximación, es suficiente valorar únicamente cinco impactos diferenciales, los que se han revelado como más importantes.

Estos factores son: espacio ocupado, coste de construcción, costes por mantenimiento preventivo y reparaciones y coste de sustitución de las canalizaciones.

Conviene recordar que la hipótesis acerca del ritmo de ocupación de las galerías de servicios influye decisivamente en la rentabilidad por lo que no conviene establecerla a la ligera. No es tan importante el supuesto acerca de la duración total del proyecto puesto que los principales impactos se concentran en los primeros períodos.

La información total necesaria para cuantificar y valorar los principales impactos y estar en disposición de determinar la rentabilidad de un proyecto de galerías de servicios frente al sistema tradicional, se reduce a ocho datos. Para cada sistema (Galería de Servicio y Sistema Tradicional) se requiere la siguiente información:

1. Volumen de subsuelo ocupado por cada metro lineal (incluyendo las distancias de seguridad).
2. Longitud total de las canalizaciones.
3. Precio del metro cúbico de subsuelo.
4. Precio de construcción por metro lineal.
5. Coste del mantenimiento preventivo.
6. Número de averías.
7. Coste medio por reparación de averías.
8. Tiempo medio de vida de las conducciones.

Como se ha visto, en la primera parte de este estudio, una vez efectuado un primer análisis de un nuevo tipo de proyecto, los costes de realizar otros se reducen de forma significativa. Los Análisis Coste-Beneficio sobre uso del subsuelo urbano pueden estandarizarse fácilmente de tal forma que baste con la aplicación de la lógica económica a una rutina simple. Es posible pues pasar de una situación en la que la valoración de proyectos públicos constituye un hecho excepcional a otra en la que las valoraciones y las consiguientes ordenaciones de proyectos alternativos se realizan de forma sistemática, como ocurre en otros países con los proyectos de infraestructuras viarias, por ejemplo.

Como principales conclusiones del trabajo realizado en relación a los diferentes métodos ensayados en el campo de la predicción de la vida útil se apunta:

Hoy en día, gracias a las numerosas investigaciones realizadas en materia de cálculo de vida útil en los edificios, extrapolando los conocimientos a las Galerías de Servicios, se ha establecido un nivel de desarrollo de los métodos de cálculo muy avanzado, pese a que debido a los múltiples factores que hay que tener en cuenta, no se haya conseguido hacer de la predicción de la vida útil una ciencia exacta.

- **Métodos deterministas: El método de los factores**

Los métodos deterministas puros, es decir, aquellos que se basan en el estudio de los factores que influyen en la degradación de los elementos estudiados y en su determinación traducida en funciones de degradación, han demostrado ser, en base a los diferentes estudios llevados a cabo, una simplificación excesiva de fenómenos complejos, como son los fenómenos de degradación. Ciertamente es que estos métodos presentan una gran ventaja de cara a su aplicación, son fáciles de entender, pero en muchos casos, la información obtenida por los modelos no es suficiente para evaluar el riesgo de no llegar a la vida útil objetivo.

- **Métodos probabilísticos**

En comparación con los métodos deterministas, los métodos probabilísticos consideran la degradación como un proceso estocástico, donde se define la probabilidad de deterioro para cada propiedad durante un periodo de tiempo. Estos métodos se han empleado con éxito para predecir el comportamiento de diferentes elementos constructivos, especialmente han sido más representativos aquellos ejemplos basados en la cadena de Markov. Sin embargo, el método requiere un gran número de elementos constructivos similares sometidos a las mismas condiciones climáticas, un requisito que no se suele cumplir con frecuencia en el sector de la construcción, debido a las notables diferencias de las construcciones y de su entorno. A su vez el método requiere de modelos matemáticos complejos, lo que lo convierte en un método de difícil aplicación como método general de predicción de la vida útil.

Sin embargo, este tipo de métodos sirven para mejorar la comprensión de los fenómenos físicos de degradación y se deben utilizar para complementar la experiencia sobre los materiales y productos utilizados en el sector de la construcción.

- **Métodos de ingeniería**

Los métodos de ingeniería, pese a definirse como métodos de fácil aplicación además de describir los procesos de degradación de una forma probabilística, aún no han llegado a un nivel de desarrollo suficiente para su estandarización como método general en el cálculo de la predicción de la vida útil. Sin embargo, no se descarta que haya adelantos futuros que puedan suponer un cambio en el enfoque de los métodos de cálculo de la vida útil de los edificios en general y comenzar a evaluar las galerías de servicios en su aplicación a nivel de normativa internacional.

