



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Grado

CURSO 2018/19

Caso práctico de evaluación de la durabilidad de estructuras de hormigón y su inclusión en el marco de modelos de evaluación de la sostenibilidad económica

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

ALUMNO

Pablo García Bernárdez

TUTORES

Pilar de la Cruz López

José Mel Fraga

FECHA

SEPTIEMBRE 2019

ÍNDICE

Índice	
Título y resumen.....	1
Alcance y principales conclusiones	3
Antecedentes	6
Normativa.....	8
Otras fuentes de los modelos de durabilidad empleados.....	9
1. Introducción y objetivos	10
1.1. Procesos de deterioro del hormigón	10
1.2. Armaduras de acero	11
1.2.1. Carbonatación.....	11
1.2.2. Presencia de iones cloruros	12
1.3. Vida útil de una estructura	14
2. Modelo MIVES (Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible). Inclusión de la durabilidad en el marco de modelos de evaluación de la sostenibilidad económica	17
2.1. Índice de Sostenibilidad Económica (ISE)	19
2.2. Metodología MIVES.....	20
2.3. Indicadores del Índice de Extensión de la Vida Útil (IEVU)	23
2.3.1. Indicador V1: soluciones de diseño.....	23
2.3.2. Indicador V2: dosificación del hormigón	24
2.3.3. Indicador V3: ejecución de la estructura.....	24
2.3.4. Indicador V4: protección superficial del hormigón	25
2.3.5. Indicador V5: protección de las armaduras	25
2.3.6. Indicador V6: evaluación, mediciones y control de la durabilidad	26
3. Modelo de la Instrucción Española del Hormigón Estructural (EHE 08).....	27
4. Modelo del borrador del nuevo Código Estructural español.....	33
5. Modelo propuesto por Jiménez Montoya	37
6. Código Modelo 2010 de la FIB (The International Federation for Structural Concrete).....	39
7. Publicación ACI 365.1R-00. 2ª ley de Fick.....	41

8.	Estructura base para la aplicación de los modelos de durabilidad	42
8.1.	Estructura base y diseño de la estructura	43
8.1.1.	Vigas.....	45
8.1.2.	Correas	46
8.1.3.	Pilares.....	46
8.1.4.	Zapatas.....	47
8.2.	Estudio de la durabilidad de los elementos de la estructura.....	47
8.2.1.	Durabilidad de las correas.....	48
8.2.2.	Durabilidad de las vigas	49
8.2.3.	Durabilidad de las zapatas	49
8.2.4.	Durabilidad de los pilares principales	50
8.2.5.	Durabilidad de los pilares intermedios de los testeros	50
8.3.	Estudio comparativo de aspectos clave de la durabilidad de los elementos de la estructura, según los distintos modelos de carbonatación y corrosión.....	51
8.4.	Estudio de la durabilidad de los elementos de la estructura desde el punto de vista del modelo MIVES.....	53
9.	Evaluación y comparación de estructuras alternativas.....	63
9.1.	Estructura alternativa 1	63
9.1.1.	Durabilidad de los pilares principales	63
9.1.2.	Durabilidad de los pilares intermedios de los testeros	65
9.1.3.	Durabilidad de las zapatas	66
9.2.	Estructura alternativa 2.....	66
9.2.1.	Durabilidad de los pilares principales	66
9.2.2.	Durabilidad de los pilares intermedios de los testeros.....	68
9.2.3.	Durabilidad de las zapatas	68
9.3.	Estudio de la durabilidad de los elementos de la estructura base mejorada.....	69
9.3.1.	Durabilidad de los pilares principales	70
9.3.2.	Durabilidad de los pilares intermedios de los testeros	71
9.3.3.	Durabilidad de las zapatas	71
9.4.	Estudio de la durabilidad de los pilares principales desde el punto de vista del modelo MIVES.....	72
9.5.	Estudio de la durabilidad de los pilares principales desde el punto de vista del modelo MIVES.....	75
10.	Discusión y conclusiones	86
11.	Bibliografía	93
	Anexos	94
	Anexo 1: Modelo MIVES	94

1.1.	Indicador V1: soluciones de diseño	95
1.2.	Indicador V2: dosificación del hormigón.....	96
1.3.	Indicador V3: ejecución de la estructura	97
1.4.	Indicador V4: protección superficial del hormigón	98
1.5.	Indicador V5: protección de las armaduras.....	99
1.6.	Indicador V6: evaluación, mediciones y control de la durabilidad.....	100
	Anexo 2: Modelo de la EHE 08	101
2.1.	Comprobación Estado Límite.....	101
2.2.	Período de iniciación	101
2.2.1.	Modelo de carbonatación	101
2.2.2.	Modelo de penetración por cloruros	102
2.3.	Período de propagación	104
2.4.	Requisitos de dosificación y resistencias mínimas recomendadas	104
	Anexo 3: Modelo del borrador del nuevo Código Estructural español.....	107
3.1.	Período de iniciación	107
3.1.1.	Modelo para las clases XC. Carbonatación del hormigón	107
3.1.2.	Modelo para las clases XS o XD. Ingreso de iones cloruros en el hormigón.....	108
3.2.	Período de propagación	109
	Anexo 4: Modelo propuesto por Jiménez Montoya.....	111
4.1.	Período de iniciación	111
4.1.1.	Clases XC (Carbonatación).....	111
4.1.2.	Clases XS o XD (Cloruros).....	112
4.2.	Período de propagación	113
	Anexo 5: Código Modelo 2010 de la FIB	115
	Anexo 6: Ficha técnica de las correas prefabricadas.....	117
	Anexo 7: Ficha técnica de las vigas prefabricadas	120

TÍTULO Y RESUMEN

Caso práctico de evaluación de la durabilidad de estructuras de hormigón y su inclusión en el marco de modelos de evaluación de la sostenibilidad económica

En este Trabajo Fin de Grado se ha realizado un análisis comparativo de diferentes modelos de durabilidad de estructuras de hormigón. Se ha partido de una estructura base, correspondiente a una nave industrial de 30 m de luz y 45 m de longitud.

Luego se ha tratado de mejorar la durabilidad del diseño inicial. Para ello se han generado cuatro alternativas de proyecto, mediante la modificación de diferentes parámetros como el recubrimiento, la relación agua/cemento o el tipo de cemento, entre otros. A su vez, se han aplicado los diferentes modelos de durabilidad a dichos diseños alternativos. Finalmente, se ha realizado un análisis comparativo de los resultados obtenidos, estableciéndose conclusiones.

Se han tenido en cuenta cinco modelos de durabilidad. Cuatro de ellos se limitan a los efectos de la carbonatación del hormigón y de la corrosión del acero por efecto de iones cloruro. Son los propuestos por la 16ª Edición del Jiménez Montoya, la Instrucción EHE-08, la FIB, y el borrador del futuro Código Estructural Español. El quinto modelo es el de la Tesis Doctoral de D. José Mel Fraga (Universidade da Coruña), que tiene en cuenta la práctica totalidad de aspectos que incluyen en la durabilidad.

Caso práctico de avaliación da durabilidade das estruturas de formigón e a súa inclusión no marco de modelos de avaliación da sustentabilidade económica

Neste Traballo Fin de Grao realizouse unha análise comparativa de diferentes modelos de durabilidade de estruturas de formigón. Partiuse dunha estrutura base, correspondente a unha nave industrial de 30 m de luz e 45 m de lonxitude.

Despois tratouse de mellorar a durabilidade do deseño inicial. Para iso xeráronse catro alternativas de proxecto, mediante a modificación de diferentes parámetros como o recubrimiento, a relación auga/cemento ou o tipo de cemento, entre outros. Á súa vez, aplicáronse os diferentes modelos de durabilidade aos devanditos deseños alternativos. Finalmente, realizouse unha análise comparativa dos resultados obtidos, establecéndose conclusións.

Tivéronse en conta cinco modelos de durabilidade. Catro deles límitanse aos efectos da carbonatación do formigón e da corrosión do aceiro por efecto de ións cloruro. Son os propostos pola 16ª Edición do Jiménez Montoya, a Instrución EHE-08, a FIB, e o borrador do futuro Código Estructural Español. O quinto modelo é o da Tese Doutoral de D. José Mel Fraga (Universidade da Coruña), que ten en conta a práctica totalidade de aspectos que inclúen na durabilidade.

Durability assessment of concrete structures and its inclusion in the framework of economic sustainability assessment models: case study.

In this Bachelor Degree Final Project, a comparative analysis of different durability models of concrete structures has been carried out. The starting point has been a base structure, corresponding to an industrial building of 30 m span and 45 m length.

Then, the durability of the initial design has been improved. To this end, four design alternatives have been generated, by modifying different parameters such as the concrete

cover, the water/cement ratio or the type of cement, among others. At the same time, the different durability models have been applied to these alternative designs. Finally, a comparative analysis of the results obtained has been carried out, and conclusions have been drawn.

Five durability models have been taken into account. Four of them are limited to the effects of concrete carbonation and steel corrosion by chloride ions. They are those proposed by the 16th Edition of the Jiménez Montoya book, the EHE-08 Spanish Code, the FIB, and the draft of the future Spanish Structural Code. The fifth model is the one proposed by Dr. José Mel Fraga (University of A Coruña), in his Doctoral Thesis, which takes into account practically all the aspects that influence durability.

ALCANCE Y PRINCIPALES CONCLUSIONES

Según el documento aprobado por la Comisión de Trabajos Fin de Grado el alcance de este proyecto tiene los siguientes tres objetivos:

- 1- Establecer un caso básico de estructura de hormigón armado, y posibles alternativas de diseño para la misma
- 2- Aplicar diferentes modelos de evaluación de la durabilidad estructural a dicho caso y a sus alternativas.
- 3- Establecer comparaciones y conclusiones.

Quedan excluidos del alcance, por tanto, la realización de un proyecto convencional con memoria, planos, pliego de condiciones, mediciones y presupuestos, estudio de seguridad y salud, entre otros aspectos.

De acuerdo con los objetivos que se han comentado aquí, en el presente Trabajo Fin de Grado (TFG) se ha realizado un análisis comparativo de diferentes modelos de durabilidad de estructuras de hormigón. Se ha partido de una estructura base, correspondiente a una nave industrial de 30 m de luz y 45 m de longitud, con cubierta de panel sándwich metálico, fachadas de placa o panel sándwich de hormigón colocadas en horizontal, estructura principal y correas de cubierta de hormigón prefabricado, y cimentaciones ejecutadas in situ. En el diseño de la nave se han tratado de facilitar posibles ampliaciones longitudinales futuras; por ello, las vigas y los pilares extremos de los pórticos testeros son iguales que las de los pórticos intermedios. Los testeros incluyen también pilares intermedios para poder apoyar las fachadas delantera y trasera.

En una fase posterior, se ha tratado de mejorar la durabilidad del diseño inicial. Para ello se han generado varias alternativas de proyecto, mediante la modificación de diferentes parámetros como el recubrimiento, la relación agua/cemento o el tipo de cemento, entre otros. A su vez, se han aplicado los diferentes modelos de durabilidad a dichos diseños alternativos.

En total, se han definido cuatro alternativas de proyecto. Para cada una de ellas, usando los diferentes modelos, se ha estimado la durabilidad, por separado, de cada uno de sus elementos estructurales: correas de cubierta, vigas, pilares y zapatas. Finalmente, se ha realizado un análisis comparativo de los resultados obtenidos, estableciéndose conclusiones.

Se han tenido en cuenta cinco modelos de durabilidad. Cuatro de ellos se limitan a una parte de los aspectos que influyen sobre la misma. Concretamente, se limitan a los efectos de la carbonatación del hormigón y a la corrosión de las armaduras por efecto de cloruros. En base a ello, permiten estimar una potencial cifra de años de vida útil, solamente teniendo en cuenta los problemas aludidos. Se trata de los modelos propuestos por la 16ª Edición del libro Jiménez Montoya – Hormigón Armado, publicado por D. Juan Carlos Arroyo Portero y otros autores; la Instrucción Española de Hormigón Estructural EHE-08; la *International Federation for Structural Concrete* (FIB: CEB-FIP); y el borrador actual del futuro Código Estructural Español. Del modelo de la FIB se ha empleado solamente el período de iniciación por carbonatación. Esto se debe a que la FIB no propone ningún modelo de propagación. Además, en el de iniciación por cloruros, tiene en cuenta fenómenos adicionales a la difusión que, al margen de provocar gran complejidad de cálculo, no aporta los datos necesarios para aplicar la formulación que propone.

El quinto modelo tiene en cuenta un conjunto muy completo de aspectos que influyen sobre la durabilidad, algunos de los cuales tienen una influencia mucho mayor que la

carbonatación y la corrosión por cloruros. Se trata del modelo propuesto en la Tesis Doctoral de D. José Mel Fraga, realizada y defendida en esta universidad.

Las principales conclusiones se resumen a continuación.

En primer lugar, hay que decir que los modelos de la literatura existente apenas van más allá de la consideración de los fenómenos de carbonatación del hormigón y de corrosión del acero por cloruros. Hay algunas publicaciones que estudian otros tipos de ataques químicos, pero se trata de aspectos que no aportan mucho más, al caso que nos ocupa.

Lo anterior lleva a que la aplicación de los modelos simplistas de carbonatación y corrosión de armaduras puede arrojar cifras desproporcionadas de años de vida útil, milenarias, que no son realistas, por la sencilla razón de que sólo tienen en cuenta dichos procesos de carbonatación y corrosión como único proceso de deterioro, al margen de no corresponderse con la práctica profesional. Con respecto a los casos en que se obtengan dichas cifras exorbitantes, todo lo más que se puede decir es que la estructura tendría una durabilidad muy alta, en ausencia de problemas diferentes a los de carbonatación del hormigón y la corrosión del acero por cloruros, pero nada más.

Estos problemas sí se incluyen en el modelo de la Tesis de Mel (2017), y pueden reducir las cifras de durabilidad real a siglos, o a décadas.

De todas formas, debe ser posible alcanzar durabilidades altísimas con adecuados diseño, cálculo, dimensionamiento y mantenimiento ya que, de hecho, existen construcciones romanas, como el Panteón de Roma, realizadas con hormigones primitivos, que siguen en pie. También existen, todavía, construcciones romanas de fábrica de ladrillo, con morteros primitivos, que siguen en pie después de varios milenios.

Desafortunadamente, no hay estudios que permitan estimar años de vida útil en función de todos los aspectos que realmente influyen en ella. El único modelo conocido que sí que tiene en cuenta todas estas variables es el de la Tesis de Mel (2017), y no queda más remedio que recurrir a modelos como el de dicha Tesis, que estima una ratio que incluye la práctica totalidad de los aspectos relacionados con la durabilidad, expresada de 0 a 1 o de 0 a 100%, siendo estos valores de mínima y máxima satisfacción del proyecto realizado, a efectos de durabilidad.

Por su parte, los modelos de estimación de vida útil en años deban usarse con mucha precaución. Sin despreciar su importancia, debe prestarse mucha más atención a otros aspectos que tienen una influencia mucho mayor sobre la durabilidad.

Así, por ejemplo, un problema frecuente, que reduce drásticamente la durabilidad, es un proyecto con una concepción errónea o con detalles constructivos inadecuados. Esto es más frecuente de lo que se piensa, tiene consecuencias mucho peores que la carbonatación y el ataque por cloruros, y algunos prestigiosos autores, como Calavera (1999), basándose en su experiencia profesional en materia de patología estructural, consideran que estos son los problemas que más peso tienen sobre la durabilidad. Obviamente, el mantenimiento debe pesar mucho también.

A pesar de que los procesos de carbonatación y corrosión influyen mucho en la vida útil, el estudio de la durabilidad basado únicamente en éste proceso, desde el punto de vista del alumno, es insuficiente y puede confundir al profesional de la calle, al no tener en cuenta el resto de procesos, ataques, problemas o fallos que pueden afectar a la durabilidad estructural. Así, la aparición de fisuras debido a un mal diseño o cálculo erróneo, provocaría que los procesos de corrosión de las armaduras se acelerasen.

En otro orden de cosas, al comparar entre sí los modelos de durabilidad basados en los procesos de carbonatación y corrosión, se observa lo siguiente:

- El modelo de la EHE-08 es más restrictivo, más conservador que los modelos del Jiménez Montoya y del futuro Código Estructural español, en lo que se refiere a los procesos de carbonatación.
- En cambio, estos últimos son más restrictivos que la EHE-08 en procesos de corrosión por cloruros.
- Al comparar la vida útil de servicio mínima, vuelve a ser la EHE 08 la normativa más conservadora.

Por otro lado, al comparar el modelo MIVES (Mel, 2017) con todos los demás, por lo menos en el caso que nos ocupa, el modelo MIVES es más exigente que los restantes modelos.

En otro orden de cosas, la EHE 08 establece que, para conseguir una estructura durable, es necesario que el Autor del proyecto diseñe una estrategia de durabilidad. A pesar de ello, la EHE 08 no propone posibles estrategias para ello, cosa que sí que hace el modelo MIVES de Mel.

Es cierto que, al no proporcionar un valor en años de la vida útil, el modelo MIVES parece menos preciso. Sin embargo, si se consigue un valor elevado del Índice de Extensión de la Vida Útil (IEVU) de la estructura propuesta, las garantías de que nuestra nave industrial alcance la vida útil nominal son elevadas.

Además, la existencia de un valor en años no implica una mayor precisión, pues dependiendo del modelo utilizado, la vida útil puede ser muy distinta. En el análisis realizado en este TFG se ha visto que esas diferencias pueden ser enormes, cosa que hace dudar de la solidez de este tipo de modelos.

Por otro lado, aquellos modelos que evalúan el fenómeno de penetración por cloruros, simplifican bastante el proceso físico-químico que realmente se produce. Como se explicado en este TFG, en la superficie del hormigón aparecen más procesos a tener en cuenta, además del de difusión.

Como conclusión final, hay que decir que, hoy en día, no se puede responder con el máximo rigor a la pregunta de ¿hasta dónde se puede llegar, en materia de durabilidad, con los hormigones actuales?. La razón es clara: todavía no ha dado tiempo a experimentarlo empíricamente. De todas formas, debería poderse llegar a cifras milenarias en los supuestos antedichos de diseño, cálculo, dimensionamiento y mantenimiento adecuados.

Por tanto, hay mucho que estudiar, todavía, en materia de durabilidad de estructuras de hormigón.

ANTECEDENTES

En la Tesis Doctoral de D. José Mel Fraga, titulada “Nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad de estructuras de hormigón”, hay una parte dedicada a la durabilidad. La durabilidad influye en la sostenibilidad económica puesto que, teniendo en cuenta que las estructuras de hormigón tienen unos costes de mantenimiento muy reducidos, a mayor durabilidad, menor es el coste medio de la estructura por año de ciclo de vida de la misma.

La durabilidad también influye en la sostenibilidad ambiental puesto que, teniendo en cuenta que las estructuras de hormigón apenas son motivo de impacto ambiental durante su periodo de servicio, a mayor durabilidad, más tiempo pasa hasta que se vuelve a emplear recursos del planeta, y a contribuir a su contaminación y, por tanto, menor es el impacto ambiental anual medio, a lo largo del ciclo de vida de la estructura.

En este TFG se trata sobre la durabilidad del hormigón estructural, armado y pretensado, dentro del marco de la sostenibilidad económica, siguiendo el modelo propuesto por D. José Mel Fraga. Este modelo es el más complejo y completo de los existentes, hasta donde se ha podido saber.

En dicha Tesis, entre otros muchos aspectos relacionados con la sostenibilidad, tras analizar el estado del arte y encontrar que no había modelos realmente completos de durabilidad de estructuras de hormigón, se generó un modelo nuevo que tiene en cuenta la práctica totalidad de los aspectos que influyen en ella. Los modelos existentes se limitan al análisis de la carbonatación del hormigón, y a algunos de los posibles ataques químicos que pueden sufrir el hormigón y el acero, y en base a ello estiman una cifra en años para la vida útil de la estructura.

Llegar a un modelo matemático que tuviese en cuenta todos los procesos físico-químicos y mecánicos que se afectan a la durabilidad, junto con el resto de aspectos que influyen y que no tienen que ver con dichos procesos, implicaría la realización de diversas Tesis Doctorales y, por tanto, el trabajo de grandes equipos de investigación multidisciplinarios, e inversiones económicas y plazos que no son factibles en una Tesis individual.

Por ello se optó por la construcción de un modelo multicriterio de evaluación, basado en el método MIVES (Metodología Integrada de Valor para Evaluaciones Sostenibles; Mel, 2017).

Tras la realización de dicha Tesis se pensó en la aplicación de su modelo de durabilidad a una estructura completa relacionada con la ingeniería industrial, estableciendo comparaciones entre la aplicación de dicho modelo y la del uso de modelos normativos, como es el caso del que incluye la EHE-08, y de otros modelos existentes. Ese es el origen de la idea de este TFG.

En otro orden de cosas, los antecedentes de este TFG incluyen diversos análisis, realizados tanto en el marco de proyectos de investigación, como en el de comités normativos.