- **Métodos semi deterministas – semi probabilísticos**

La combinación de los métodos deterministas, junto con los métodos probabilísticos, ha resultado ser la mejor fórmula desarrollada hasta el momento en el campo de la predicción de la vida útil de elementos y sistemas constructivos de los edificios.

Como transposición de las líneas generales de investigación, en relación a la predicción de la vida útil en la edificación, la norma ISO 15686 Parte 8, estableció recientemente novedades en la aplicación del método de los factores explicado en la ISO. Las principales novedades introducidas fueron la posibilidad de utilizar distribuciones o funciones de probabilidad en combinación con el enfoque determinista del método de los factores; la introducción de intervalos tanto en la definición de los propios factores que intervienen en método como en la estimación de la vida útil y por último destaca la reducción de la subjetividad en la determinación de los factores, planteando su determinación como una comparación entre las condiciones en las que fue hallada la vida útil de referencia y las condiciones específicas de proyecto.

La publicación de esta norma ha supuesto un gran avance en la consecución de un método de aplicación de cara al cálculo de la vida útil de los sistemas y elementos constructivos, pero aún quedan cuestiones muy importantes que se deben atender:

- Guías de aplicación; Necesidad de guías sobre la aplicación de la metodología de estimación de la vida útil con la inclusión de ejemplos detallados.
- Bases de datos; Base de datos de vidas útiles de referencia de materiales, elementos y sistemas constructivos.
- Estudio de la degradación; Caracterización de los mecanismos y factores de degradación de los materiales, elementos y sistemas constructivos.
- Mantenimiento; Legislación en relación a la planificación de mantenimiento de los edificios que establezca los procedimientos a llevar a cabo y obligue aun control en la aplicación de los mismos.

Respecto a este último punto, en diversos estudios expuestos en este trabajo se ha llegado a la conclusión de que el mantenimiento es, junto con las condiciones exteriores, el factor que mayor influencia tiene en la durabilidad de los materiales, elementos y sistemas constructivos. Los materiales que muestran mayores durabilidades en gran medida aquellos sometidos a un buen cuidado y mantenimiento, por lo que la elaboración de guías y procedimientos en relación al mantenimiento de los edificios es clave. Será muy probablemente esta línea de trabajo la que se desarrollará en mayor medida en estudios posteriores.

Como se ha comentado anteriormente, en los últimos años se ha percibido un aumento en el interés por determinar la durabilidad y la vida útil de los materiales, elementos y sistemas constructivos. Este interés ha venido de la mano de cuestiones medioambientales y económicas. Por un lado, la durabilidad está directamente relacionada con la búsqueda de un desarrollo sostenible, tema de plena actualidad y en el que se están invirtiendo muchos esfuerzos a nivel internacional. Por otro lado, los edificios existentes representan una cantidad importante del capital nacional de los países, por lo que los costes anuales de inspección y mantenimiento son de gran importancia ya sea para la economía de un país o para el

mantenimiento de la competitividad de una industria o empresa. Planificando el mantenimiento y las necesidades de inversión de un edificio durante su vida útil con el complemento de las Galerías de Servicio, se puede buscar la combinación más rentable para la sociedad y para los propietarios. Esto último solo podrá ser factible con el apoyo de herramientas de ayuda a la planificación y gestión del mantenimiento que en mayor medida deberán ser facilitadas por las autoridades estatales.

- **Método de los Estado Límite**

Con respecto a este método considero varios puntos a concluir:

- 1.- El valor característico de las acciones permanentes en estructuras provisionales de edificación no puede reducirse a pesar de tener una duración ≤ 10 años. En rigor debería incluso de aumentarse ligeramente.
- 2.- Se deduce de el valor característico para las acciones climáticas puede reducirse si se acorta el periodo de referencia de vida útil estructural en el que se basa el cálculo.
- 3.- Sin embargo, la falta de uniformidad de las propiedades aleatorias de las sobrecargas de uso, hace difícil extraer reglas generales y a menos que se disponga de datos fiables, deben tomarse los valores característicos especificados en los códigos oficiales, sin aplicar reducción alguna.