Tras analizar la literatura existente, especialmente los principales libros sobre el tema, lo relativa a normativa española y europea, lo referente a Códigos y boletines de la FIB (*International Federation for Structural Concrete*), y lo publicado por el *American Concrete Institute* (ACI) norteamericano, se encontró, por un lado, que los Eurocódigos no aportan nada en este campo, y que el ACI no ha propuesto hasta ahora ningún modelo de durabilidad, a pesar de haberse realizado en su seno un importante estudio sobre el estado del arte.

Por tanto, se decidió emplear, además del propio modelo de durabilidad propuesto por D. José Mel (2017), el incluido en la 16ª edición del libro “Jiménez Montoya - Hormigón Armado”, el de la Instrucción EHE-08, el del futuro Código Estructural español, y el propuesto por el FIB, con las matizaciones que se han realizado con anterioridad. A diferencia del modelo de D. José Mel, y de acuerdo con la situación ya comentada, estos modelos sólo abordan los procesos de corrosión de armaduras por cloruros, incluyendo la influencia en la misma de la carbonatación del hormigón.

NORMATIVA

En este trabajo se ha aplicado la siguiente normativa, en la cual se basa el cálculo estructural realizado, o de la cual se han tomado algunos de los modelos de durabilidad aplicados:

- Código Técnico de la Edificación. Ministerio de Fomento, España.
- Instrucción Española de Hormigón Estructural EHE-08. Ministerio de Fomento, España.
- Borrador del nuevo Código Estructural español. Ministerio de Fomento, España.
- *Model Code 2010*. The International Federation for Structural Concrete (fib), Lausana, Suiza.
- *Model Code for Service Life Design*. The International Federation for Structural Concrete (fib), Lausana, Suiza.

OTRAS FUENTES DE LOS MODELOS DE DURABILIDAD EMPLEADOS

A los efectos de modelos modelos de durabilidad aquí aplicados, las fuentes adicionales la normativa que se ha referido son las siguientes:

- Arroyo Portero, Juan Carlos, y otros (2018): “Jiménez Montoya - Hormigón Armado”, 16ª edición. Editorial Cinter, Madrid.
- Mel Fraga, José (2017): “Nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad de estructuras de hormigón”. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Los objetivos de este Trabajo Fin de Grado (TFG) han sido ya expuestos en el epígrafe de Alcance.

La durabilidad de una estructura de hormigón, tal y como la define la Instrucción Española del Hormigón Estructural (EHE 08), *“es su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y solicitaciones consideradas en el análisis estructural”*.

Esta propiedad está condicionada por diferentes factores entre los que destacamos las condiciones ambientales, los materiales que constituyen el hormigón, el diseño estructural, la calidad de ejecución y los sistemas especiales de protección, tales como los aditivos, las adiciones o las protecciones contra la corrosión.

En el presente estudio nos centraremos, por un lado, en las clases de exposición y en la corrosión de las armaduras de acero, así como en la influencia que sobre ella tiene la carbonatación del hormigón. Esto es debido a que cuatro de los modelos de durabilidad comparados tienen en cuenta, principalmente, estos dos factores.

Por otro lado, se resumirá el modelo de durabilidad de la Tesis Doctoral de D. José Mel, que forma parte de su modelo de sostenibilidad económica que, a su vez, forma parte de un modelo global de sostenibilidad (que también tiene en cuenta aspectos sociales).

Para proyectar las estructuras de hormigón cuyas durabilidades serán analizadas, se ha usado el libro electrónico del Trabajo Fin de Máster de Ingeniería Industrial del alumno D. Eloy Rey Gomis (TFM-Nave Industrial), el cual permite la estimación de cargas de todo tipo, el cálculo estructural, y el dimensionamiento de la estructura de la nave industrial que se usa como caso de aplicación en este TFG. Dicho libro electrónico realiza funciones análogas a las del software comercial de cálculo estructural, como es el caso de CYPE: calcula automáticamente las cargas, analiza la estructura y la dimensiona. El software comercial no calcula el tipo de nave empleado en este TFG, y por ello se ha empleado el ya referido libro electrónico.

Además, el alumno de este TFG ha creado un libro electrónico a que permite calcular automáticamente la vida útil del elemento estructural, en años, según los cuatro modelos de durabilidad de este tipo, así como la ratio de satisfacción con respecto al proyecto realizado, a efectos de durabilidad, expresada de 0 a 1 (mínima y máxima satisfacción).

1.1. Procesos de deterioro del hormigón

La porosidad del hormigón condiciona el comportamiento de la estructura a lo largo del tiempo, facilitando su degradación al permitir el transporte de gases y de agua con sustancias agresivas por su interior. En ambientes muy húmedos, las sustancias disueltas en el agua son transportadas por ella y la difusión por gases está prácticamente impedida. Sin embargo, al cesar el transporte de agua, son los gases quienes se encargan de la difusión de sustancias. De esta forma, las zonas de hormigón sometidas a ciclos de humedad-sequedad se convierten en zonas muy vulnerables desde el punto de vista de la durabilidad. El caso más desfavorable corresponde a la combinación de estos ciclos con altas temperaturas, ya que al aumentar la temperatura aumenta la velocidad de todos los procesos químicos implicados.

Un ejemplo claro de estructuras sometidas a estos ciclos de humedad-sequedad son los puentes. Según FREYSSINET, empresa encargada de la reparación parcial del puente de Rande, en él *“Se habían observado degradaciones importantes en los paramentos de la pila Sur, y en menor medida, también en los de la pila Norte. La cara más dañada de la pila Sur pertenecía a su fuste Este, que era el más expuesto al efecto de los vientos de dirección suroeste, característicos en invierno por su intensidad y continuidad, y presentaba grandes zonas de hormigón despegadas, en las que se podía ver que la armadura estaba severamente corroída”*.

Existen diferentes tipos de acciones que atentan contra la durabilidad: acciones mecánicas, físicas, biológicas y químicas. Estas últimas son las más perjudiciales siendo los ataques por ácidos, por sulfatos y por álcalis los más importantes.

La acción de los ácidos produce una conversión de sus compuestos cálcicos en sales cálcicas del ácido actuante, de tal forma que se destruye la estructura del cemento endurecido. Si la sal es soluble, la velocidad de la reacción es mayor.

El ataque por sulfatos se debe a la formación de sulfoaluminato tricálcico (sal de Candlot) debido a la reacción del ión sulfato con el aluminato del cemento. Esta reacción produce la aparición de tensiones internas en el hormigón debido a un aumento de volumen de la sustancia creada. Como este ión solo ataca al componente alúmina, utilizando cementos con bajo contenido en esta última sustancia se obtiene una mejora. Un caso singular es el del hormigón en contacto con el agua de mar pues los aluminatos fijan los iones cloruro.

Finalmente, en el ataque por álcalis, muy parecido al ataque por sulfatos, la sustancia que reacciona con el agente agresivo son los áridos formando el gel álcali-sílice. Esta reacción provoca expansiones destructivas en el hormigón.

1.2. Armaduras de acero

Como ya se ha mencionado anteriormente, la mayoría de los modelos se centran en la corrosión de las armaduras para el estudio de la durabilidad. Tanto el Código Modelo de la FIB (*The International Federation for Structural Concrete*), la EHE 08 (Instrucción del Hormigón Estructural), el borrador del nuevo Código Estructural o el modelo propuesto por Jiménez Montoya se centran en la corrosión de las armaduras de acero para el cálculo de la vida útil de la estructura. Únicamente es el modelo de D. José Mel, el modelo MIVES (Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible), el que tiene en cuenta más factores para el estudio de la durabilidad.

Los procesos que producen la corrosión de las armaduras de acero son: la carbonatación y la acción de cloruros. La penetración en el hormigón de moléculas de CO_2 y de los iones Cl^- se realiza por difusión a través de los poros capilares. Cuando los poros están saturados, la difusión del CO_2 es imposible (como todo gas, el CO_2 requiere un medio aéreo para poder progresar; si el hormigón está completamente sumergido en agua, no se carbonata). En el caso de iones cloruro, la penetración se lleva a cabo tanto en condiciones de saturación como de no saturación, pues en el avance pueden actuar diferentes mecanismos de transporte en lo que respecta a las capas más superficiales del elemento: difusión, convección, absorción o permeabilidad; ya que en éstas el equilibrio con las condiciones ambientales de humedad y temperatura se alcanza con mayor facilidad. Sin embargo, la mayoría de las expresiones que modelan el avance del agresivo consideran el mecanismo de difusión como el predominante.

1.2.1. Carbonatación

El agua contenida en los poros del hormigón tiene un elevado contenido de hidróxido de calcio, de tal forma que su pH es superior a 12,5. Gracias a este pH

básico el acero se encuentra protegido y se produce la formación en su superficie de una capa microscópica de óxido denominada capa pasiva. Esta capa es impermeable, lo que impide el avance de la solución. A este fenómeno, en el cual el acero queda protegido por la capa pasiva se le denomina pasivación.

El fenómeno es fácil de comprender si se observa el diagrama de Pourbaix del acero a 25°C (Figura 1). En él se observan la zona de corrosión, la zona de inmunidad, (donde el acero no se corroe electroquímicamente por las condiciones desfavorables de potencial/ pH) y la zona de pasivación.

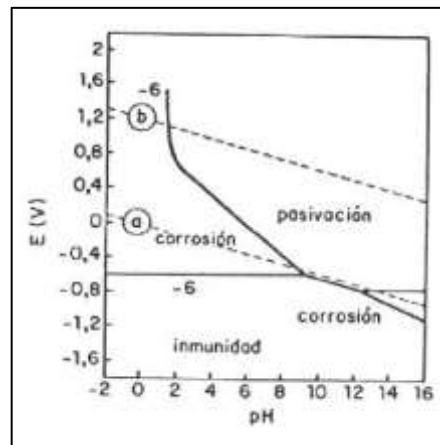


Figura 1: Diagrama de Pourbaix para el hierro a 25°C

Una vez que el CO₂ del aire entra dentro del hormigón, éste reacciona con el óxido de calcio formando carbonato cálcico. El pH disminuye y si desciende por debajo de los 9, la capa pasiva se destruye, y por tanto también lo hace la protección. A este fenómeno se le llama carbonatación.

Es importante comentar que la carbonatación, al absorber CO₂ de la atmósfera, ayuda a reducir las emisiones totales de CO₂ asociadas a la producción de hormigón.

1.2.2. Presencia de iones cloruros

Otra causa por la que se puede producir la rotura de la capa pasiva es la presencia de iones cloruros libres en la fase acuosa. Aquellos que interactúan con el sólido, los denominados cloruros combinados, se combinan químicamente, pasan a formar parte de los productos de hidratación; y físicamente, son absorbidos por la interacción iónica sobre las paredes del sólido. Estos últimos se consideran inocuos para la armadura pues no la dañan. La cantidad de cemento es un parámetro importante ya que permite la retención de los iones cloruros (se forma la Sal Friedel).

La penetración de cloruros se produce por difusión de éstos en poros llenos de agua ya que el cloruro requiere un medio húmedo para su transporte. Este mecanismo ocurre por diferencias de concentración entre dos zonas adyacentes, es decir, la diferencia de concentración en dos zonas del hormigón provoca el movimiento de moléculas desde la zona más concentrada a la zona de menor concentración, con el objetivo de establecer un equilibrio.

Para explicar ambos procesos se utiliza, entre otras, la segunda ley de Fick, una ley cuantitativa en forma de ecuación diferencial que describe diversos casos de difusión de materia o de energía en un medio en el que no existe un equilibrio químico o térmico.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

En donde:

- **D**: coeficiente de difusión
- **C**: concentración de la sustancia difusora
- **x**: profundidad
- **t**: tiempo

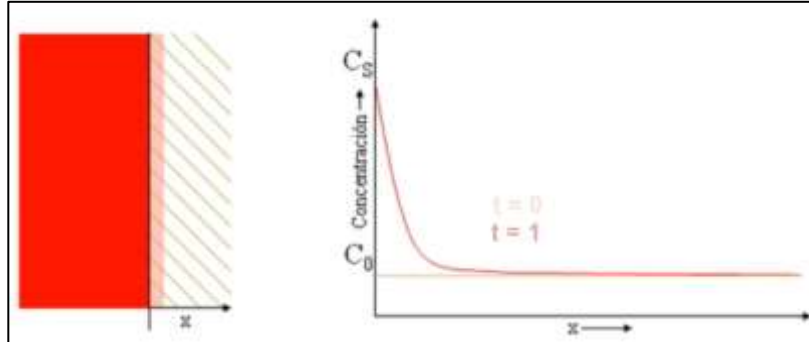


Figura 2. Variación de la concentración de un gas según la segunda ley de Fick

Si se pone en contacto el gas con el material y se deja actuar al tiempo, el gas se va a difundir dentro del material y la concentración va a variar. Ésta será mayor cuánto más cerca estemos de la superficie (Figura 2).

Al tratarse de una ecuación compleja, se realizan una serie de simplificaciones para poder resolverla:

- Se supone que el coeficiente de difusión no depende de la profundidad

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right)$$

- Consideraremos al hormigón como un sistema sólido semi-infinito y unidimensional
- El hormigón es homogéneo, isótropo y no se producen reacciones entre él y los cloruros
- El material está en contacto con un gas que tiene una concentración inicial definida (C_s) y existe en el propio material una concentración inicial de la sustancia difusora (C_b). De esta forma, para un $t > 0$:

$$C = C_s \text{ en } x = 0 \text{ y } C = C_b \text{ en } x = \infty.$$

La solución a esta ecuación diferencial sería la siguiente:

$$\frac{C_x - C_b}{C_s - C_b} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

Siendo:

- **C_x**: concentración a una profundidad x
- **erf**: función de error gaussiana. Es una función matemática que se deriva de la función de Gauss de cálculo y estadística y que necesita ser tabulada o graficada, no puede ser explicitada por una ecuación (Figura 3)

z	$erf(z)$	z	$erf(z)$	z	$erf(z)$
0	0	0.55	0.5633	1.3	0.9340
0.025	0.0282	0.60	0.6039	1.4	0.9523
0.05	0.0564	0.65	0.6420	1.5	0.9661
0.10	0.1125	0.70	0.6778	1.6	0.9763
0.15	0.1680	0.75	0.7112	1.7	0.9838
0.20	0.2227	0.80	0.7421	1.8	0.9891
0.25	0.2763	0.85	0.7707	1.9	0.9928
0.30	0.3286	0.90	0.7970	2.0	0.9953
0.35	0.3794	0.95	0.8209	2.2	0.9981
0.40	0.4284	1.0	0.8427	2.4	0.9993
0.45	0.4755	1.1	0.8802	2.6	0.9998
0.50	0.5205	1.2	0.9103	2.8	0.9999

Figura 3. Función de error

Además de la carbonatación o la presencia de cloruros, para que se produzca la corrosión de las armaduras debe haber presencia de oxígeno y agua. La corrosión es el fenómeno de oxidación de acero por el oxígeno y la humedad. Debido a la presencia de agua, el proceso es electroquímico: en la región anódica el metal se oxida, mientras que en la catódica es el oxígeno, en presencia de agua, la que se reduce. Al oxidarse, el acero aumenta de volumen en más de 6 veces provocando la rotura del hormigón con aparición de fisuras longitudinales en la dirección de la barra.

El hormigón protege al acero mediante una acción de doble naturaleza: una protección física a través del recubrimiento, y una química gracias a la elevada alcalinidad de la fase acuosa que promueve la formación de la capa de pasiva. El periodo durante el cual el hormigón del recubrimiento protege a las armaduras es función del cuadrado del espesor del recubrimiento, por lo que, a igualdad de las restantes variables, un recubrimiento doble se traduce en un periodo de protección cuatro veces mayor. El efecto de este parámetro se verá posteriormente con el análisis de la durabilidad en las estructuras de hormigón.

1.3. Vida útil de una estructura

En el libro “Jiménez Montoya Hormigón Armado”¹, se diferencian 3 conceptos de vida útil. La vida útil de una estructura es el período de tiempo en que esta mantiene el cumplimiento de las exigencias una vez su ejecución ha finalizado. Durante este período ésta requerirá una conservación normal, sin la necesidad de operaciones de rehabilitación.

Los conceptos de dicho libro son:

- **Vida útil nominal:** vida útil definida por la Propiedad y transmitida al proyectista como condición de partida para la redacción del proyecto.
- **Vida útil del proyecto:** valor de la vida útil obtenida como resultado de aplicar un coeficiente de ponderación a la vida útil nominal y que, en su caso, es la referencia a emplear en el caso de una comprobación semiprobabilista.
- **Vida útil de servicio:** vida útil real de la estructura, que puede ser mayor o menor que la vida útil nominal.

¹ Jiménez Montoya, Pedro (2018): “Jiménez Montoya Hormigón Armado”, 16ª edición, revisada, reducida y complementada

La EHE 08, al igual que el Código Técnico de la Edificación, utiliza el término de vida útil para hacer referencia al “período de servicio” o “vida útil de servicio”. Al tratarse de la normativa vigente en España, a partir de ahora se adopta también dicho término.

A pesar de haber alcanzado el final de su vida útil de servicio, la estructura puede seguir cumpliendo con su función mediante reparaciones extraordinarias.

Normalmente la vida útil nominal es una decisión de la propiedad. Sin embargo, existen normativas en las que se definen vidas útiles de referencia. Dos ejemplos son la Tabla 1, que corresponde a la EHE 08; y la Tabla 2, que pertenece al libro de Jiménez Montoya (basada en el Eurocódigo EN 1990).

Tabla 1. Vida útil nominal de los diferentes tipos de estructura ²

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

Tabla 2. Vida útil de cálculo indicativa

Categoría vida útil de cálculo	Vida útil de cálculo indicativa	Ejemplos
1	10	Estructuras temporales ⁴
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

En este estudio se analizará únicamente estructuras industriales, de tal forma que la vida útil de cálculo nominal debería de comprender entre 15 y 50 años. Se calculará la vida útil de las zapatas, de las correas, de las vigas y de los pilares, intentando obtener siempre una vida útil superior a la vida útil del proyecto en todas las unidades estructurales mencionadas.

² Cuando una estructura esté constituida por diferentes partes, podrá adoptarse para tales partes diferentes valores de vida útil, siempre en función del tipo y características de la construcción de las mismas

³ En función del propósito de la estructura (exposición temporal, etc.). En ningún caso se considerarán como estructuras de carácter temporal aquellas estructuras de vida útil nominal superior a 10 años

⁴ Estructuras o partes de estructuras que puedan desmontarse con la intención de volver a usarse no deben considerarse como estructuras temporales

Los modelos de durabilidad utilizados en el estudio están orientados en función a los procesos de corrosión descritos anteriormente. Por su parte, el modelo MIVES tiene en cuenta más parámetros y procesos para la estimación de un ratio de durabilidad.

El modelo de vida útil utilizado por todos estos modelos, a excepción del MIVES, es el modelo de Tuutti. En él se concibe la vida útil como la suma de dos períodos: el período de iniciación de la corrosión y el período de propagación. El primero es el tiempo que tarda el frente de penetración del agresivo en alcanzar la armadura y provocar así su despasivación y el inicio de la corrosión; y el segundo, el tiempo hasta que se produce una degradación significativa del elemento estructural, un daño inadmisibles. En este segundo período, la corrosión se desarrolla a una velocidad que se supone constante a lo largo de tiempo. Esto queda reflejado en la Figura 4.

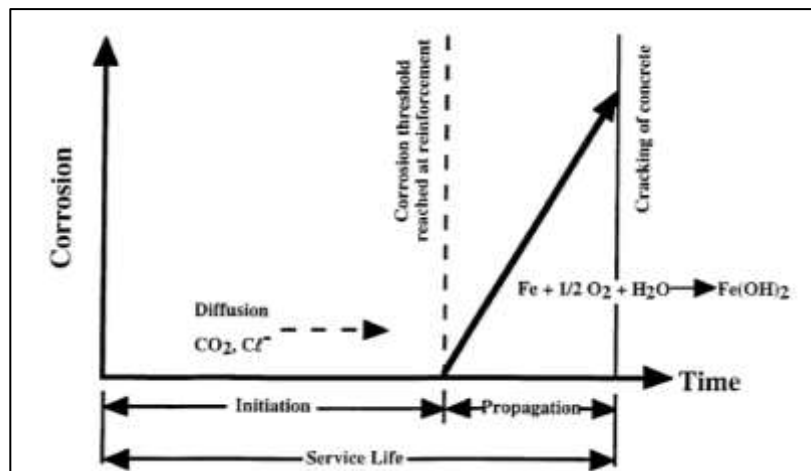


Figura 4. Modelo de vida útil de Tuutti.

2. MODELO MIVES (MODELO INTEGRADO DE VALOR PARA UNA EVALUACIÓN SOSTENIBLE). INCLUSIÓN DE LA DURABILIDAD EN EL MARCO DE MODELOS DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA

El Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible (MIVES) es una combinación de técnicas deterministas basadas en el análisis de valor. Esta metodología es un soporte a la toma de decisiones. Permite la conversión de las diferentes características de los objetos a evaluar en una serie de parámetros homogéneos y cuantificables (valores), que faciliten la objetivación de la elección.

En dicho método se construye un árbol de requerimientos (Figura 5), que es un grafo jerárquico que refleja el modelo de evaluación, en cuya parte derecha, más ramificada, se encuentran los indicadores, estando en el extremo izquierdo el índice global a calcular. Un árbol de requerimientos (Figura 5) puede tener dos o más niveles, siendo muy frecuente que tenga tres:

- Indicadores.
 - Son los parámetros o variables que se van a medir.
 - Un indicador puede ser cualitativo o cuantitativo, sea discreto o continuo, en este último caso.
 - Los indicadores pueden estar expresados en unidades y escalas diferentes entre sí.
 - Para solucionar dicho problema se emplean funciones matemáticas que sirven para transformar todos los indicadores a una misma unidad adimensional, denominada índice de satisfacción, valor o índice de valor. Estas funciones matemáticas se denominan funciones de valor.
 - Las funciones de valor pueden ser lineales o no lineales. Esto permite contemplar posibles no linealidades en la evaluación.
- Criterios.
 - Normalmente son agrupaciones de varios indicadores que tienen que ver con un aspecto determinado de la evaluación.
 - Así, por ejemplo, en un contexto de evaluación de la sostenibilidad ambiental, ésta puede desglosarse en varios criterios, como puedan ser la disminución de las reservas de recursos del planeta, y la contaminación del medio ambiente, entre otros.
 - A su vez, estos criterios se evaluarán en base a sus indicadores. Por ejemplo, la contaminación del medio ambiente puede medirse a través de indicadores ya clásicos en un Análisis Del Ciclo De Vida (ACV), como son los potenciales de calentamiento global del planeta, acidificación, o eutrofización, entre otros.
 - Dentro de un determinado criterio, cada indicador tiene un peso porcentual determinado, que sirve a los propósitos del cálculo a realizar en la evaluación, y la suma de los pesos de todos los indicadores de un criterio es 100%.
 - Dicho todo lo anterior, en algunos casos puede suceder que un criterio no tenga desglose, constando de un solo indicador. En este caso, el peso del indicador es del 100%.
- Requerimientos.

- Normalmente son agrupaciones de varios criterios que tienen que ver con un aspecto determinado de la evaluación.
- Así, por ejemplo, en un contexto de evaluación de la sostenibilidad, ésta se suele desglosar en tres requerimientos, el medioambiental, el social, y el económico.
- A su vez, estos requerimientos se evaluarán en base a sus criterios que, a su vez, se evaluaban en función de sus indicadores, como ya se ha dicho.
- De nuevo, dentro de un determinado requerimiento, cada criterio tiene un peso porcentual determinado, que sirve a los propósitos del cálculo a realizar en la evaluación, y la suma de los pesos de todos los criterios de un requerimiento es 100%.
- Una vez más, en algunos casos puede suceder que un requerimiento no tenga desglose, constando de un solo criterio. En este caso, el peso del criterio es del 100%.
- Finalmente, en un contexto de evaluación de la sostenibilidad dividida en los requerimientos medioambiental, social y económico, cada requerimiento tendrá un peso porcentual, y la suma de los tres pesos es 100%.

El objetivo del árbol de requerimientos es incluir de forma sintética y ordenada todos los aspectos de la evaluación, de forma que sea fácilmente inteligible por aquellos que usen el árbol, así como facilitar el establecimiento de los pesos absolutos de los indicadores y proporcionar un esquema de cálculo.

Como se ha anticipado, cada rama del árbol (requerimiento, criterio o indicador) tiene un peso, que indica la importancia de dicho ramal dentro del ramal superior al mismo. Se establece también una función de valor para cada indicador, de forma que su medición sea transformada a un índice de satisfacción, o valor, que tomará valores adimensionales entre 0 y 1 (respectivamente, mínimo y máximo nivel de satisfacción). Todo ello (árbol, pesos y funciones de valor) constituye el modelo de evaluación.

Una vez se han calculado los índices de satisfacción de cada indicador, el resto de la evaluación consiste en determinar el valor del sumatorio ponderado, realizado de derecha a izquierda del árbol, comenzando por la zona de indicadores.

- El índice de satisfacción de un criterio es el sumatorio ponderado del índice de satisfacción de todos sus indicadores.
- Tras ello, el índice de satisfacción de un requerimiento es el sumatorio ponderado del índice de satisfacción de todos sus criterios.
- Finalmente, el índice global que se desea obtener es el sumatorio ponderado del índice de satisfacción de todos los requerimientos.

En la figura 5 se representa el árbol que permite calcular el Índice de Sostenibilidad Económica (ISE) de una estructura de hormigón, de acuerdo con el modelo propuesto por Mel (2017). Como se puede observar, el ISE tiene dos requerimientos, uno relacionado con la durabilidad, y otros con costes y prestaciones de la estructura.

Esta es una posible forma de establecer la inclusión de la durabilidad en el marco de modelos de evaluación de la sostenibilidad económica.

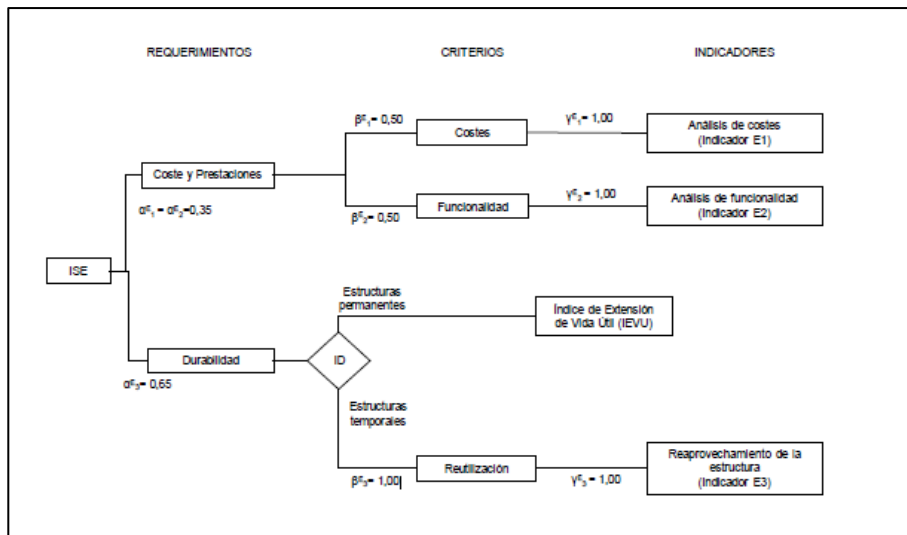


Figura 5. Esquema para el cálculo del Índice de Sostenibilidad Económica propuesta por Mel (2017)

En el Anexo 1 se encuentran todos los aspectos a valorar en los diferentes indicadores de durabilidad de este modelo. Es decir, se encuentran todas las tablas de evaluación de cada indicador, que contienen la puntuación de cada aspecto incluido en dicha evaluación.

El modelo MIVES utilizado es el realizado por D. José Mel Fraga (2017) en su tesis doctoral *“Nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad de estructuras de hormigón”*. En el Capítulo 10 de dicha Tesis se propone el empleo de los tres índices de sostenibilidad clásicos: Índice de Sostenibilidad Medioambiental (ISMA), Índice de Sostenibilidad Económica (ISE) e Índice de Sostenibilidad Social (ISS).

En este TFG sólo se va a tratar la durabilidad que, en dicha Tesis, como también se propone por otros autores, se encuentra enmarcada en el requerimiento económico de la sostenibilidad, formando parte del Índice de Sostenibilidad Económica. Concretamente, en este TFG se empleará el índice de Extensión de la Vida útil (IEVU) de la estructura propuesto por Mel (2017), que es una forma de evaluar la durabilidad de la misma.

El lector interesado pueden encontrar información detallada sobre el método MIVES y sobre el modelo de durabilidad de D. José Mel Fraga en los epígrafes que siguen, en los Anexos a este documento, y en dicha tesis doctoral (Mel, 2017).

2.1. Índice de Sostenibilidad Económica (ISE)

El objeto de este índice es representar el desempeño económico de una estructura de hormigón por medio de un índice cuyo valor oscila entre 0,00 y 1,00. El ISE (Figura 5) se ha formado por la suma ponderada de dos requerimientos, el primero de ellos relativo a la valoración de las prestaciones ofrecidas por la estructura (“Coste y prestaciones”) y el segundo centrado en la evaluación de su durabilidad.

El requerimiento denominado “durabilidad” es el que afecta a este estudio. Si comparamos este método con el resto, se observa que es el único que no da el valor de la vida útil, en años. Sin embargo, es el más completo en cuanto al estudio de la durabilidad pues, como se verá a continuación, es el que analiza más aspectos. Es un modelo complementario a los otros que se manejan, al contemplar diferentes aspectos, tanto cualitativos como cuantitativos, con influencia en la durabilidad. Este modelo no se encuentra al mismo nivel que los otros estudiados pues una de las variables tenida en cuenta en alguno de los indicadores es la de que en el proyecto se haya aplicad alguno

de los modelos numéricos para determinar la vida útil que también forman parte de la comparativa de este TFG.

Para el análisis de la durabilidad hay que tener en cuenta el carácter de la estructura, ya que una estructura de carácter “temporal” está pensada para un período inferior a 10 años. Este modelo tiene en cuenta esto, y por ello añade un parámetro denominado “carácter de la estructura”, que puede tomar dos valores posibles que permiten diferenciar las estructuras “permanentes” de las “temporales”. Este parámetro se integra en el denominado “Índice de Durabilidad”, o ID.

En nuestro caso consideraremos que la estructura tiene carácter “permanente”, porque una nave industrial debe tener, normalmente, una vida útil mayor de 10 años. De esta manera, el requerimiento se dirige hacia la evaluación de un Índice de Extensión de Vida Útil (IEVU) (Figura 6), formado nuevamente por su propio árbol de requerimientos, estructurado en tres niveles y dando lugar a seis indicadores.

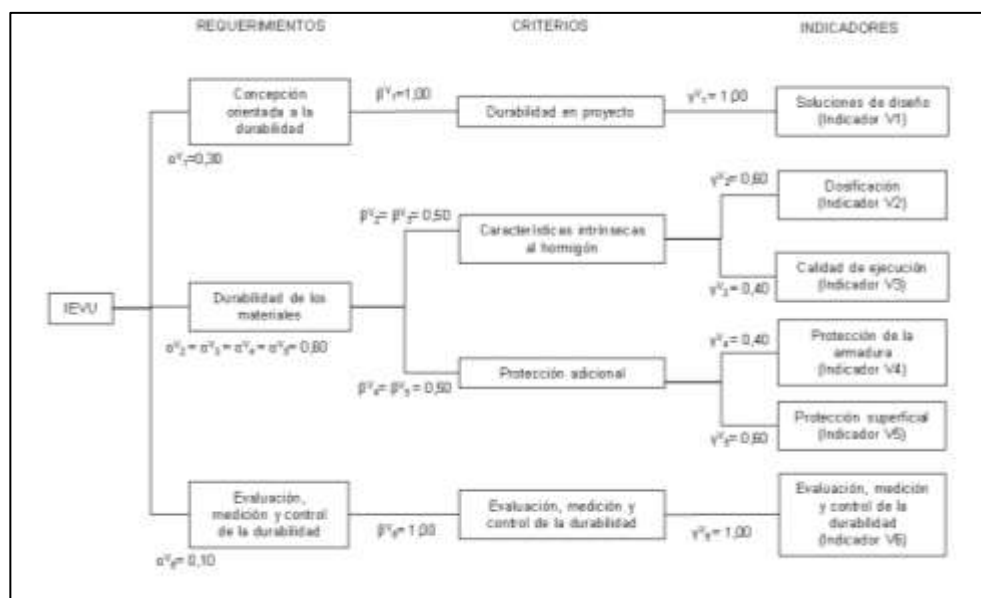


Figura 6. Esquema para el cálculo del IEVU

2.2. Metodología MIVES

En el libro electrónico (Excel) creado se calcula el requerimiento “Durabilidad”. Este requerimiento se expresa por medio del Índice de Durabilidad (ID), definido por la expresión, cuyo valor estará comprendido entre 0,00 y 1,00.

$$ID = c \cdot (1 - POP) \cdot IEVU + (1 - c) \cdot \beta^{E_3} \gamma^{E_3} V^{E_3}$$

Siendo:

- V^{E_i} : coeficiente de valor obtenido para el indicador económico i .
- α^{E_i} : coeficiente de ponderación (peso) del requerimiento correspondiente al indicador económico i .
- β^{E_i} : coeficiente de ponderación (peso) del criterio correspondiente al indicador económico i .
- γ^{E_i} : coeficiente de ponderación (peso) del indicador económico i .
- ID: índice de durabilidad.
- IEVU: índice de extensión de vida útil.

- **c**: carácter de la estructura. Permite separar las estructuras “temporales” de las “permanentes” pues para las primeras c vale 0 y para las segundas 1.
- **POP**: probabilidad de obsolescencia prematura.

Como en nuestro estudio no nos vamos a centrar en estructuras temporales la parte que se encuentra a la derecha del operador suma en la ecuación corresponde al indicador E3 “Reaprovechamiento de la estructura” es nula. Para más información sobre este indicador revisar la tesis doctoral de D. José Mel Fraga “*Nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad de estructuras de hormigón*”.

Los parámetros “ β ”, “ α ” y “ γ ” son coeficientes de ponderación que valen entre 0,00 y 1,00 y que dependen del indicador, del criterio y de cada requerimiento.

En el anexo 1 se encuentran todas las tablas con todos los datos necesarios para el cálculo del Índice de Durabilidad. El parámetro “ α_i^E ” no será utilizado en el estudio ya que no vamos a calcular el Índice de Sostenibilidad Económico (ISE).

Como ya se ha mencionado antes, el método MIVES asigna diferentes pesos a los criterios, requerimientos e indicadores y con la ayuda de las funciones de valor obtiene el árbol de requerimientos completo, lo que facilita la toma de decisiones.

En nuestro caso únicamente calcularemos el Índice de Durabilidad (ID) para estructuras de carácter “permanente”. De esta forma, c sería igual a 1 y la anterior ecuación pasaría a ser:

$$ID = (1 - POP) \cdot IEVU$$

La Probabilidad de Obsolescencia Prematura (POP) se introduce en la ecuación debido a que existe la posibilidad de que quede fuera de servicio antes de lo que sus materiales y características técnicas lo hubieran permitido. Esto se puede deber a diferentes motivos o circunstancias, como el avance de la tecnología, etc. A mayor POP más bajo será el Índice de Durabilidad. El valor máximo es uno y en este caso, no sería necesaria la evaluación del Índice de Extensión de Vida Útil (IEVU.) En este caso, se adoptaría el parámetro $c=0$ aunque la estructura no tuviera carácter estrictamente “temporal”. En el anexo 1 se encuentra una tabla que puede servir de orientación para la elección del parámetro. El estudio se va a centrar en la evaluación del IEVU de los elementos que conforman la estructura, sin estimar una POP debido a que este aspecto implicaría ya la consideración de más factores que los contemplados dentro del alcance del TFG.

El IEVU valora las características de la estructura que le permiten incrementar su vida útil por encima de los valores mínimos estipulados, en base a las soluciones de diseño, a la selección de los materiales, a los sistemas de protección del acero y del hormigón, entre otros aspectos. Internamente, se estructura a su vez en los niveles de requerimientos, criterios e indicadores, según un sumatorio ponderado de indicadores.

$$IEVU = \sum \alpha_i^V \beta_i^V \gamma_i^V V_i^V$$

Siendo:

- V_i^V : coeficiente de valor obtenido para el indicador de extensión de vida útil i , que procede de aplicar a cada indicador su función de valor correspondiente y los parámetros incluidos en la Tabla 3.
- α_i^V : coeficiente de ponderación de requerimiento correspondiente al indicador de extensión de vida útil i .
- β_i^V : coeficiente de ponderación de criterio correspondiente al indicador de extensión de vida útil i .

- γ_i^V : coeficiente de ponderación del indicador de vida útil i .

$$V_i = K_i \left[1 - e^{m_i \left(\frac{p_i}{n_i} \right)^{A_i}} \right]$$

Tabla 3. Parámetros para las funciones de valor V_i

Indicador	Parámetro				Geometría de la función	
	K_i	m_i	n_i	A_i	Pendiente	Curvatura (⁵)
Soluciones de diseño (V1)	2,19	-0,20	0,80	5,00	Creciente	Cóncava
Dosificación del hormigón (V2)	10,50	-0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal
Ejecución del hormigón (V3)	1,22	-0,20	0,70	6,00	Creciente	Cóncava
Protección superficial (V4)	3,86	-0,30	1,00	2,00	Creciente	Cóncava
Protección de las armaduras (V5)	10,50	-0,01	0,10	1,00	Creciente	Lineal
Evaluación, medición y control de la durabilidad (V6)	1,00	-0,55	0,55	6,00	Creciente	Forma "S"

En cada indicador, se analizarán diferentes aspectos. Cada uno de ellos tiene una puntuación, que se definiría como el peso que tiene un aspecto dentro del indicador correspondiente. En los indicadores que forman parte de este índice, las puntuaciones λ_{ix}^V pueden diferir en función de la clase de exposición a la que se encuentre sometido cada elemento de la estructura. Además, es posible la coexistencia dentro de una misma estructura de elementos sometidos a clases de exposición diferentes. Por este motivo es necesario calcular por separado las puntuaciones parciales para cada clase de exposición, y obtener la puntuación total por medio del sumatorio de las anteriores, ponderadas según el porcentaje de hormigón correspondiente a cada clase o grupo de clases de exposición sobre el total de hormigón de la estructura.

La función representativa de un indicador genérico de este índice tendría la forma:

$$P^{V_i} = \frac{1}{100} \cdot \sum p_k \cdot \lambda_{ixk}^V$$

⁵ La curvatura de las funciones de valor se entiende referida al eje de ordenadas

Dónde:

- p_k : porcentaje de hormigón presente en obra sometido al k-ésimo grupo de clases de exposición.
- λ_{ixk}^V : suma de las puntuaciones parciales que sean de aplicación a los elementos sometidos al k-ésimo grupo de clases de exposición.

La salida P_i^V de la función representativa de cada indicador se utiliza como argumento de la función de valor para dicho indicador, entrando con ella en el eje de abscisas.

En todos los casos, al igual que antes, la puntuación máxima alcanzable para cada indicador, $\sum \lambda_{ix}^V$, es:

$$\sum \lambda_{ix}^V \leq 100$$

En el estudio se calcula el IEVU de cada elemento de la estructura, no llegando a determinar e IEVU global por medio del sumatorio ponderado mencionado anteriormente, de tal forma que la ratio conjunta es la mínima de las diferentes piezas (la ratio va de 0 a 1). Con los restantes modelos, que estiman tiempo en años, la vida útil global podría definirse como el mínimo de los años de vida útil de todas las piezas que forman la estructura.

Las funciones de valor que nos encontraremos en el Índice de Extensión de Vida Útil son las siguientes:

- Creciente, cóncava y con una fuerte pendiente con respecto al eje de ordenadas: Se requiere un elevado grado de cumplimiento de requerimientos para alcanzar una buena puntuación en el indicador. El indicador V1 y el V3 utilizan este tipo de función.
- Lineal y creciente: Se utiliza cuando la cantidad de aspectos a valorar es elevada y no se encuentran razones para otro tipo de geometría. Un ejemplo claro de este tipo de función son el indicador V2 y el V5.
- Creciente y cóncava: Para una buena puntuación es necesario cumplir una medida importante o varias de menor entidad. El indicador V4 “protección superficial del hormigón” utiliza este tipo de función.
- Creciente y con forma de “S”: una vez cumplido el primer requisito, el cumplimiento de alguno de los restantes implica una elevada puntuación. El indicador V6 usa este tipo de función.

2.3. Indicadores del Índice de Extensión de la Vida Útil (IEVU)

2.3.1. Indicador V1: soluciones de diseño

Pertenece al requerimiento “Concepción orientada a la durabilidad” y en él se valoran aspectos relacionados con la concepción y el diseño de formas estructurales, así como con la incorporación al proyecto de criterios y especificaciones con relevancia en la durabilidad. No se diferencia entre hormigón en masa, armado o pretensado; y solo se tienen en cuentas dos grupos de clases de exposición:

agresividad escasa y agresividad moderada/alta. Es el indicador que mayor peso tiene (30%). En la Figura 7 se puede apreciar la función de valor para este indicador.