Referidas las conclusiones a apartados anteriores, ahora viene el caso, de los avances en los métodos para evaluar la durabilidad y la vida útil de materiales y elementos constructivos, primordiales en la ejecución de las galerías de servicio, han promovido la aparición de numerosas publicaciones en relación a su durabilidad. Esto se ha debido a que el estudio de los métodos de predicción de la vida útil requiere de un profundo conocimiento de los mecanismos de deterioro de los materiales y elementos constructivos y de los factores que causan la pérdida de su rendimiento con el tiempo. Las publicaciones se han producido en mayor medida en el área de hormigón y de otras materias primas utilizadas con fines estructurales. Se ha considerado interesante incorporar una lista de componentes en los que se han logrado avances gracias al desarrollo de los métodos de cálculo de la vida útil.

Sellantes

El grupo responsable de lograr los avances más relevantes en el ámbito de la vida útil y durabilidad de los productos sellantes es el comité técnico RILEM sobre durabilidad de los sellantes establecido en 1983. El comité técnico de ASTM C24 también ha participado activamente en la promoción de la investigación en este campo patrocinando diversos simposios a lo largo de los años. Los documentos referenciados en la tabla ofrecen avances en el desarrollo de métodos de ensayo en relación a la durabilidad de los sellantes.

Revestimientos

Se ha publicado bastante literatura en el campo de la durabilidad de los revestimientos expuestos a la intemperie. En el campo de la construcción, los investigadores del NIST han sido aquellos que han realizado las aportaciones más notables en la predicción de la vida útil de los revestimientos. Según se cita en la tabla, Martin, ha realizado una labor considerable en este

tema en el que se comenzó a trabajar desde 1983. Croll y Hinderliter, también han proporcionado algunas ideas de gran utilidad en la estimación de la vida útil de los revestimientos a partir de ensayos en combinación con el uso de modelos estadísticos para simular el proceso de deterioro.

Aislante térmicos

El trabajo citado de Merkel, en la tabla no tiene asociado ningún grupo específico de trabajo. Se ha nombrado este trabajo como ejemplo investigaciones llevadas a cabo en relación a este tipo de materiales de reciente aplicación como son los aislantes térmicos y de los que existen pocos datos disponibles.

En la siguiente tabla se proporciona información sobre ejemplos de grupos de trabajo y estudios llevados a cabo para determinar la vida útil de diferentes elementos constructivos.

Elemento	Grupos de trabajo	Documentos desarrollados
Sellantes	RILEM TC 190-SBJ 139-DBS 66-BJS ASTM C24	EA:Beech (1985) EA:Wolf (1990) AR:Lacasse (1994) CT:Wolf (1998) EA:Wolf (2004) MR:Building Sealants Durability Test Method (2001)
Revestimientos	ASTM D01 ASTM G03 FSCT	AR:Martín (1983) DT:Martin&McKnight (1985) EA:Martin (1994) DT:Martin (1997) DT:Martin& Bauer (2002) DT:Croll and Hinderliter (2007)
Aislante térmico		Merkel (2008)

DT: Documento Técnico, AR: Artículo de Revisión, EA: Estados del Arte, CT: Inf. Comisiones Técnicas, MR: Método de ensayo recomendado.

REFERENCIAS

ACEBILLO, J.A. "El subsuelo urbano y las técnicas de ordenación de los servicios públicos. Revista CEUMT (Centre d'Estudis Urbanístics, Municipals i Territorials). Barcelona. 1989.

CABRERA SÁIZ T., DE LAS HERAS FERNÁNDEZ M. "Introducción de la variable tiempo en la evaluación de acciones para estructuras de edificación". Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid. 2008.

CURIEL, J. Y CANTÓ, J. "Compatibilidad entre instalaciones en diseño de Galerías de Servicio." Universidad Politécnica de Valencia. Actas del Congreso VI International Congress On Project Engineering. Barcelona. Octubre 2002.

CURIEL, J. Y CANTÓ, J. "Factores ergonómicos en galerías de servicio". Universidad Politécnica de Valencia. VI International Congress On Project Engineering. Barcelona. Octubre 2002.

GUIGOU FERNANDEZ, C. "La durabilidad de los materiales constructivos". Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Departamento de Construcciones Arquitectónicas. 2000.

GUIGOU FERNANDEZ, C. "Propiedades de los materiales". Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Departamento de Construcciones Arquitectónicas. 2001.