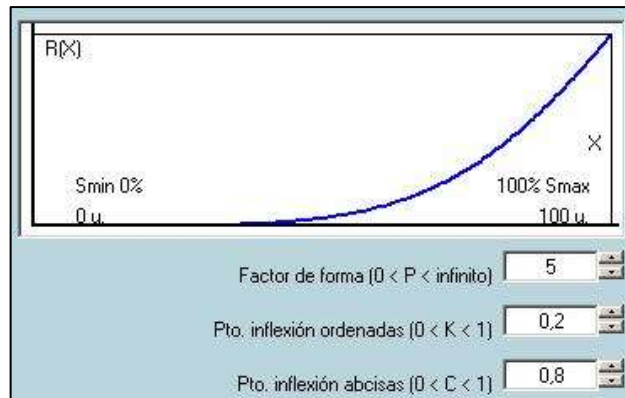


Figura 7. Función de valor para el indicador V1 (soluciones de diseño)

2.3.2. Indicador V2: dosificación del hormigón

Los indicadores V2, V3, V4 y V5 pertenecen todos al requerimiento “durabilidad de los materiales”. Este indicador estudia la influencia en la durabilidad de la dosificación o composición del hormigón, premiando la utilización de relaciones agua/cemento a/c bajas, contenidos de cemento equivalente elevados y un alto porcentaje de sustitución de Clinker por adiciones. También se premia, en ambientes agresivos o muy agresivos, el uso de aditivos como los inhibidores de corrosión. Al igual que el quinto indicador, este indicador se encuentra en la segunda posición con un peso del 18%. En la Figura 8 se puede apreciar la función de valor para este indicador.

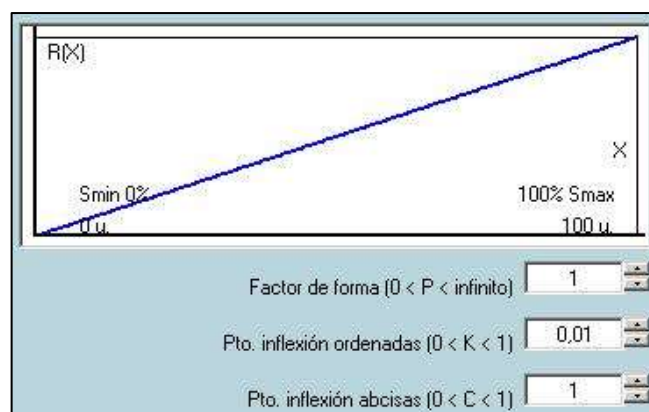


Figura 8. Función de valor para el indicador V2 (dosificación del hormigón)

2.3.3. Indicador V3: ejecución de la estructura

Este indicador valora los aspectos de la ejecución de la estructura que influyen en la durabilidad, como lo son el curado o la adopción de recubrimientos superiores a los máximos exigidos. En todos los modelos se tiene en cuenta el recubrimiento, sin embargo, sólo el modelo MIVES, el modelo de Jiménez Montoya y el modelo de la FIB se centran en el curado. Como veremos posteriormente, la prolongación del tiempo de curado ayuda a disminuir la profundidad de carbonatación y un aumento excesivo del recubrimiento perjudica la puntuación.

El indicador “ejecución de la estructura” premia el periodo de curado, sobre todo en ambientes secos y en ambientes poco agresivos, pues el recubrimiento es menor. Además, a mayor relación a/c, más tiempo necesita el hormigón para el desarrollo de la permeabilidad. También premia que el recubrimiento no tenga un espesor excesivo, pues es contraproducente desde el punto de vista económico y ambiental. Este indicador se encontraría en la cuarta posición con un peso del 12%. En la Figura 9 se puede apreciar la función de valor para este indicador.

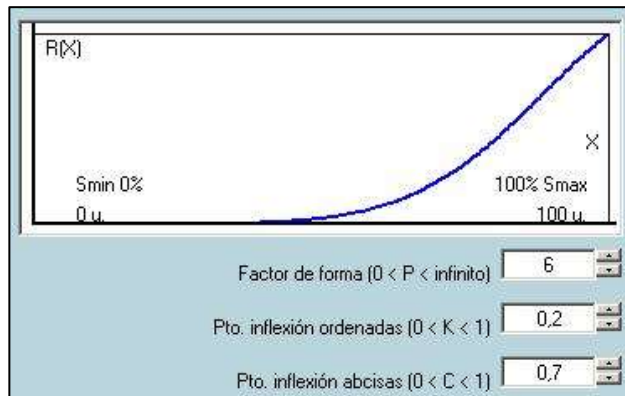


Figura 9. Función de valor para el indicador V3 (ejecución de la estructura)

2.3.4. Indicador V4: protección superficial del hormigón

Como ya hemos comentado antes, la penetración de humedad y agentes agresivos en el interior del hormigón provoca su deterioro con mayor rapidez. Estas medidas sólo se tienen en cuenta en ambientes agresivos o extremos, de tal forma que en los no agresivos, la puntuación otorgada es alta a pesar de que no se utilicen estas medidas. Posee el mismo peso que el indicador V3. En la Figura 10 se puede apreciar la función de valor para este indicador.

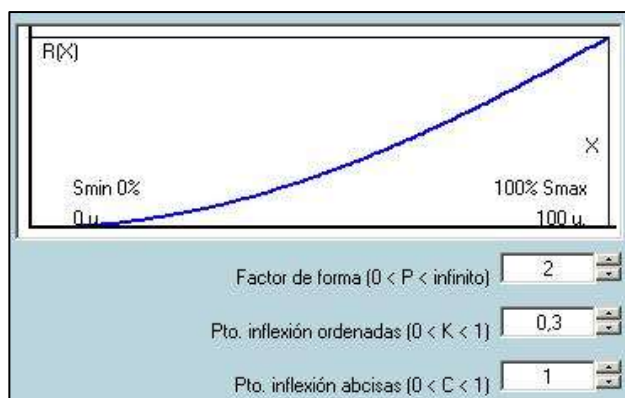


Figura 10. Función de valor para el indicador V4 (protección superficial del hormigón)

2.3.5. Indicador V5: protección de las armaduras

El objetivo de este indicador es el de retrasar el inicio y el avance de la corrosión en las armaduras de acero. Sólo se aplican en casos de gran agresividad ambiental. Algunos ejemplos son la utilización de revestimientos, de acero inoxidable o la protección catódica. En los ambientes con escaso riesgo de corrosión, estas medidas no son necesarias y por lo tanto se le otorga la puntuación máxima. Tiene el mismo

peso que el indicador V2. En la Figura 11 se puede apreciar la función de valor para este indicador.

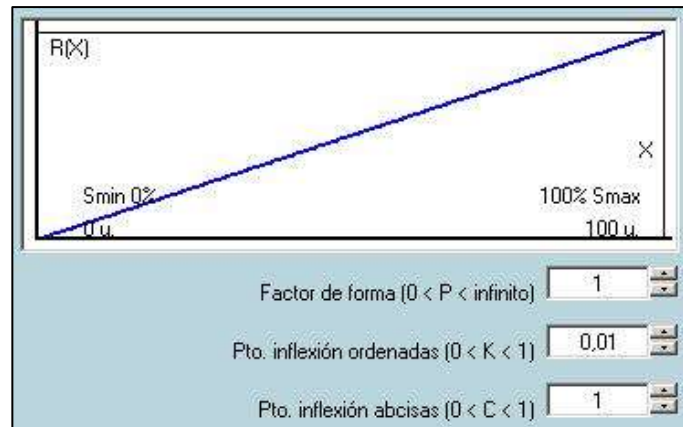


Figura 11. Función de valor para el indicador V5 (protección de las armaduras)

2.3.6. Indicador V6: evaluación, mediciones y control de la durabilidad

Este indicador es el único que constituye el requerimiento de “Evaluación, mediciones y control de la durabilidad”. Recibe el mismo nombre y valora la realización de ensayos y mediciones relacionadas con la estimación del estado real de conservación de la estructura y del cálculo aproximado de su vida remanente, con el objetivo de tomar medidas correctoras en tiempo útil, evitando reparaciones de gran alcance o fallos prematuros. Es el indicador que menor peso tiene, sólo un 10%. En la Figura 12 se puede apreciar la función de valor para este indicador.

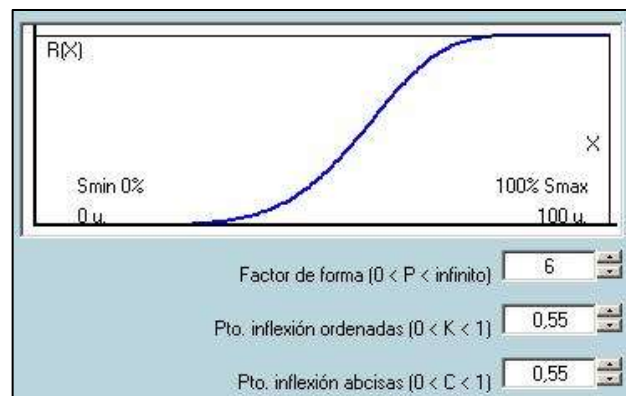


Figura 12. Función de valor para el indicador V6 (evaluación, mediciones y control de la durabilidad)

3. MODELO DE LA INSTRUCCIÓN ESPAÑOLA DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL (EHE 08)

La Instrucción Española del Hormigón Estructural (EHE 08) es el nombre que recibe la normativa española vigente sobre el cálculo y seguridad de estructuras de hormigón. Entró en vigor en el 2008 y es de obligado cumplimiento para todas las estructuras y elementos de hormigón en España.

El artículo 1 de esta normativa la define como “*el marco reglamentario por el que se establecen las exigencias que deben cumplir las estructuras de hormigón para satisfacer los requisitos de seguridad estructural y seguridad en caso de incendio, además de la protección del medio ambiente, proporcionando procedimientos que permiten demostrar su cumplimiento con suficientes garantías técnicas*”.

El capítulo VII, junto con el Anexo 9, es el que hemos utilizado para este estudio. Este capítulo se centra en la durabilidad, tanto del hormigón como de las armaduras; y el anexo proporciona las ecuaciones necesarias para la comprobación del Estado Límite de durabilidad. La EHE 08 define el Estado Límite de durabilidad como “*el fallo producido al no alcanzarse la vida útil de proyecto de la estructura, como consecuencia de que los procesos de degradación del hormigón o de las armaduras alcancen el grado suficiente como para que impidan que la estructura se comporte de acuerdo a las hipótesis con las que ha sido proyectada*”. Para su comprobación, se compara el valor estimado de la vida útil con el valor de cálculo. Esta norma, permite calcular el valor estimado de la vida útil para los procesos de corrosión.

El recubrimiento es un parámetro muy importante en los procesos de corrosión. Como ya hemos visto en la introducción, el recubrimiento es la protección física frente a la corrosión. La EHE 08 lo define como “*la distancia entre la superficie exterior de la armadura (incluyendo cercos y estribos) y la superficie del hormigón más cercana*”. El recubrimiento mínimo es aquel que debe garantizarse en cualquier punto de la armadura y el nominal corresponde a aquel que debe reflejarse en los planos.

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

Siendo:

- r_{nom} : el recubrimiento nominal
- r_{min} : el recubrimiento mínimo
- Δr : el margen de recubrimiento, en función del nivel de control de ejecución, y cuyo valor será:
 - 0 mm en elementos prefabricados con control intenso de ejecución
 - 5 mm en el caso de elementos ejecutados in situ con nivel intenso de control de ejecución
 - 10 mm en el resto de casos

En el capítulo 7, la EHE 08 recoge los recubrimientos mínimos en mm para todas las clases de exposición (Tablas 4 y 5):

Tabla 4. Recubrimientos mínimos (mm) para las clases generales de exposición I y II

Clase de exposición	Tipo de cemento	Resistencia característica del hormigón [N/mm ²]	Vida útil del proyecto (tg),(años)	
			50	100
I	Cualquiera	$f_{ck} \geq 25$	15	25
II a	CEM I	$25 \leq f_{ck} < 40$	15	25
		$f_{ck} \geq 40$	10	20
	Otros tipos de cementos o en el caso de empleo de adiciones al hormigón	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	30
		$f_{ck} \geq 40$	15	25
II b	CEM I	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	30
		$f_{ck} \geq 40$	15	25
	Otros tipos de cementos o en el caso de empleo de adiciones al hormigón	$25 \leq f_{ck} < 40$	25	35
		$f_{ck} \geq 40$	20	30

Tabla 5. Recubrimientos mínimos (mm) para las clases generales de exposición III y IV

Hormigón	Cemento	Vida útil del proyecto (tg),(años)	Clase general de exposición			
			IIIa	IIIb	IIIc	IV
Armado	CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D u hormigón con adición de microsilíce superior al 6% o de cenizas volátiles superiores al 20%	50	25	30	35	35
		100	30	35	40	40
	Resto de cementos utilizables	50	45	40	*	*
		100	65	*	*	*
Pretensado	CEM I	50	30	35	40	40
		100	35	40	45	45
	Otros tipos de cementos o en el caso de empleo de adiciones al hormigón	50	65	45	*	*
		100	*	*	*	*

* Estas situaciones obligarían a unos recubrimientos excesivos, desaconsejables desde el punto de vista de la ejecución del elemento. En estos casos, se recomienda comprobar el Estado Límite de Durabilidad según lo indicado en el Anejo nº 9, a partir de las características del hormigón prescrito en el Pliego de prescripciones técnicas del proyecto

Las clases de exposición II, III y IV corresponden a mecanismos de deterioro de la corrosión de las armaduras. Cuando el deterioro se debe a mecanismos distintos, se utilizarán los valores de la Tabla 6:

Tabla 6. Recubrimientos mínimos (mm) para las clases específicas de exposición

Clase de exposición	Tipo de cemento	Resistencia característica del hormigón [N/mm ²]	Vida útil del proyecto (tg),(años)	
			50	100
H	CEM III	$25 \leq f_{ck} < 40$	25	50
		$f_{ck} \geq 40$	15	25
	Otros tipos de cemento	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	35

		$f_{ck} \geq 40$	10	20
F	CEM I I/A-D	$25 \leq f_{ck} < 40$	25	50
		$f_{ck} \geq 40$	15	35
	CEM III	$25 \leq f_{ck} < 40$	40	75
		$f_{ck} \geq 40$	20	40
	Otros tipos de cementos o en el caso de empleo de adiciones al hormigón	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	40
		$f_{ck} \geq 40$	10	20
E ⁶	Cualquiera	$25 \leq f_{ck} < 40$	40	80
		$f_{ck} \geq 40$	20	35
Qa	CEM III, CEM IV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D u hormigón con adición de microsilice superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20%	-	40	55
	Resto de elementos utilizables	-	*	*
Qb, Qc	Cualquiera	-	7	
* Estas situaciones obligarían a unos recubrimientos excesivos				

Para el análisis de este modelo hemos realizado un libro electrónico (Excel) que, a través de un análisis paramétrico, permite el cálculo del valor de la vida útil. El fichero permite el estudio de la corrosión, tanto por carbonatación como por cloruros. El tiempo necesario para que el ataque o degradación sean significativos se le llama tiempo total (t_L) y se expresa como la suma de dos periodos, el período de iniciación (t_i) y el periodo de propagación (t_p). Se basa en el modelo de Tuutti.

$$t_L = t_i + t_p$$

El periodo de iniciación de la corrosión se divide a su vez en dos procesos de degradación: carbonatación y penetración por cloruros. Para el primero se usa el modelo de Hakkinen y para el segundo se usa una adaptación o variación de la 2ª ley de Fick.

El modelo de Hakkinen establece que el período de tiempo necesario para que se produzca la carbonatación a una distancia d respecto a la superficie del hormigón puede estimarse con la expresión:

$$t = \left(\frac{d}{K_c} \right)^2$$

Dónde:

- **d**: profundidad de carbonatación en mm
- **t**: tiempo en años
- **K_c**: coeficiente de carbonatación

En el anexo 2 de este proyecto, se encuentran todas las ecuaciones necesarias para el cálculo de ambos tiempos, así como las tablas utilizadas en el Excel.

Los dos primeros modelos estudiados utilizan el mismo tipo de clasificación de las clases de exposición (Tabla 7).

⁶ Estos valores corresponden a condiciones moderadamente duras de abrasión. En el caso de que se prevea una fuerte abrasión, será necesario realizar un estudio detallado.

⁷ El Autor del proyecto deberá fijar estos valores de recubrimiento mínimo y, en su caso, medidas adicionales, al objeto de que se garantice adecuadamente la protección del hormigón y de las armaduras frente a la agresión química concreta de que se trate.

Tabla 7. Clases de exposición relativas al hormigón estructural EHE 08

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN				DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Clase	Subclase	designación	Tipo de proceso		
No agresiva		I	Ninguno	Interiores de edificios, no sometidos a condensaciones Elementos de hormigón en masa	Elementos estructurales de edificios, incluido los forjados, que estén protegidos de la intemperie
Normal	Humedad alta	Ila	Corrosión de origen diferente de los cloruros	Interiores sometidos a humedades relativas medias altas (> 65%) o a condensaciones Exteriores en ausencia de cloruros, y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm Elementos enterrados o sumergidos	Elementos estructurales en sótanos no ventilados Cimentaciones Estribos, pilas y tableros de puentes en zonas, sin impermeabilizar con precipitación media anual superior a 600 mm Tableros de puentes impermeabilizados, en zonas con sales de deshielo y precipitación media anual superior a 600 mm Elementos de hormigón, que se encuentren a la intemperie o en las cubiertas de edificios en zonas con precipitación media anual superior a 600mm Forjados en cámara sanitaria, o en interiores en cocinas y baños, o en cubierta no protegida.
	Humedad media	IIb	Corrosión de origen diferente de los cloruros	Exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia, en zonas con precipitación media anual inferior a 600 mm	Elementos estructurales en construcciones exteriores protegidas de la lluvia Tableros y pilas de puentes, en zonas de precipitación media anual inferior a 600 mm
Marina	Aérea	IIIa	Corrosión por cloruros	Elementos de estructuras marinas, por encima del nivel de pleamar Elemento exteriores de estructuras situadas en las proximidades de la línea costera (a menos de 5 km)	Elementos estructurales de edificaciones en las proximidades de la costa Puentes en las proximidades de la costa Zonas aéreas de diques, pantalanés y otras obras de defensa litoral Instalaciones portuarias
	Sumergida	IIIb	Corrosión por	Elementos de estructuras	Zonas sumergidas de diques,

			cloruros	marinas sumergidas permanentemente, por debajo del nivel mínimo de bajamar	pantalanes y otras obras de defensa litoral Cimentaciones y zonas sumergidas de pilas de puentes en el mar
	En zonas de carrera de mareas y en zonas de salpicadura	IIIc	Corrosión por cloruros	Elementos de estructuras marinas situadas en la zona de salpicaduras o en zona de carrera de mareas	Zonas situadas en el recorrido de marea de diques, pantalanes y otras obras de defensa litoral Zonas de pilas de puentes sobre el mar, situadas en el recorrido de marea
Con cloruros de origen diferente del medio marino		IV	Corrosión por cloruros	Instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua que presente un contenido elevado de cloruros, no relacionados con el ambiente marino Superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas.	Piscinas e interiores de los edificios que las albergan Pilas de pasos superiores o pasarelas en zonas de nieve Estaciones de tratamiento de agua.
Química agresiva	débil	Qa	Ataque químico	Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad lenta (ver tabla 9)	Instalaciones industriales, con sustancias débilmente agresivas según tabla 9 Construcciones en proximidades de áreas industriales, con agresividad débil según tabla 9
	Media	Qb	Ataque químico	Elementos en contacto con agua de mar Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad media (ver tabla 9)	Dolos, bloques y otros elementos para diques - estructuras marinas, en general Instalaciones industriales con sustancias de agresividad media según 9 Construcciones en proximidades de áreas industriales, con agresividad media según tabla 9 Instalaciones de conducción y tratamiento de aguas residuales con sustancias de agresividad media según tabla 9
	Fuerte	Qc	Ataque químico	Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad rápida (ver tabla 9)	Instalaciones industriales, con sustancias de agresividad alta de acuerdo con tabla 9 Instalaciones de conducción y tratamiento de aguas residuales, con sustancias de agresividad alta de acuerdo con tabla 9

					Construcciones en proximidades de áreas industriales, con agresividad fuerte según tabla 9
Con heladas	Sin sales fundentes	H	Ataque hielo-deshielo	Elementos situados en contacto frecuente con agua, o zonas con humedad relativa media ambiental en invierno superior al 75%, y que tengan una probabilidad anual superior al 50% de alcanzar al menos una vez temperaturas por debajo de -5°C	Construcciones en zonas de alta montaña. Estaciones invernales
	Con sales fundentes	F	Ataque por sales fundentes	Elementos destinados al tráfico de vehículos o peatones en zonas con más de 5 nevadas anuales o con valor medio de la temperatura mínima en los meses de invierno inferior a 0°C	Tableros de puentes o pasarelas en zonas de alta montaña, en las que se utilizan sales fundentes.
Erosión		E	Abrasión cavitación	Elementos sometidos a desgaste superficial Elementos de estructuras hidráulicas en los que la cota piezométrica pueda descender por debajo de la presión de vapor del agua	Pilas de puente en cauces muy torrenciales Elementos de diques, pantalanés y otras obras de defensa litoral que se encuentren sometidos a fuertes oleajes Pavimentos de hormigón Tuberías de alta presión

El lector interesado puede encontrar más información sobre este modelo en la propia Instrucción EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008).

4. MODELO DEL BORRADOR DEL NUEVO CÓDIGO ESTRUCTURAL ESPAÑOL

El conocido como Código Estructural viene a derogar, si no se indica lo contrario, la actual EHE-08 o Instrucción del Hormigón Estructural y la vigente EAE o Instrucción de Acero Estructural. El borrador puede consultarse pues el Ministerio de Fomento ya lo publicó. A diferencia de la EHE, el futuro Código Estructural englobaría las estructuras de acero, de hormigón y mixtas.

Estructurado en 4 títulos, el único que nos interesa es el segundo: “*Título 2- Estructuras de Hormigón*”, pues es el correspondiente a nuestro tipo de nave industrial.

En el artículo 27 “*Criterios específicos para las estructuras de hormigón*” se hace una clasificación de las clases de exposición de los elementos de hormigón, actualizándose así las clases de exposición utilizadas por la EHE 08 y el modelo MIVES.

A los efectos de este Código, se definen como clases de exposición relativas al hormigón estructural las recogidas en la Tabla 8:

Tabla 8. Clases de exposición relativas al hormigón estructural Código Estructural

Designación de la clase	Descripción del entorno	Ejemplos informativos donde pueden existir las clases de exposición
1. Sin riesgo de ataque por corrosión		
X0	Para hormigón en masa: todas las exposiciones salvo donde haya ataque hielo/deshielo, abrasión o ataque químico. Para hormigón con armaduras en un ambiente muy seco.	Elementos de hormigón en masa Elementos de hormigón en interiores de edificios con una humedad muy baja. (HR<45%)
2. Corrosión inducida por carbonatación		
XC1	Seco o permanentemente húmedo.	Elementos de hormigón armado o pretensado dentro de recintos cerrados (tales como edificios), con humedad del aire baja. (HR<65%) Elementos de hormigón armado o pretensado permanentemente sumergido en agua no agresiva.
XC2	Húmedo, raramente seco.	Elementos de hormigón armado o pretensado permanentemente en contacto con agua o enterradas en suelos no agresivos (por ejemplo, cimentaciones).
XC3	Humedad moderada.	Elementos de hormigón armado o pretensado dentro de recintos cerrados (tales como edificios), con humedad media o alta. (HR>65%) Elementos de hormigón armado o pretensado en el exterior, protegidos de la lluvia.
XC4	Sequedad y humedad cíclicas.	Elementos de hormigón armado o pretensado en el exterior, expuestos al contacto con el agua, de forma no permanente (por ejemplo, la procedente de la lluvia)
3. Corrosión inducida por cloruros de origen no marino		

XD1	Humedad moderada.	Elementos de hormigón armado o pretensado en el exterior, expuestas a aerosoles con iones cloruro con origen no marino.
XD2	Húmedo, raramente seco.	Piscinas. Elementos de hormigón armado o pretensado expuestos a aguas industriales que contienen cloruros
XD3	Ciclos humedad y secado.	Elementos de puentes expuestos a salpicaduras de aguas con cloruros, situados a menos de 10 metros de distancia horizontal o a menos de 5 metros de distancia vertical de una zona de rodadura donde se usen sales de deshielo. Elementos enterrados a menos de 1 metro del borde de una zona de rodadura donde se usen sales de deshielo. Losas en aparcamientos
4. Corrosión inducida por cloruros de origen marino		
XS1	Expuestos a aerosoles marinos, pero no en contacto directo con el agua del mar.	Elementos estructurales de hormigón armado o pretensado sometidos a los aerosoles marinos, ubicados en la costa o cerca de la costa.
XS2	Permanentemente sumergida en agua de mar.	Elementos estructurales de hormigón armado o pretensado permanentemente sumergidos en agua marina.
XS3	Zonas de carrera de mareas afectadas por el oleaje o salpicaduras.	Elementos estructurales de hormigón armado o pretensado situados en zona de carrera de mareas, afectadas por el oleaje o salpicaduras.
5. Ataque hielo/deshielo		
XF1	Saturación moderada, sin sales fundentes.	Elementos con superficies verticales expuestas a lluvia y helada (tales como fachadas y pilares). Elementos con superficies horizontales no saturados, pero expuesto a lluvia y helada.
XF2	Saturación moderada, con sales fundentes.	Mismo tipo de elementos que en la clase XF1, pero expuestos a sales fundentes, bien directamente o bien a sus salpicaduras y/o escorrentía (por ejemplo dinteles, pilas, cargaderos, etc.)
XF3	Saturación alta, sin sales fundentes.	Elementos con superficies horizontales donde se pueda acumular el agua y estén expuestas a la helada.
XF4	Saturación alta con sales fundentes o agua del mar.	Elementos con superficies horizontales donde se pueda acumular el agua y estén expuestas a la helada y sales fundentes, bien directamente o bien a sus salpicaduras.
6. Ataque químico		
XA1	Ambiente de una débil agresividad química conforme a la Tabla 9	Terrenos naturales y aguas subterráneas.
XA2	Ambiente de una moderada agresividad química conforme a la Tabla 9	Terrenos naturales y aguas subterráneas.
XA3	Ambiente de una alta agresividad química conforme a la Tabla 9	Terrenos naturales y aguas subterráneas.
7. Erosión		
XM1	Elementos sometidos a erosión/abrasión moderada	Losas sometidas al tráfico de vehículos
XM2	Elementos sometidos a erosión/abrasión intensa	Losas en zonas industriales sometidas al tráfico de carretillas de horquillas con neumáticos.
XM3	Elementos sometidos a erosión/abrasión extrema	Losas en zonas industriales sometidas al tráfico de carretillas de horquillas con ruedas de acero o cadenas.

* El Autor del proyecto considerará que un elemento está expuesto a la helada cuando está ubicado en zonas con una humedad ambiental en invierno superior al 75% de humedad relativa y tenga una probabilidad anual superior al 50% de alcanzar al menos una vez temperaturas por debajo de -5°C.
 Asimismo, considerará que es probable el uso de sales fundentes cuando el elemento esté ubicado en zonas con más de 5 nevadas anuales o con un valor medio de la temperatura media en invierno inferior a 0°C.

En la tabla 9 se establece la clasificación de la agresividad química del nuevo Código Estructural, que coincide con la de la EHE 08:

Tabla 9. Clasificación de la agresividad química

Tipo de medio agresivo	Parámetros	Tipo de exposición		
		Qa	Qb	Qc
		Ataque débil	Ataque medio	Ataque fuerte
Agua	VALOR DEL pH, según UNE 83.952	6,5 - 5,5	5,5 - 4,5	< 4,5
	CO ₂ AGRESIVO (mg CO ₂ / l), según UNE-EN 13.577	15 – 40	40 - 100	> 100
	IÓN AMONIO (mg NH ₄ ⁺ / l), según UNE 83.954	15 – 30	30 - 60	> 60
	IÓN MAGNESIO (mg Mg ²⁺ / l), según UNE 83.955	300 – 1000	1000 - 3000	> 3000
	IÓN SULFATO (mg SO ₄ ²⁻ / l), según UNE 83.956	200 – 600	600 - 3000	> 3000
	RESIDUO SECO (mg / l), según UNE 83.957	75 - 150	50 - 75	< 50
Suelo	GRADO DE ACIDEZ BAUMANN-GULLY (ml/kg), según UNE 83.962	> 200	No se dan en la práctica	No se dan en la práctica
	IÓN SULFATO (mg SO ₄ ²⁻ / kg de suelo seco), según UNE 83.963	2000 - 3000	3000 - 12000	> 12000

Como se puede apreciar, el Código Estructural (CE) utiliza una clasificación de las clases de exposición distinta a la de la EHE 08. Tras analizar detenidamente ambas clasificaciones, se ha hecho un resumen que concluye que:

- La clase I (no agresiva) de la EHE 08 englobaría a la clase X0 del CE, pues se utilizaría para hormigón en masa y para hormigón con armaduras en un ambiente muy seco; y parte de la XC1 del CE (elementos de hormigón armado o pretensado en recintos cerrados con una humedad de aire baja, interiores no sometidos a condensaciones).
- Cuando tratamos las clases de exposición relacionadas con la carbonatación ya es más difícil establecer una concordancia pues la EHE 08 las clasifica en 2 grupos y el Código Estructural en 4. La clase XC4 del CE habla de “elementos de hormigón armado o pretensado en el exterior, expuestos al contacto con el agua de lluvia de forma no permanente” pero sin especificar la precipitación media anual, cosa que sí que hace la EHE 08.

- En cuanto a cloruros de origen no marino, las tres clases del Código Estructural podrían agruparse en la única clase IV de la EHE 08. Sin embargo, dependiendo de la cantidad de humedad que haya, la velocidad de corrosión varía en el primer modelo, manteniéndose constante en la normativa actual.
- Las tres clases de corrosión por cloruros de origen marino del futuro Código Estructural, XS1, XS2, XS3 se corresponden respectivamente con los ambientes IIIa, IIIb y IIIc. Como la clase de exposición en Ferrol es IIIa, si quisiéramos utilizar el otro tipo de clasificación, Ferrol estaría sometido a la clase XS1.
- Ocurriría lo mismo con las clases de exposición específicas debidas al ataque químico: Qa, Qb y Qc se corresponderían respectivamente con XA1, XA2 y XA3.
- La EHE 08 no especifica el tipo de erosión/abrasión.
- Finalmente, la EHE 08 y el Código Estructural distinguen entre heladas con y sin sales fundentes; sin embargo, la primera no diferencia entre elementos superficiales verticales y horizontales y el CE sí.

En lo que se refiere al cálculo del tiempo de vida, si comparamos las ecuaciones utilizadas por ambas normativas, observamos que son las mismas. Sin embargo, los resultados no lo serán pues al variar la clase de exposición los valores de las constantes también lo hacen.

El lector interesado puede encontrar más información sobre este modelo en el propio borrador del nuevo Código Estructural español (Ministerio de Fomento).

5. MODELO PROPUESTO POR JIMÉNEZ MONTOYA

Pedro Jiménez Montoya fue un doctor ingeniero de la construcción, autor de libro “Hormigón Armado”, obra de referencia en el cálculo de este tipo de estructuras. En su libro, Jiménez Montoya propone, al igual que la EHE 08 o el borrador del futuro Código Estructural, un modelo de durabilidad para los procesos de corrosión de armaduras.

Jiménez Montoya utiliza las clases de exposición del código FIB (*The International Federation for Structural Concrete*) que son las mismas que las del Código Estructural. Al igual que en los dos anteriores, Jiménez Montoya también utiliza el modelo de Tuutti para calcular la vida útil.

Este modelo está basado en el Código Modelo de la FIB 2010 y en la EHE 08, aunque presenta pequeñas variaciones. Utiliza una variación de las ecuaciones del primero para el cálculo de la corrosión por carbonatación, y las del segundo para el cálculo de la corrosión por penetración de cloruros y para el cálculo del período de propagación. Todos los parámetros utilizados posteriormente se encuentran en el Anexo 4 de este proyecto.

Para el estudio de la carbonatación, en vez de utilizar el modelo de Hakkinen, utiliza una función dependiente del tiempo y de las condiciones meteorológicas. Se diferencia del Código Modelo de la FIB 2010 en dos cosas:

- El Código Modelo añade más constantes
- El factor de viento “ p_{SR} ” en el modelo propuesto por Jiménez Montoya sólo puede valer 0 para interiores y 1 para exteriores.

$$t_{inic,desp} = \left(\frac{c}{k_{desp}} \right)^2$$

$$k_{ap,carb} = W(t) \cdot k_c$$

$$W(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} \cdot ToW)^{b_w}}{2}}$$

Al analizar detenidamente la ecuación, nos llama la atención la asignación que hacen del factor de viento, pues, una vez que se realiza el estudio, para elementos estructurales interiores el tiempo de vida es muy inferior que para elementos exteriores.

Si p_{SR} es 0, $W(t)$ es 1 (no depende de las condiciones meteorológicas) y por lo tanto $k_{ap,carb}$ es igual a k_c y el tiempo adquiere valores inferiores a 100 años. Sin embargo, cuando p_{SR} es 1, a medida que el tiempo avanza, $W(t)$ adquiere un valor cada vez más pequeño. De esta forma, $k_{ap,carb}$ disminuye y el tiempo de iniciación se dispara.

En la figura 13 se presentan los resultados obtenidos de una simulación en la cual se estudia la durabilidad de dos elementos estructurales frente a la carbonatación. Ambos presentan las mismas características (mismo tipo de cemento, misma relación agua/cemento etc.), salvo que en la simulación de la izquierda el elemento estructural se encuentra localizado en el exterior y el de la derecha se encuentra en el interior, protegido de la lluvia. Se observa, por tanto lo mencionado anteriormente, cuándo el factor de viento es 0 (interior) el resultado de la vida útil es mucho menor.

t_util	5872	t_util	35
t_inic	5847	t_inic	10
t_prop	25	t_prop	25
k_c	3,06736001	k_c	3,06736001
t_0	0,0767	t_0	0,0767
p_SR	1	p_SR	0
T_0W	0,273972603	T_0W	0,273972603
b_w	0,446	b_w	0,446
Urnias	100	Urnias	100
k_e	0,504426858	k_e	0,504426858
k_x	2,031807168	k_x	2,031807168
R-T_ACC,0	(m ² Da)/(kgm ³)	R-T_ACC,0	(m ² Da)/(kgm ³)
	1,34E-10		1,34E-10
RH_roof	80	RH_roof	80
hc	0	hc	0

Figura 133 Comparativa de la vida útil en función de p_{SR}

Jiménez Montoya no proporciona ninguna explicación al respecto, cosa que sí que hace el Código Modelo de la FIB.

Según el anexo B del boletín 34 de esta normativa, la función de clima $W(t)$ tiene en cuenta las condiciones meso-climáticas debidas a la humectación de la superficie del hormigón, de ahí que la lluvia juegue un papel primordial. Indica también que el efecto de los eventos de lluvia sobre el hormigón con respecto a su resistencia a la carbonatación depende de la orientación y de las características geométricas de la estructura.

- Define ToW cómo el número medio de días lluviosos por año. La información, en nuestro caso, fue obtenida de los datos proporcionados por MeteoGalicia.
- Define p_{SR} como la distribución media de la dirección del viento durante las lluvias. Distingue tres escenarios distintos:
 - $p_{SR} = 0$ en elementos interiores
 - $p_{SR} = 1$ en elementos exteriores horizontales
 - si se trata de elementos verticales, el p_{SR} debe evaluarse a partir de datos de la estación meteorológica

Finalmente, comentar que, aunque nuestros elementos estructurales sean internos, el factor de viento p_{SR} podría dejar de valer 0 para los pilares que se encuentran próximos a los portones de nuestra nave. Este problema podría ser solucionado aplicando la siguiente normativa (FIB) y adquiriendo los datos de la estación meteorológica.

El lector interesado puede encontrar más información sobre este modelo en la publicación de Arroyo Portero y otros (2018), aquí resumida.

6. CÓDIGO MODELO 2010 DE LA FIB (THE INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE)

El Código Modelo de la FIB utiliza modelos probabilísticos para el estudio de la corrosión inducida por carbonatación y por penetración de cloruros. En el Anexo B del boletín 34 “*Model Code for Service Life Design*” se encuentra la explicación de ambos modelos. El primero se basa en la primera ley de Fick y el segundo en la segunda ley de Fick.

En el Anexo C de este mismo boletín se encuentra una aproximación de carácter no probabilístico de la corrosión debido a la carbonatación, que se basa en el diseño probabilístico del anexo anterior. Una variante de esta aproximación es la utilizada por Jiménez Montoya.

En esta norma el factor de viento p_{SR} se denomina factor “tiempo” y puede variar entre el intervalo cerrado $[0,1]$. De esta forma, se soluciona el problema que nos habíamos encontrado anteriormente para definir la ubicación (interna o externa) de nuestros elementos estructurales, sobre todo de los pilares testers.

Aunque no vayamos a centrarnos en el modelo de penetración por cloruros, pues al ser de carácter probabilístico su desarrollo se complica, conviene mencionarlo ya que es el único que tiene en cuenta que la segunda ley no se puede aplicar en todo el intervalo del recubrimiento.⁸ Éste se basa en la ecuación del estado límite, en la que se compara la concentración crítica de cloruros C_{crit} con la concentración de cloruros a la profundidad a la que se encuentran las armaduras de acero a un tiempo t $C(x=a, t)$.

$$C_{crit} = C(x = a, t) = C_0 + (C_{s,\Delta x} - C_0) * \left[1 - erf\left(\frac{a - \Delta x}{2\sqrt{Dt}}\right) \right]$$

Siendo:

- C_{crit} : contenido crítico de cloruros
- $C(x,t)$: contenido de cloruros en el hormigón a una profundidad x y a un tiempo t
- C_0 : contenido inicial de cloruros
- $C_{s,\Delta x}$: Contenido de cloruros a una profundidad Δx y un tiempo t
- a : recubrimiento en mm
- Δx : profundidad de la zona de convección (capa de hormigón, hasta la cual el proceso de penetración de cloruro difiere de la 2ª ley de difusión de Fick) [mm]
- D : coeficiente de difusión en $mm^2/años$

⁸ A menudo, la superficie está expuesta a un cambio frecuente de humectación y posterior evaporación. Esta zona generalmente se conoce como la "zona de convección". Como los mecanismos de transporte en esta zona de convección no se controlan principalmente por difusión, el enfoque de la segunda ley de difusión de Fick no proporciona una aproximación satisfactoria para la penetración de cloruro dentro de la zona de convección. Para describir aún la penetración de cloruros para una carga intermitente utilizando la segunda ley de difusión de Fick, los datos de la zona de convección, que pueden desviarse considerablemente del comportamiento de difusión ideal, se descuidan y la segunda ley de difusión de Fick se aplica a partir de una profundidad Δx con una concentración superficial de $C_{s,\Delta x}$. Δx marca la profundidad de la zona de convección. Con esta simplificación, la segunda ley de difusión de Fick produce una buena aproximación de la distribución de cloruro a una profundidad $x \geq \Delta x$.

El lector interesado puede encontrar más información sobre este modelo en las publicaciones de la Fib que tratan sobre este asunto (*The International Federation for Structural Concrete*, 2006).

7. PUBLICACIÓN ACI 365.1R-00. 2ª LEY DE FICK

La publicación norteamericana americana *ACI 365.1R-00: "Service Life Prediction - State of the Art Report"*, realizada por el *American Concrete Institute (ACI)* presenta un estado del arte sobre la predicción de la vida útil de estructuras de hormigón y la relación entre ésta y la economía. Sin embargo, con respecto a los métodos de cálculo, la norma no ofrece ninguna tabla con valores reales que puedan servir para el análisis de una estructura, ni especifica el método que se debe utilizar; simplemente, resume el estado actual del arte, sin proponer modelo alguno de evaluación de la durabilidad.

A pesar de ello, en el apartado 4.3.1.1 de la norma, citando un trabajo de Browne de 1980, habla sobre el modelo de aproximación presentado por dicho autor. Dicho modelo solo tiene en cuenta el periodo de iniciación y, al contrario que el Código Modelo de la FIB, considera que la velocidad está controlada únicamente por la difusión de los iones cloruro en toda la superficie.

La ecuación utilizada es la segunda ley de Fick:

$$\frac{C_x - C_b}{C_s - C_b} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

ACI 365.1R-00 indica que, para Browne, la concentración de iones de cloruro de 0,4% de la masa de cemento es el valor límite. El tiempo necesario para alcanzar la concentración límite en la profundidad de la armadura da la vida útil.

Al no proporcionar valores del coeficiente de difusión ni de C_s , los tutores han decidido prescindir de esta publicación como fuente de modelo alguno que se pudiera incluir en el análisis comparativo aquí realizado.

8. ESTRUCTURA BASE PARA LA APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE DURABILIDAD

Para alcanzar el primer objetivo de este TFG, “Establecer un caso básico de estructura de hormigón armado, y posibles alternativas de diseño para la misma”, se ha proyectado la estructura base prefabricada de hormigón de una nave industrial de 30 m de luz y 45 m de longitud, con cubierta de panel sándwich metálico y fachadas de placas o paneles sándwich prefabricados de hormigón. A su vez, la estructura incluye correas de cubierta, vigas delta, y pilares, todo ello de hormigón prefabricado. Las cimentaciones son zapatas de hormigón armado ejecutadas in situ. En otros TFGs se usa software comercial, como CYPE, para realizar estos cálculos. Al no existir software comercial que realice los cálculos que eran necesarios para este TFG, se ha usado la herramienta informática del TFM del alumno D. Eloy Rey Gomis. Tras proyectar una estructura base, se han hecho modificaciones en la misma para analizar las consecuencias que dichas modificaciones tendrían sobre la durabilidad, teniendo en cuenta diferentes modelos de estimación de la misma.