HERNANDEZ MORENO, S. "Aplicación de la información de la vida útil en la planeación y diseño de proyectos de edificación" Artículo publicado en Acta Universitaria, Universidad de Guanajuato. 2007.

ISO 2394: "General principles on reliability for structures". 1998. Ed. ISO.

ISO 13822: "Basis for design of structures –Assessment of existing structures". 2001. Ed. ISO.

MONJO CARRIÓN, J. "Patología de cerramientos y acabados arquitectónicos". Editorial Munilla-Leira. 2ª Edición 2010.

Ministerio de la Vivienda: "Código Técnico de la edificación". Ed. M V, Madrid. 2006.

Normativa ISO 15.686. 2001.

ORTEGA MADRIGAL, L. "Estado del arte de las metodologías de cálculo de la vida útil". Universidad Politécnica de Valencia. 2010.

PASQUAL, J. "Caracterización económica del subsuelo urbano" Actas del Congrés d'urbanisme i Territori de Catalunya. Federació de Municipis de Catalunya. Barcelona. 1990.

PASQUAL, J. Y PINYOL, J. "Introducción a la economía del subsuelo urbano" en: Ajuntament de Girona e.a., Municipios y redes de servicios públicos. Editorial El Pont de Pedra. Girona. 1990.

RIERA, P. RIERA, F. "Costes y beneficios del uso del subsuelo". Actas del Congrés d'urbanisme i Territori de Catalunya. Federació de Municipis de Catalunya. Barcelona. 1990.

TIRADO PÉREZ, S. "Cables eléctricos". Artículo publicado en Instituto Universitario de Tecnología, Departamento de Electricidad. 2010.

UNE-EN 1990: "Eurocódigos. Bases de cálculo de estructuras". 2003. Ed. AENOR, Madrid.

UNE-EN 1991-1-3: "Eurocódigo 1. Acciones en estructuras. Parte 1.3: Acciones generales.

UNE-EN 1991-1-4: "Eurocódigo 1. Acciones en estructuras. Parte1.4: Acciones generales.

UNE-EN 1991-1-5: "Eurocódigo 1. Acciones en estructuras. Parte1.5: Acciones generales.

UNE-EN 1991-1-1: "Eurocódigo 1. Acciones en estructuras. Parte1.1: Acciones generales. Pesos específicos, pesos propios y sobrecargas de uso en edificios". 2003. Ed. AENOR, Madrid.

AGRADECIMIENTOS

Para dar por concluido el proyecto fin de máster, debo reflejar mi gratitud a numerosas personas que de cierto modo me han ayudado y apoyado, en la ardua tarea del estudio. El máster no hubiese comenzado sin el empujón inicial de muchos de ellos. Luego durante estos largos meses muchos han sido los momentos de desesperación, por diferentes motivos, pero siempre ha habido alguien en quién apoyarme. Y para la finalización satisfactoria he notado el aliento de todos ellos, cada uno a su forma...por eso debo agradecerse a tantas personas importantes, espero no dejarme ninguna en el tintero, primero especialmente agradecida a mi tutor de Proyecto Final de Máster, Jorge Curiel, mi salvavidas particular, sin el no hubiese podido comenzar y finalizar el proyecto...luego agradecer a la gran familia de amigos y familiares que han sufrido conmigo los encierros: gracias mamá, gracias papá, gracias benjamín, gracias ana eva, gracias juanjo, gracias inma, gracias jesús, gracias mónica, gracias esther, gracias pedro, gracias neus, gracias maica, gracias, noa, gracias mireia, gracias estela, gracias alejandro, gracias noah, gracias rosi, gracias maría, gracias marta, gracias sara, gracias teresa, gracias rebeka, gracias ana, gracias aurora, gracias ingrid, gracias marta, gracias sonia, gracias lucy, gracias eva, gracias ruth, gracias vero, gracias rosa, gracias César, gracias any, gracias david, gracias sonia, gracias bea, gracias natalia, gracias miriam, gracias jorge, gracias andrea, gracias nuria, gracias irene, gracias susana, gracias chelo, gracias alex, gracias laura, gracias arantxa, gracias raquel, gracias carmen, gracias mamen, gracias yaque, gracias luis miguel, gracias begoña, gracias javier b, que de cierto modo, directa o directamente han sufrido mi dedicación...y junto con ellos he obtenido mi objetivo final...completar satisfactoriamente el Máster en Edificación....y olé!....GRACIAS.