Todas las estructuras están situadas en Ferrol, A Coruña (España). En el siguiente enlace se encuentra la aplicación proporcionada por el Ministerio de Fomento que permite saber la clase de exposición a la que está expuesto el ayuntamiento en el que está ubicada nuestra nave industrial. Además, proporciona información sobre la máxima relación a/c, el mínimo contenido de cemento, la resistencia mínima y el recubrimiento mínimo (en mm) característico de esta clase de exposición.

https://apps.fomento.gob.es/cea/pg_default.aspx?lang=es-ES

Para Ferrol, los datos proporcionados por el Ministerio son los siguientes:

Tabla 10. Clase de exposición ambiental y parámetros de dosificación para Ferrol.

Provincia	Municipio	Ambiente	Parámetro de dosificación						Parámetro de dosificación		
			Máxima relación a/c			Mínimo contenido en cemento (kg/m ³)			Resistencia mínima [N/mm ²]		
			Masa	Armado	Pretensado	Masa	Armado	Pretensado	Masa	Armado	Pretensado
A Coruña	Ferrol	Illa	-	0,50	0,45	-	300	300	-	30	30

Tabla 11. Recubrimiento mínimo (mm) para la Clase de exposición IIIa

Hormigón	Tipo de cemento	Vida útil de proyecto	
		50 años	100 años
Armado	CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D u hormigón con adición de microsílíce superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20%	25	30
	Resto de cementos utilizables	45	65
Pretensado	CEM II/a-D o bien con adición de humo de sílice	30	35

	superior al 6%		
	Resto de cementos utilizables, según el artículo 26º de la EHE 08	65	-
(*) Esta situación obligaría a unos recubrimientos excesivos, desaconsejables desde el punto de vista de la ejecución del elemento. En estos casos, se recomienda comprobar el Estado Límite de Durabilidad según lo indicado en el Anejo nº 9, a partir de las características del hormigón prescrito en el Pliego de prescripciones técnicas del proyecto.			

Para el resto de clases de exposición, se encontrará más información en la tablas del epígrafe 3 “Modelo de la Instrucción Española del Hormigón Estructural EHE 08” y en el anexo 2 de este proyecto.

Para el dimensionamiento de las estructuras se ha empleado el libro electrónico (Excel) creado por el alumno D. Eloy Rey Gomis. Como ya dijimos en la introducción, esta herramienta nos permite el dimensionamiento de la nave industrial sin la utilización del software comercial. Para todos los modelos, a excepción del MIVES, se calcularán un total de 4 estructuras: una estructura base, dos estructuras alternativas y una cuarta estructura final; en las que se modificaron distintos parámetros para ver cómo evoluciona su vida útil. Para el modelo MIVES únicamente se estudiaron la estructura base y la final.

De cada estructura se han analizado: las vigas, las correas, los pilares, los pilares testers, las zapatas y las zapatas de los pilares testers. Sin embargo, los dos primeros elementos son comunes a todas y sólo se evaluarán una vez, pues se trata de vigas y correas prefabricadas por las empresas PREFABRICADOS GILVA S.A. y PREFHOR S.L. Se podría modificar la longitud de la viga y el espesor de la cubierta, pero como no afectan a la vida útil ninguno de estos dos parámetros, se utilizan los mismos valores para todas. En el anexo final se encuentran las fichas técnicas correspondientes.

Como ya se ha mencionado antes, los modelos de durabilidad propuestos por la EHE 08, por Jiménez Montoya, por el Código Estructural y por el Código Modelo de la FIB se basan únicamente en los procesos de corrosión. En ellos, los parámetros que van a producir aumentos o disminuciones en la vida útil son: el tipo de cemento, la resistencia característica del hormigón, la clase de exposición a la que está sometido el elemento estructural, el diámetro de la armadura, la humedad, la temperatura media exterior, el tiempo de curado, la existencia de lluvias, la relación a/c, la localización del elemento (interno o externo) y la vida útil del proyecto. El modelo MIVES es más complejo y por ello se estudiará aparte.

8.1. Estructura base y diseño de la estructura

La estructura base es una nave rectangular de 45m de longitud por 30m de luz, construida con elementos de hormigón. Está compuesta por 10 pórticos separados entre sí 5m. La altura de los pilares es de 6,5m y la altura de la cumbre de las vigas de 8,6m. En la parte frontal y trasera, la nave tiene, además de los pilares del pórtico, 4 pilares intermedios separados entre sí por una distancia de 6m, y dos portones, uno en cada testero, en el centro de cada fachada. Las vigas testeras y los pilares extremos de los hastiales son iguales que los interiores debido a la posibilidad futura de ampliación de la nave (Figuras 14 y 15).

Al estar situada en el ayuntamiento de Ferrol, el exterior está sometido a la clase de exposición IIIa. Además, está diseñada para que la vida útil nominal sea de 50 años.

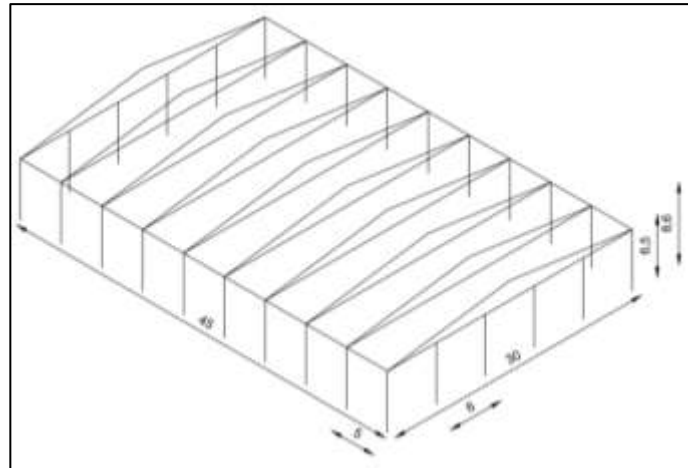


Figura 4. Estructura base

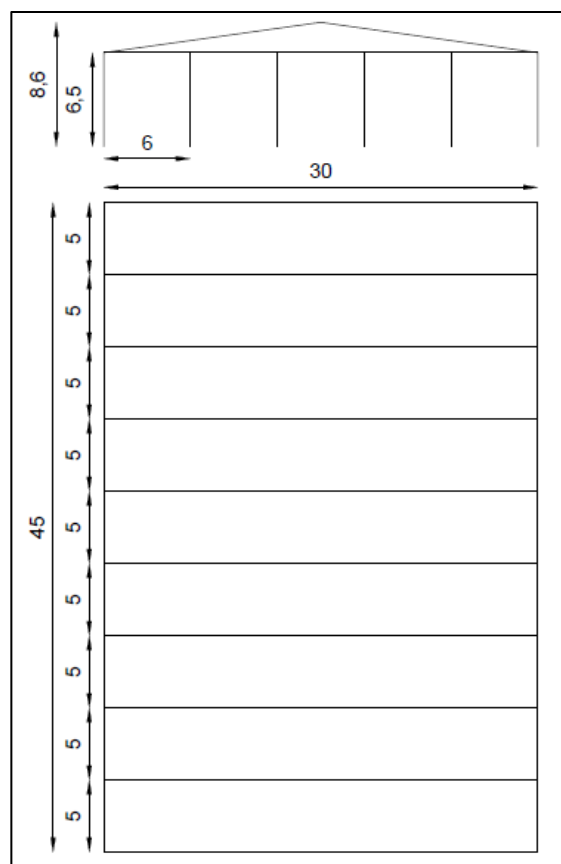


Figura 5. Planta y alzado de la estructura base

El segundo objetivo de este TFG es el de “aplicar diferentes modelos de evaluación de la durabilidad estructural a dicho caso y a sus alternativas”. A continuación, se realiza la evaluación de los elementos de la estructura con los diferentes modelos.

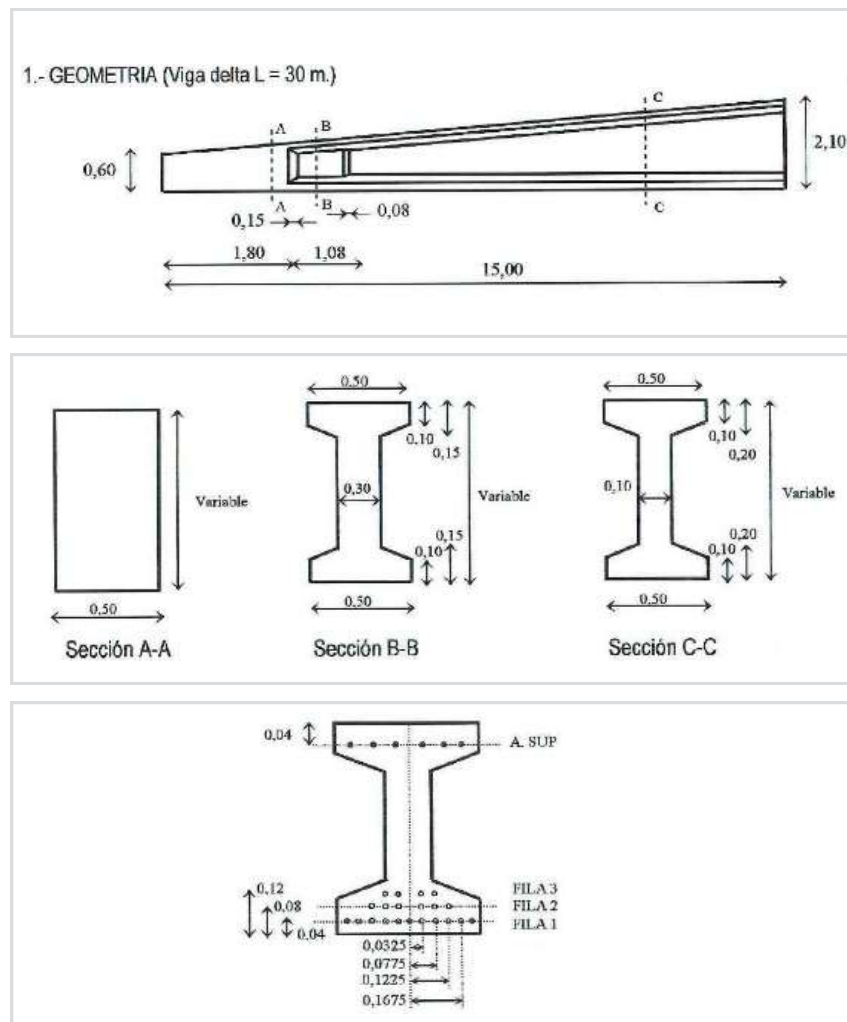
Para poder realizar una comparación completa de todos los modelos físico-matemático que se han consultado, se ha considerado una clase de exposición IIIa. Si la nave estuviese normalmente cerrada lo lógico sería considerar una clase de exposición IIa pero si se supone que la nave está casi siempre abierta (portones de los testeros), considerar una clase de exposición IIIa nos deja del lado de la seguridad. Aquí se ha considerado una clase IIIa debido a que, al margen de ser una posibilidad, en los modelos de durabilidad que se han empleado, en el proceso de degradación de la estructura, resulta clave el concurso de cloruros. Una clase IIa nos impediría analizar la

durabilidad de la estructura utilizando el modelo matemático completo de las diversas fuentes consultadas.

El modelo MIVES agrupa ambas clases descritas anteriormente en el grupo de “Agresividad química moderada”, permitiendo el análisis de la durabilidad con cualquiera de ellas. Cómo se va a analizar de manera independiente, en este caso sí que se supondrá que la nave pertenece a la clase de exposición IIa.

8.1.1. Vigas

Las vigas utilizadas son vigas delta prefabricadas por la empresa PREFABRICADOS GUILVA S.A., tienen una longitud de 30m y el tipo de armado es un T5 de las fichas del fabricante, incluidas como Anexo a este documento. Estas vigas son de hormigón pretensado y tienen un hormigón de resistencia característica de 40 MPa y un recubrimiento de 40 mm. La armadura de la viga está formada por tendones de acero de alta resistencia (armadura activa de barras de 12,7mm) a la que se aplica una fuerza de tensado controlada que produce una presolicitación del hormigón a compresión. Figuras 15 y 16.



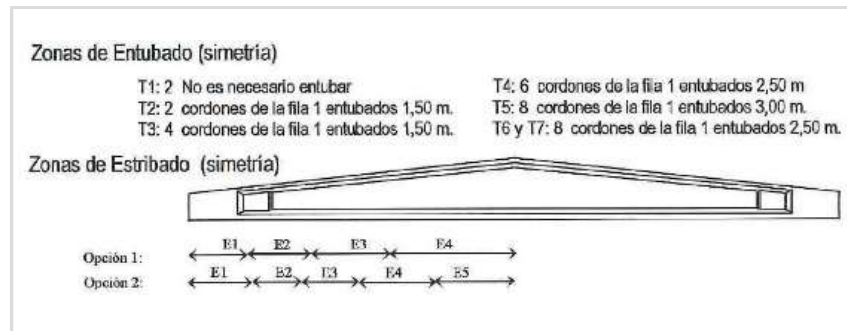


Figura 6. Geometría, corte, armaduras y estribado de la viga delta utilizada

8.1.2. Correas

Al igual que las vigas, las correas también son prefabricadas. En este caso, por la empresa PREFHOR.S.L. Éstas tienen una longitud de 5m, un hormigón de resistencia característica de 40 MPa y un recubrimiento de 20 mm. Son viguetas de hormigón pretensado tipo T-20 de dicho fabricante, con un armado T2 de las fichas del fabricante, incluidas como Anexo a este documento. El armado se realiza con barras de 5mm. Figura 17.

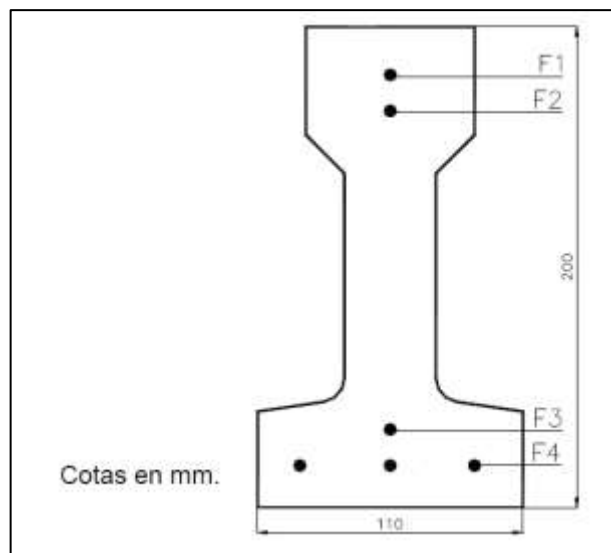


Figura 7. Vigueta prefabricada tipo T2

8.1.3. Pilares

Trataremos los pilares de los pórticos y los pilares intermedios de los testeros por separado, pues tienen parámetros diferentes. Ambos tienen las mismas dimensiones (6,5 x 0,5 x 0,5m) y son de hormigón armado, pero el armado es distinto. El armado en los pilares principales se realiza con barras de 20mm y en los pilares intermedios de los testeros con barras de 16mm. La resistencia característica del hormigón y el recubrimiento de las armaduras constan en la Tabla 12. En el apartado 8.2 “*Estudio de la durabilidad*” veremos las características de cada uno de los elementos estructurales.

8.1.4. Zapatas

Al igual que en los pilares, diferenciaremos dos tipos de zapatas: las zapatas intermedias de los pilares testeros y las de los pilares principales. Las primeras son más pequeñas (2,6 x 1,3 x 0,5 en vez de 3 x 2 x 0,6). Ambas son de hormigón armado ejecutado in situ. La resistencia característica del hormigón y el recubrimiento de las armaduras constan en la Tabla 12. La durabilidad de ambas se estudia de manera simultánea debido a que todas las zapatas poseen los mismos parámetros que influyen en la vida útil.

8.2. Estudio de la durabilidad de los elementos de la estructura

En este apartado se analiza la durabilidad de cada elemento estructural por separado y se comparan los diferentes modelos de durabilidad explicados anteriormente. Se estudia el modelo MIVES por separado, y en el modelo de la FIB únicamente se estudia el período de iniciación por carbonatación debido a que, como se ha mencionado anteriormente, la normativa no propone ningún modelo para el cálculo del período de propagación y, para el período de iniciación por cloruros el modelo que propone es demasiado complejo y no aporta los datos necesarios para su estudio

Todos los CEM I utilizados son cementos CEM I 52,5; el objetivo es conseguir hormigones de gran resistencia.

En la Tabla 12 se han resumido los parámetros de cada elemento que se pueden modificar para hacer el estudio de la durabilidad.

Tabla 12. Parámetros de cada elemento estructural

PARÁMETROS	CORREAS	VIGAS	ZAPATAS	ZAPATAS testeros	PILARES	PILARES testeros
Recubrimiento (mm)	20 ⁹	40	50	50	25	25
Tipo de cemento	CEM I	CEM I	CEM I	CEM I	CEM III/A	CEM III/A
Clase de exposición	IIIa	IIIa	IIIa	IIIa	IIIa	IIIa
Diámetro máximo de armaduras (mm) ¹⁰	5	12,7	16	16	20	16
F _{ck} (N/mm ²)	40	40	30	30	30	30
F _{yk} (MPa)	1636	1636	500	500	500	500
Tiempo de curado (días) ¹¹	7	7	7	7	7	7
a/c	0,40	0,40	0,45	0,45	0,40	0,40
Temperatura media (°C) ¹²	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5
HR(%)	81	81	81	81	81	81

⁹ Se midió directamente en el plano pues se encuentra a escala y no se encontraron datos sobre el recubrimiento en la ficha técnica.

¹⁰ Las armaduras pueden ser longitudinales o estribos. Como sólo influyen el período de propagación se utilizarán las de mayor diámetro, ya que cuanto mayor sea éste, menor será el período de propagación

¹¹ Se desconoce el tiempo de curado, así que se supone 7 días

¹² La información meteorológica ha sido sacada de la página de la Xunta de Galicia <https://www.meteogalicia.gal>.

Días de lluvia (días)	183	183	183	183	183	183
Interno/externo	Interno	Interno	Interno	Interno	Interno	Interno
Aire ocluido ¹³	1 (< 4,5%)	1 (< 4,5%)	1 (< 4,5%)	1 (< 4,5%)	1 (< 4,5%)	1 (< 4,5%)
Protegido de la lluvia	si	si	Si	Si	si	si
Vida útil nominal (años)	50	50	50	50	50	50
Vida útil del proyecto (1,1xVida útil nominal) (años)	55	55	55	55	55	55

8.2.1. Durabilidad de las correas

En la Tabla 13 se recogen los resultados de periodo de iniciación de la carbonatación, periodo de iniciación por cloruros, periodo de propagación, vida útil de servicio por carbonatación, vida útil de servicio por cloruros, y vida útil de la estructura (mínimo de los dos valores de vida útil anteriores), al aplicar los distintos modelos de durabilidad a las correas.

Tabla 13. Vida útil de las correas en función de cada modelo

	EHE 08	Jiménez Montoya	Código Estructural	Modelo FIB
Período de iniciación (carbonatación) (años)	64,23	340	64.23	106
Período de iniciación (cloruros) (años)	299	153	153	
Período de propagación(años) ¹⁴	16	16 ¹⁵	16	
Vida útil de servicio (años) (carbonatación)	80,23	356	80,23	
Vida útil de servicio (años) (cloruros)	315	169	169	
Vida útil de servicio (años) (mínimo)	80,23	169	80,23	

¹³ Al igual que pasa con el tiempo de curado, desconocemos datos sobre el % de aire ocluido que se ha introducido en el hormigón.

¹⁴ El período de propagación es el mismo en todos los elementos estructurales si se estudian para una clase de exposición IIIa. Esto se debe a que la ecuación utilizada en todos los modelos es la misma, al igual que la velocidad de corrosión.

¹⁵ En el período de propagación, Jiménez Montoya no especifica una velocidad de corrosión para las clases de exposición, si no que deja escoger entre el intervalo [4,50] µm/año. Al no especificar la velocidad, utilizaremos el valor de 20µm/año, por ser el utilizado por la EHE 08 y por el Código Estructural.

8.2.2. Durabilidad de las vigas

En la Tabla 14 se recogen los resultados de periodo de iniciación de la carbonatación, periodo de iniciación por cloruros, periodo de propagación, vida útil de servicio por carbonatación, vida útil de servicio por cloruros, y vida útil de la estructura (mínimo de los dos valores de vida útil anteriores), al aplicar los distintos modelos de durabilidad a las vigas.

Tabla 14. Vida útil de las vigas en función de cada modelo

	EHE 08	Jiménez Montoya	Código Estructural	Modelo FIB
Período de iniciación (carbonatación) (años)	256,92	1363	256,92	427
Período de iniciación (cloruros) (años)	4784	2453	2453	
Período de propagación(años)	12,60			
Vida útil de servicio (años) (carbonatación)	269,52	1375,60	269,52	
Vida útil de servicio (años) (cloruros)	4796,60	2465,60	2465,60	
Vida útil de servicio (años) (mínimo)	29,52	1375,60	269,52	

8.2.3. Durabilidad de las zapatas

De acuerdo con la normativa vigente, en las zapatas debe considerarse una clase de exposición IIa. Por otro lado una zapata puede estar apoyada en terreno con cloruros, en cuyo caso la clase de exposición sería la IIIa. Como ya se ha dicho con anterioridad, y al igual que en el resto de la estructura, aquí se ha considerado una clase IIIa debido a que, al margen de ser una posibilidad, en los modelos de durabilidad que se han empleado, en el proceso de degradación de la estructura resulta clave el concurso de cloruros. Una clase IIa nos impediría analizar la durabilidad de la estructura utilizando el modelo físico-matemático completo de las diversas fuentes consultadas.

En la Tabla 15 se recogen los resultados de periodo de iniciación de la carbonatación, periodo de iniciación por cloruros, periodo de propagación, vida útil de servicio por carbonatación, vida útil de servicio por cloruros, y vida útil de la estructura (mínimo de los dos valores de vida útil anteriores), al aplicar los distintos modelos de durabilidad a las zapatas.

Tabla 15. Vida útil de las zapatas en función de cada modelo

	EHE 08	Jiménez Montoya	Código Estructural	Modelo FIB
Período de iniciación (carbonatación) (años)	725,64	1385	2015,66	423
Período de iniciación (cloruros) (años)	2769	1756	1756	
Período de propagación(años)	12,5			
Vida útil de servicio (años) (carbonatación)	738,14	1397,5	2028,16	

Vida útil de servicio (años) (cloruros)	2781,5	1768,5	1768,5	
Vida útil de servicio (años) (mínimo)	738,14	1397,5	1768,5	

8.2.4. Durabilidad de los pilares principales

En la Tabla 16 se recogen los resultados de periodo de iniciación de la carbonatación, periodo de iniciación por cloruros, periodo de propagación, vida útil de servicio por carbonatación, vida útil de servicio por cloruros, y vida útil de la estructura (mínimo de los dos valores de vida útil anteriores), al aplicar los distintos modelos de durabilidad a los pilares.

Tabla 16. Vida útil de los pilares principales en función de cada modelo

	EHE 08	Jiménez Montoya	Código Estructural	Modelo FIB
Período de iniciación (carbonatación) (años)	29,84	228	45,35	68 ¹⁶
Período de iniciación (cloruros) (años)	45777	21405	21405	
Período de propagación(años)	5			
Vida útil de servicio (años) (carbonatación)	34,84	233	50,35	
Vida útil de servicio (años) (cloruros)	45782	21410	21410	
Vida útil de servicio (años) (mínimo)	34,84	233	50,35	

8.2.5. Durabilidad de los pilares intermedios de los testeros

En la Tabla 17 se recogen los resultados de periodo de iniciación de la carbonatación, periodo de iniciación por cloruros, periodo de propagación, vida útil de servicio por carbonatación, vida útil de servicio por cloruros, y vida útil de la estructura (mínimo de los dos valores de vida útil anteriores), al aplicar los distintos modelos de durabilidad a los pilares intermedios de los testeros.

Tabla 17. Vida útil de los pilares intermedios de los testeros en función de cada modelo

	EHE 08	Jiménez Montoya	Código Estructural	Modelo FIB
Período de iniciación (carbonatación) (años)	29,84	228	45,35	68
Período de iniciación (cloruros) (años)	45777	21405	21405	
Período de propagación(años)	6,25			
Vida útil de servicio (años) (carbonatación)	36,09	234,25	51,60	
Vida útil de servicio (años) (cloruros)	45783,25	21411,25	21411,25	

¹⁶ Se podría utilizar un factor de viento diferente a 0 y 1, sin embargo utilizaremos el mismo que en el modelo de Jiménez Montoya al no tener datos de la estación meteorológica. Además, de esta forma se pueden comparar más fácilmente ambos modelos.

Vida útil de servicio (años) (mínimo)	36,09	234,25	51,60	
------------------------------------------	-------	--------	-------	--

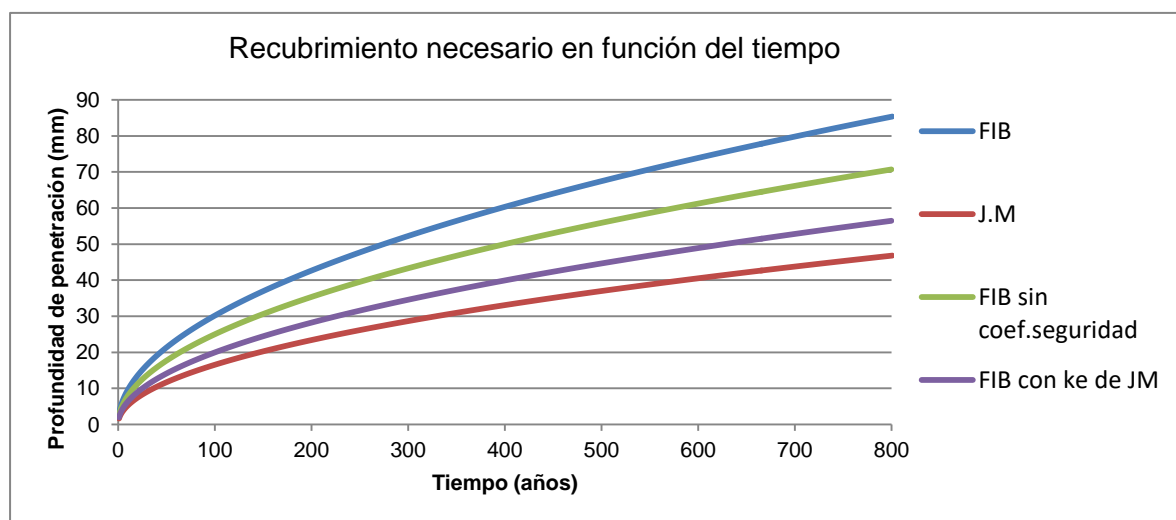
8.3. Estudio comparativo de aspectos clave de la durabilidad de los elementos de la estructura, según los distintos modelos de carbonatación y corrosión

Una vez terminada la simulación y calculados los años de vida útil de cada elemento estructural se puede comparar, de manera muy simple, los diferentes modelos.

En la carbonatación, la EHE 08 y el Código Estructural comparten ecuación. Sin embargo, se encuentran resultados distintos en las zapatas y en los pilares debido a que en las primeras se varía el coeficiente de ambiente (La EHE 08 únicamente diferencia entre elementos protegidos y no protegidos de la lluvia, mientras que el Código Estructural añade valores para aquellos que están enterrados), y en los segundos porque el Código Estructural no tiene en cuenta los cementos Portland con 65% escorias. De esta forma, para el primer caso es el Código Estructural el que podría dar un valor más preciso, siendo la EHE 08 la normativa que lo daría en el segundo.

El modelo propuesto por Jiménez Montoya y por el Código Modelo de la FIB coinciden en la base de la ecuación para hallar la vida útil en el período de iniciación por carbonatación. Sin embargo, el segundo añade una serie de parámetros que la vuelven más restrictiva: añade un coeficiente de seguridad del valor de 1,5, utiliza una ecuación más coactiva para el factor ambiental y permite la variación del parámetro “ p_{SR} ”.

En las Gráficas 1 y 2 veremos la acción de los distintos parámetros de la FIB. Utilizaremos el ejemplo de los pilares, pero podría realizarse en cualquier otro elemento.



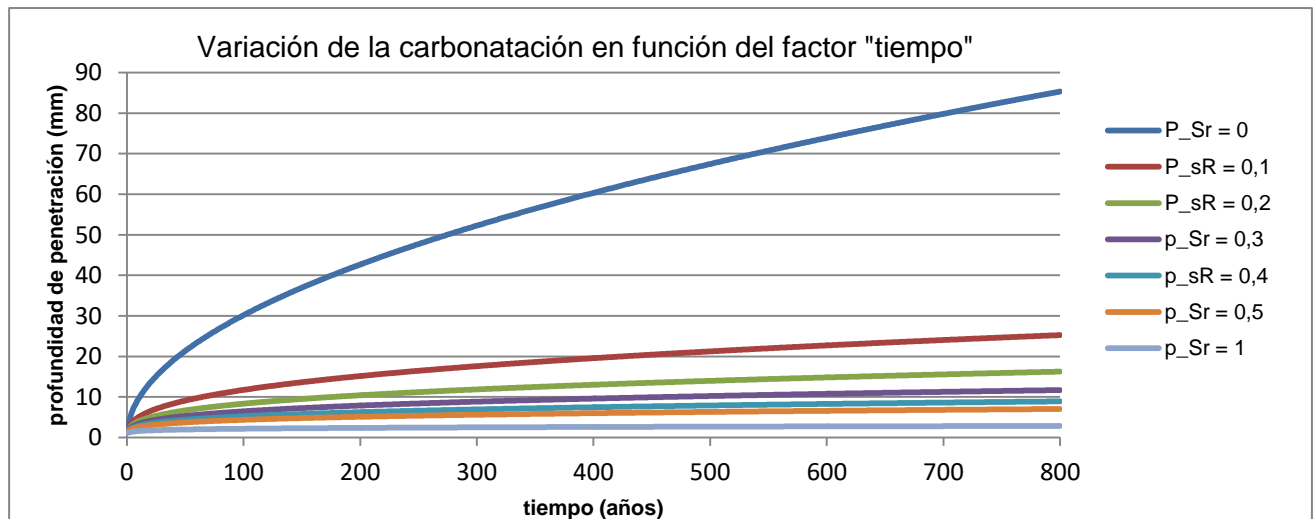
Gráfica 1. Comparación de las ecuaciones utilizadas por Jiménez Montoya y el Código Modelo de la FIB en la corrosión por carbonatación en pilares.

En la Gráfica 1 se observa como la FIB utiliza un modelo más restrictivo que el propuesto por Jiménez Montoya: a la edad de 800 años, la profundidad de penetración provocada por la carbonatación es casi el doble en el primer modelo.

También se observa que el efecto producido por el factor ambiental del modelo FIB es mayor que aquel provocado por el coeficiente de seguridad.

En la Gráfica 2 se realiza el mismo esquema para ver el efecto del factor “tiempo”:

- En el caso de Jiménez Montoya, al dejar escoger sólo entre dos valores, la diferencia es enorme. Con un “ p_{sR} ” igual a 1, la profundidad de penetración apenas varía con el tiempo. Sin embargo, como se ve en la gráfica 1, a los 800 años, la profundidad de penetración no llega a los 50mm.
- En el caso del modelo FIB, vemos cómo al pasar de 0 a 0,1, el cambio ya es importante. Como no tenemos datos de la distribución del viento, aumentaremos el coeficiente de 0 a 0,5 para ver su evolución. Gráfica 2.



Gráfica 2. Comparación del efecto del factor “tiempo” en el modelo de la FIB

Esta gran variación en la vida útil se debe a que cuando el factor “tiempo” es distinto de 0, la función de clima “ $W(t)$ ” deja de ser constante y pasa a depender de los días de lluvia y del tiempo. A medida que avanzan los años su valor disminuye, de tal forma que la velocidad de penetración también lo hace.

La EHE 08, al igual que el Código Estructural, también tiene en cuenta el efecto de la lluvia, aunque la diferencia entre estar protegido o expuesto a ella, es mucho menor que en las normativas que acabamos de explicar. Por poner un ejemplo, si el pilar se encontrara en el exterior, c_{env} sería 0,5 y el período de iniciación de 119,35 en vez de 29,84 años.

El tiempo de curado también afecta, obteniéndose una durabilidad mayor cuanto más elevado es el valor de éste. Lo mismo ocurre con la resistencia característica, la cual sólo se tiene en cuenta en las dos normativas españolas. Ambos parámetros sólo influyen en la carbonatación.

La elección del cemento es un parámetro muy importante. Por ejemplo, el CEM III, que se utiliza en ambientes agresivos en los que el agua juega un papel principal, es el que hemos utilizado en los pilares. Observamos que al tratarse de un cemento con poca permeabilidad, la vida útil en lo que se refiere a la penetración por cloruros aumenta y disminuye el período de iniciación de la carbonatación, hay menos poros obstruidos por agua y el CO_2 avanza con mayor rapidez.

Si uno se fija en el recubrimiento, se puede observar que el tiempo en el que se alcanza la armadura, aumenta con el cuadrado del recubrimiento: un recubrimiento doble se traduce en un periodo de protección cuatro veces mayor.

8.4. Estudio de la durabilidad de los elementos de la estructura desde el punto de vista del modelo MIVES

El modelo MIVES es un modelo complementario a los anteriores. En este apartado se calculará el Índice de Extensión de la Vida Útil (IEVU).

En el primer anexo a este documento se encuentran todas las tablas necesarias para el cálculo de los pesos de los 6 indicadores. Una vez obtenidos los pesos, con la ayuda de la función de valor de cada indicador, se calcula el valor asociado a dicho indicador. La función de valor permite la conversión de todas las unidades utilizadas a una unidad común. Finalmente, el IEVU se obtiene como la suma ponderada de los valores de los indicadores.

Al igual que en el resto de los modelos, se ha creado un libro electrónico para el cálculo de la durabilidad. El propio modelo tiene en cuenta el porcentaje de hormigón sometido a cada clase de exposición, y a menos que se diga lo contrario se supone que la clase de exposición a la que está sometida la estructura es IIa. A diferencia de los otros modelos, en este sí que se podría usar únicamente esta clase de exposición.

Las Tablas 18, 19, 20, 21, 22 y 23 han generadas mediante el uso de dicho libro. Cada una de ellas se corresponde con un indicador de durabilidad.

La Tabla 18 se corresponde con el primer indicador, de “soluciones de diseño”. Éste es el único indicador que forma parte del requerimiento “Concepción orientada a la durabilidad”, y depende de las decisiones tomadas por el proyectista en la fase de redacción del mismo, que constan en la Tabla 18. Si el proyectista tiene en cuenta los aspectos definidos en la tabla, obtener la puntuación máxima es sencillo. El alumno ha considerado que el proyectista ha valorado todos estos aspectos y por eso le otorga el valor máximo. Este requerimiento es común a todos los elementos estructurales.

Las Tablas 19, 20, 21 y 22 pertenecen al requerimiento “Durabilidad de los materiales”. En este requerimiento se encuentran todos los aspectos técnicos del hormigón que están directamente relacionados con la resistencia a los ataques. Este requerimiento, al tener en cuenta las propiedades del hormigón, ya no se puede suponer común a todos los elementos estructurales.

La Tabla 19 se corresponde con el segundo indicador “dosificación del hormigón”. La dosificación será estudiada posteriormente en el análisis de las estructuras alternativas. El modelo MIVES premia relaciones agua/cemento bajas con contenidos de cemento equivalente superiores al mínimo indicado por la EHE 08 para el caso de aplicación. En nuestra nave industrial se cumplen ambos aspectos. También tiene en cuenta la utilización de cementos con adiciones y el empleo de aditivos que lo protejan de los ataques. En este caso se supone que no se añade ningún aditivo. En la tabla se puede observar que la relación agua/cemento tiene más relevancia en hormigones pretensados que en hormigones armados. Siendo aún menor la relación a/c de las vigas y correas, éstas tienen menor puntuación que las cimentaciones al ser de hormigón pretensado. Alguno de los aspectos valorados en el indicador, y que en este caso no obtienen puntuación, son el empleo de aditivos inhibidores de corrosión y superplastificantes. En realidad, para saber si en la dosificación del hormigón procedente de central están presentes estos aditivos habría que consultarlo al proveedor. En el primer caso es posible que no sea frecuente y hubiese que pedir explícitamente su inclusión.

El indicador “ejecución de la estructura” se resume en la Tabla 20 y trata, entre otros aspectos, el recubrimiento y el tiempo de curado. Las vigas y las zapatas, al tener más de un 60 % del recubrimiento mínimo, no puntuarían. En su tesis, Mel (2017) explica el motivo: “El incremento excesivo de los recubrimientos puede ser contraproducente desde el punto de vista económico y ambiental, por lo que este aspecto se valora por medio de una función triangular que otorga la puntuación máxima a un incremento del

30% sobre el recubrimiento indicado en la EHE". Las correas, en cambio, obtendrían casi el valor máximo. En este indicador existen varios aspectos relacionados con incluir en proyecto indicaciones relativas a encofrados, curado y apertura máxima de fisura. El aspecto 8 de la Tabla 20 no se valora en esta estructura y se considera nulos. Si se utilizan elementos prefabricados, la durabilidad aumenta debido que en la fábrica se ejerce un mayor control que in situ. Finalmente, en este indicador se observa muy bien el efecto de la función de valor: al no conseguir un peso elevado, el valor final es nulo.

El cuarto indicador "protección superficial del hormigón" se resume en la Tabla 21. Al igual que en el indicador 1, todos los elementos estructurales pueden estudiarse de forma conjunta. De esta forma, todos tienen la misma puntuación. En este indicador se valora la adopción de sistemas de protección superficial del hormigón, que disminuyan la penetración de humedad y la de agentes agresivos. En este caso se ha supuesto que no se ha aplicado protección alguna, que es lo normal en estructuras de naves industriales que no tengan problemas especiales (como pueda ser su uso para almacenaje de productos especialmente agresivos con la estructura).

En el último indicador de este requerimiento, "protección de las armaduras", únicamente se diferenciará entre elementos estructurales de hormigón armado y elementos estructurales de hormigón pretensado. Se resume en la Tabla 22. No se aplicará ninguna protección especial.

Finalmente, lo relativo al indicador 6 se resume en la Tabla 23, "evaluación, mediciones y control de la durabilidad", es el único que pertenece al tercer requerimiento con el cual comparte nombre. En él se obtendrá la puntuación máxima, y al igual que en el primer indicador, el resultado es común a todos los elementos estructurales.

Si analizamos los coeficientes de ponderación, podemos observar que el indicador 1 es el que mayor peso tiene, de acuerdo con opiniones vertidas por Calavera (1999). Ordenándolos de mayor a menor sería: V1 (30%), V2 (18%), V5 (18%), V3 (12%), V4 (12%) e V6 (10%). El resto de modelos de evaluación se centran sobre todo en los indicadores 2 y 3, dejando así un 70% de la durabilidad sin estudiar.

Tabla 18. Indicador V1. Soluciones de diseño

Aspectos a valorar	INDICADOR V1: Concepción orientada a la durabilidad	
	Agresividad moderada / alta (IIa, IIIa, IIIb, IIIc, IV / cualquier clase específica)	
El proyecto identifica los puntos de la estructura más propensos a la acumulación de agua, polvo y otros materiales que perjudican la durabilidad, e incluye medidas para evitar los riesgos derivados (drenajes, goterones, sistemas autolavantes, etc.) y la obra se ejecuta de acuerdo a ello.	$\lambda_{11}^V = 30$	30
El proyecto identifica zonas de riesgo de aparición de fisuras por contracción / retracción (elevada relación superficie / volumen, cambios bruscos de sección, unión de elementos de muy diferente rigidez, etc.) e incluye medidas correctoras (juntas, etc.) y la obra se ejecuta de acuerdo a ello.	$\lambda_{12}^V = 30$	30
El proyecto incluye la verificación de que no existen materiales incompatibles (pares galvánicos) en ningún punto de la estructura y la obra se ejecuta de acuerdo a ello.	$\lambda_{13}^V = 20$	20
Durante la fase de diseño se ha tenido en cuenta la temperatura media anual a la hora de considerar los factores que afectan a la durabilidad.	$\lambda_{14}^V = 10$	10
Durante la fase de diseño se ha dispuesto de información relativa a la naturaleza y concentración de agentes agresivos presentes en el medio (análisis de aguas, procesos industriales, estudios de suelos, etc.).	$\lambda_{15}^V = 10$	10
	TOTAL	100

Tabla 19. Indicador V2. Dosificación del hormigón

Aspectos evaluables		INDICADOR V2: Dosificación del hormigón				
		Agresividad moderada (IIa, IIIa, IIIb, IV / las anteriores + Qa, Qb)				
		Elemento estructural	Correas	Vigas	Zapatatas	Pilares
Se utiliza una relación a/c inferior a la máxima indicada por la EHE-08 para el caso de aplicación	a/c inferior a a/c_{max} hasta en un 5%	$\lambda^V_{21}=15$ (HM)	-	-	-	-
		$\lambda^V_{21}=10$ (HA, HP)	10	10	-	-
	a/c inferior a a/c_{max} en más del 5%	$\lambda^V_{21}=30$ (HM)	-	-	-	-
		$\lambda^V_{21}=20$ (HA, HP)	-	-	20	20
Se utiliza un contenido en cemento equivalente superior al mínimo indicado por la EHE-08 para el caso de aplicación	Se supera el cont. mínimo hasta en un 10%	$\lambda^V_{22}=15$ (HM)	-	-	-	-
		$\lambda^V_{22}=10$ (HA, HP)	-	-	-	-
	Se supera el cont. mínimo en más de un 10%	$\lambda^V_{22}=30$ (HM)	-	-	-	-
		$\lambda^V_{22}=20$ (HA, HP)	20	20	20	20
Se emplean cementos con adiciones, según RC-16	CEM II, III, IV, V / A	$\lambda^V_{23}=20$ (HM)	-	-	-	-
		$\lambda^V_{23}=15$ (HA)	-	-	-	15
		$\lambda^V_{23}=30$ (HP)	-	-	-	-
	CEM II, III, IV, V / B	$\lambda^V_{23}=35$ (HM)	-	-	-	-
		$\lambda^V_{23}=30$ (HA)	-	-	-	-
		- (HP)	-	-	-	-
Se emplean adiciones al hormigón recogidas en RC-16 (cenizas volantes, humo de sílice), existiendo ensayos de dosificación positivos para la combinación.	La adición supone hasta un 15% en peso del material cementante	$\lambda^V_{24}=20$ (HM)	-	-	-	-
		$\lambda^V_{24}=15$ (HA, HP)	-	-	-	-
	La adición supone más de un 15% en peso del material cementante	$\lambda^V_{24}=35$ (HM)	-	-	-	-
		$\lambda^V_{24}=30$ (HA, HP)	-	-	-	-
Se añade a la dosificación del hormigón un aditivo inhibidor de la corrosión.		$\lambda^V_{25}=20$ (HA, HP)	-	-	-	-
		- (HM)	-	-	-	-
Se añaden polímeros a la dosificación del hormigón, bien en forma de fibras, bien como sustitutivo del cemento (resinas epoxídicas).		$\lambda^V_{26}=10$ (HM)	-	-	-	-
		$\lambda^V_{26}=5$ (HA, HP)	-	-	-	-
Se añaden aditivos superplastificantes a la dosificación del hormigón.		$\lambda^V_{27}=10$ (HM)	-	-	-	-
		$\lambda^V_{27}=5$ (HA, HP)	-	-	-	-
TOTAL			30	30	40	55

Tabla 20. Indicador V3. Ejecución de la estructura

Aspectos a valorar		INDICADOR V3: Ejecución de la estructura				
		Agresividad moderada (IIa, IIIa, IIIb, IV / cualquiera de las anteriores +Qa, Qb, H)				
		Elemento estructural	Correas	Vigas	Zapatatas	Pilares
Duración del periodo de curado controlado del hormigón (% sobre el tiempo necesario para alcanzar f_{ck})		$\lambda_{31}^V = 70 \cdot (\%t_c/100)$	$70 \cdot (7/28) = 17,5$	$70 \cdot (7/28) = 17,5$	$70 \cdot (7/28) = 17,5$	$70 \cdot (7/28) = 17,5$
Inclusión en el proyecto de especificaciones relativas a los tiempos y procedimientos de curado, en función de los elementos de obra.		$\lambda_{32}^V = 5$	5	5	5	5
Empleo de sistemas de ejecución avanzados (curado de alta eficiencia o al vapor, encofrados de permeabilidad controlada, control del curado en tiempo real mediante ensayos eléctricos, etc.)		$\lambda_{33}^V = 10$	-	-	-	-
Recubrimientos superiores a los mínimos indicados en EHE-08	Incremento de hasta un 30%	$\lambda_{34}^V = 33.3 \cdot (\Delta R/R_{EHE})$	-	-	-	-
	Incremento entre el 30% y el 60%	$\lambda_{34}^V = 40 - 133.3 \cdot (\Delta R/R_{EHE})$	8.88	-	-	5,54
Adopción de un nivel de control intenso.		$\lambda_{35}^V = 15$	15	15	15	15
Se fija una apertura máxima de fisura inferior a la indicada en EHE-08.		$\lambda_{36}^V = 5$	5	5	5	5
Se incluyen en el proyecto indicaciones relativas a los encofrados y al tiempo de desencofrado, en función de los elementos de obra.		$\lambda_{37}^V = 5$	5	5	5	5
Se incluyen en el proyecto indicaciones relativas al vertido y compactación del hormigón (conveniencia del bombeo, tipo y tamaño adecuados de vibrador, etc), en función de los elementos de obra.		$\lambda_{38}^V = 5$	-	-	-	-
Porcentaje de hormigón prefabricado sobre el total de la estructura.		$\lambda_{39}^V = 20 \cdot (M_{pref} / M_{tot})$	$20 \cdot 0.25 = 5$	$20 \cdot 0.25 = 5$	$20 \cdot 0.25 = 5$	$20 \cdot 0.25 = 5$
TOTAL			61,38	52,5	52,5	58,04

Tabla 21. Indicador V4. Protección superficial del hormigón

Aspectos a valorar	INDICADOR V4: Protección superficial del hormigón	
	Agresividad de origen químico (IIa, IIIa, IIIb, IIIc, IV / cualquier clase general +Qa, Qb, Qc, F)	
No se adopta ninguna medida especial de protección superficial.	-	-
Se aplica una protección superficial de eficacia media (acrílica, caucho clorado, emulsión polimérica, etc.).	$\lambda V42 = 30$	-
Se aplica una protección superficial de eficacia elevada (resina epoxi, poliuretano, etc.).	$\lambda V43 = 50$	-
Se aplica superficialmente un inhibidor de corrosión migratorio.	$\lambda V44 = 30$	-
Se emplea una protección pesada frente a acciones mecánicas (asfalto, vidrio, gres, goma, acero, etc.).	-	-
Se adoptan medidas para garantizar un incremento de la dureza superficial del hormigón, certificable mediante ensayos.	-	-
El Plan de Mantenimiento de la estructura incluye indicaciones relativas a la vida esperada de las protecciones superficiales y sus intervalos de renovación.	$\lambda V47 = 20$	-
TOTAL		0

Tabla 22. Indicador V5. Protección de las armaduras

Aspectos a valorar	INDICADOR V5: Protección de las armaduras	
	Agresividad química moderada (IIa, IIIa, IIIb, IV / cualquiera de las anteriores + Qa, Qb)	
No se utiliza ninguna protección especial sobre la armadura.	$\lambda_{51}^V = 100$ (HM, HP)	100 (vigas y correas)
	$\lambda_{51}^V = 70$ (HA)	70 (pilares y zapatas)
Las armaduras se protegen mediante su galvanizado en caliente.	- (HM, HP)	0
	$\lambda_{52}^V = 20$ (HA)	0
Las armaduras se protegen mediante un recubrimiento a base de resina epoxídica.	- (HM, HP)	0
	$\lambda_{53}^V = 20$ (HA)	0
Se emplean armaduras de acero inoxidable en las zonas de la estructura más sometidas a posible degradación.	- (HM, HP)	0
	$\lambda_{54}^V = 20$ (HA)	0
Se emplean armaduras no metálicas en las zonas de la estructura más sometidas a posible degradación.	- (HM, HP)	0
	$\lambda_{55}^V = 20$ (HA)	0
Se emplea un sistema de protección catódica.	- (HM, HP)	0
	$\lambda_{56}^V = 20$ (HA)	0
Se asegura, durante la ejecución, la continuidad eléctrica de toda la armadura.	- (HM, HP)	0
	$\lambda_{57}^V = 10$ (HA)	0
TOTAL		100 (vigas y correas) 70 (pilares y zapatas)

Tabla 23. Indicador V6. Evaluación, mediciones y control de la durabilidad

Aspectos a valorar	INDICADOR V6: Evaluación, mediciones y control de la durabilidad	
	Agresividad escasa o moderada (I, IIa, IIb, IIIa, IIIb, IV)	
Se incluye en el proyecto un cálculo detallado de la vida útil de la estructura, basado en el Anejo 9 de la EHE-08 o en un modelo de durabilidad análogo.	$\lambda_{61}^V=80$	80
Se contempla la realización en obra de ensayos (destrutivos o no destrutivos) orientados a evaluar propiedades relacionadas con la durabilidad (porosidad, absorción de agua, permeabilidad de cloruros, resistividad eléctrica, eficacia del curado, resistencia a la abrasión, etc.).	$\lambda_{62}^V=20$	-
Se especifica en el proyecto un valor límite de resistividad eléctrica para el hormigón.	$\lambda_{63}^V=20$	-
Se incorporan a la estructura electrodos, sondas u otros elementos que permitan una monitorización de parámetros relacionados con la durabilidad (resistividad, potencial de corrosión, etc.)	-	-
Se incluyen en el Plan de Mantenimiento indicaciones relativas a ensayos o medidas a realizar durante la vida útil de la estructura, encaminados a evaluar el estado real y la evolución del posible deterioro de la misma.	$\lambda_{65}^V=20$	20
TOTAL		100

Una vez analizados todos los indicadores para cada elemento de la estructura, se ha calculado los valores de cada uno de ellos. En la Tabla 24 se presenta el resumen de sus valores y sus pesos.

Tabla 24. Tabla resumen de los valores y pesos de cada indicador

Indicador	Peso (%)					Valor				
	Vigas	Correas	Zapatas	Pilares testeros	Pilares	Vigas	Correas	Zapatas	Pilares testeros	Pilares
Soluciones de diseño (V1)	100					1				
Dosificación del hormigón (V2)	30	30	40	55	55	0,31	0,31	0,41	0,56	0,56
Ejecución del hormigón (V3)	52,5	61,38	52,5	58,04	58,04	0,043	0,106	0,043	0,0768	0,0768
Protección superficial (V4)	0					0				
Protección de las armaduras (V5)	100	100	70	70	70	1	1	0,71	0,71	0,71
Evaluación, medición y control de la durabilidad (V6)	100					1	1	1	1	1

Aplicando este método se obtiene el Índice de Extensión de Vida Útil que es una ratio que da idea de la durabilidad de los elementos de la estructura, en función de sus características y de las condiciones de exposición ambiental a las que se encuentra sometida. Valora las características de la estructura o de sus elementos que permiten incrementar su vida útil por encima de los valores mínimos estipulados, en base a soluciones de diseño, a la selección de materiales, a los sistemas de protección del acero y del hormigón, entre otros aspectos. Por tanto, un valor mayor implica mejor durabilidad. En la Tabla 25 se observa que las correas y vigas tienen un mayor IEVU ya que son prefabricadas y en la fábrica el diseño y el control de fabricación es mejor. Un comentario interesante es que las zapatas, al tener un recubrimiento mayor al 60% del mínimo establecido por la EHE 08, no puntúan en ese aspecto por las razones que ya se han comentado. El recubrimiento mínimo en el caso de piezas hormigonadas contra el terreno es de 70 mm, salvo que se haya preparado el terreno y se haya dispuesto entre terreno y zapata una capa de hormigón de limpieza, que normalmente es de 10 cm. El recubrimiento nominal serán esos 70 mm, más 5 o 10 mm adicionales de margen de recubrimiento, respectivamente para el caso de ejecución in situ con nivel intenso de control de la ejecución, y para otros casos. Eso suma un total de 75 a 80 mm. En este caso, como es habitual, el suelo debe prepararse y se debe disponer una capa de hormigón de limpieza. En este nuevo escenario el recubrimiento mínimo baja ostensiblemente, si bien lo recomendable es que sea de 30 mm, más los 5 o 10 mm de margen, lo cual suma 35 o 40 mm. Aquí se han dejado 50 mm, que es más de un 60% del mínimo. Hasta aquí lo relativo a la parte inferior de la zapata. En los laterales de la misma la cosa cambia, y habría que dejar 75 u 80 mm de recubrimiento en caso de hormigonar contra el terreno. Aquí se ha supuesto que la zapata se encofra lateralmente y, por tanto, se ha dejado el mismo recubrimiento que para la parte inferior. Sinceramente, para un elemento estructural de tanta responsabilidad, que no puede ser reparado con facilidad ni a bajo coste, merece la pena quedarse del lado de la seguridad.

Tabla 25. IEVU de cada elemento estructural

	Vigas	Correas	Zapatas	Pilares testeros	Pilares
IEVU	0,641	0,649	0,607	0,638	0,638

9. EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE ESTRUCTURAS ALTERNATIVAS

Como ya se ha comentado, el segundo objetivo de este TFG es el de “aplicar diferentes modelos de evaluación de la durabilidad estructural a dicho caso base y a sus alternativas”. A continuación, se va a realizar la evaluación de la durabilidad de las estructuras alternativas con los diferentes modelos

Primeramente, siguiendo un mismo procedimiento, se han definido dos estructuras alternativas en las que se ha hecho variar algunos aspectos que influyen en la durabilidad. De esta forma se podrán comparar más fácilmente los modelos, ver qué factores son los que más influyen y establecer conclusiones.

Al estar situadas todas en Ferrol, la clase de exposición y las condiciones meteorológicas permanecen constantes. De esta forma, a efectos de los modelos que sólo tienen en cuenta la carbonatación y la corrosión de las armaduras, sólo se podrá modificar: el recubrimiento, el tipo de cemento, el diámetro de la armadura, la dosificación, la resistencia característica, el tiempo de curado y el aire ocluido. El objetivo es conseguir una estructura con mejores prestaciones que la estructura base, sobre todo en lo que se refiere a los pilares ya que presentan problemas de durabilidad en la corrosión por carbonatación.

Para el análisis de todas las estructuras se han empleado de nuevo los libros electrónicos ya comentados: el del TFM de D. Eloy Rey Gomis para los cálculos estructurales, y el realizado en el marco de este TFG, para los cálculos de durabilidad.

9.1. Estructura alternativa 1

En la primera estructura se ha modificado el tipo de cemento, la resistencia característica y el diámetro de la armadura, este último sólo en los pilares. Se ha analizado la misma estructura con los diferentes cementos aconsejados por la EHE 08 y se han observado las consecuencias de ello frente a la corrosión.

El Anejo 4 de la EHE 08, relacionado con la selección del tipo de cemento, establece los factores a tener en cuenta a la hora de utilizar un tipo de cemento u otro. Estos son: la aplicación, la clase de exposición y el tipo de hormigonado.

Al tratarse de estructuras alternativas en las cuales se han modificado de forma simultánea diferentes parámetros, únicamente se han calculado los períodos de iniciación y de propagación.

9.1.1. Durabilidad de los pilares principales

Se han estudiado los pilares utilizando el CEM II/B-S-P-V, CEM II/A-D y CEM IV. Estos cinco tipos de cemento son los recomendados para una vida útil de 50 años utilizando un recubrimiento de 25mm. También se ha estudiado la influencia del diámetro de las armaduras longitudinales. El tipo de cemento sólo influye en el período de iniciación, mientras que el diámetro de las armaduras longitudinales influye únicamente en el período de propagación. De esta forma, se pueden estudiar la variación de ambos aspectos a la vez.

En la tabla 26 se resumen los valores de periodo de iniciación de la carbonatación, periodo de iniciación de los cloruros y periodo de propagación, al aplicar los diferentes métodos de evaluación de la durabilidad a los pilares.

Tabla 26. Períodos de iniciación y de propagación de los pilares principales en función de cada modelo

		EHE 08	Jiménez Montoya	Código Estructural	Modelo FIB
Período de iniciación (carbonatación) (años),	CEM II/B-S	45,35	228	45,35	166 ¹⁷
	CEM IV	29,84	532	29,84	
	CEM II/B-P				
	CEM II/B-V	1888			
	CEM II/A-D	24,17	532	24,17	
Período de iniciación (cloruros) (años)	CEM II/A-D, II/B-S-P	1132	529	529	
	CEM II/B-V, IV	2861	1337	1337	
Período de propagación(años)	Ø22mm	4,55			
	Ø20mm	5			
	Ø18mm	5,56			

Conviene recordar que la vida útil de servicio es la suma del menor de los períodos de iniciación más el período de propagación. De esta forma, cuando se realicen las comparaciones finales oportunas, el menor período de iniciación definirá la durabilidad.

Una vez que comparadas las consecuencias del uso de los tipos de cemento referidos, por lo menos en este caso, se puede concluir que:

- Para la EHE 08 y para el Código Estructural, el cemento que aporta mayor durabilidad es el CEM II/B-S. Si se compara el período de iniciación por carbonatación, se observa que este tipo de cemento tiene una durabilidad 15 años superior al resto. El que peores prestaciones tiene es el CEM II/A-D debido, probablemente, a que está compuesto por humo de sílice. Este aditivo permite obtener hormigones de alta resistencia, sin embargo, su uso provoca también una disminución del pH, y por lo tanto, el cemento se vuelve más vulnerable a la carbonatación.
- En cambio, para el modelo propuesto por Jiménez Montoya es el CEM II/B-V el que tiene mayor durabilidad, siendo el CEM II/B-S el de peores prestaciones en ambos períodos de iniciación.

Podría parecer que el cemento CEM II/B-V, al ocupar, en lo que se refiere a durabilidad, el primer puesto en el modelo propuesto por Jiménez Montoya y el segundo en la EHE 08 y en el Código Estructural, es el que mejores prestaciones

¹⁷ Se podría utilizar un factor de viento diferente a 0 y 1, sin embargo utilizaremos el mismo que en el modelo de Jiménez Montoya al no tener datos de la estación meteorológica. Además, de esta forma se pueden comparar más fácilmente los modelos. Para este modelo, utilizaremos los valores del CEM I 42.5 R al no conocer el valor de la inversa de la carbonatación efectiva para los cementos utilizados.

tiene. Sin embargo, al ser la EHE 08 y el Código Estructural los modelos más restrictivos en este caso, tienen el menor de los períodos de iniciación en comparación con el resto, será el cemento CEM II/B-S el que se utiliza en nuestra estructura final.

Al comparar los 3 tipos de diámetros utilizados, se concluye que el uso de un diámetro menor conlleva un período de propagación mayor. Sin embargo, en este caso, la diferencia de utilizar 2mm más o menos es escasa, apenas 0,5 años.

9.1.2. Durabilidad de los pilares intermedios de los testeros

Al igual que antes, se han analizado las consecuencias del uso de distintos tipos de cemento, reduciéndose además la resistencia característica a 25MPa, que es la resistencia característica mínima que exige la EHE 08.

Volviendo a la Tabla 12, se puede observar que la diferencia entre los pilares y los pilares intermedios de los testeros recae en el diámetro de la armadura longitudinal. De esta forma, introduciendo en este apartado una resistencia característica menor, se podrán comparar los resultados de los períodos de iniciación de las Tablas 26 y 27 pues el diámetro, como ya se ha dicho antes, solo influye en el período de propagación.

En la Tabla 27 se resumen los valores del periodo de iniciación de la carbonatación, periodo de iniciación de los cloruros y periodo de propagación, al aplicar los diferentes métodos en los pilares intermedios de los testeros.

Tabla 27. Períodos de iniciación y de propagación de los pilares testeros en función de cada modelo

		EHE 08	Jiménez Montoya	Código Estructural	Modelo FIB
Período de iniciación (carbonatación) (años),	CEM II/B-S	28,07	228	28,07	240
	CEM IV	21,27	532	21,27	
	CEM II/B-P		1888		
	CEM II/B-V				
	CEM II/A-D	17,22		532	
Período de iniciación (cloruros) (años)	CEM II/A-D, II/B-S-P	1132	529	529	
	CEM II/B-V, IV	2861	1337	1337	
Período de propagación(años)	Ø16mm	6,25			

Al comparar estos resultados con los obtenidos en la Tabla 26, se observa que, para modelos de la EHE 08 y del futuro Código Estructural, la disminución de la resistencia característica solo influye en el período de iniciación de la carbonatación. La reducción, en ambos modelos, sería del 38% para el cemento CEM II/B-S, del 29% para el cemento CEM II/A-D y del 29% para el resto de cementos.

9.1.3. Durabilidad de las zapatas

En las zapatas, la EHE 08 recomienda utilizar el tipo de cemento CEM I, que es el que hemos utilizado en la estructura base, o el CEM II/A; y desaconseja el uso del CEM III/B. En este caso, se comparan los cementos aconsejados por la normativa española.

En el período de propagación influye el diámetro de las armaduras, el recubrimiento y la velocidad de corrosión. Esta última depende exclusivamente de las condiciones de la clase de exposición. En los pilares se estudió la variación del diámetro de las armaduras. En las zapatas, en cambio, estudiamos la influencia del recubrimiento.

En la Tabla 28 se resumen los valores del periodo de iniciación de la carbonatación, periodo de iniciación de los cloruros y periodo de propagación, al aplicar los diferentes métodos en las zapatas.

Tabla 28. Períodos de iniciación y de propagación de las zapatas en función de cada modelo

		EHE 08	Jiménez Montoya	Código Estructural	Modelo FIB
Período de iniciación (carbonatación) (años),	CEM III/A	477,39	469	1326,09	139
	CEM I	725,64	1385	2015,66	423
Período de iniciación (cloruros) (años)	CEM III/A	76710	48660	48660	
	CEM I	2769	1756	1756	
Período de propagación(años)	Ø16mm	12,5			

Realizando para las zapatas el mismo procedimiento que se realizó para los pilares, se concluye que el cemento con mejores prestaciones es el CEM I ya que la durabilidad estaría marcada por el período de carbonatación.

Si se comparan los períodos de propagación de las Tablas 27 y 28, se observa que, al utilizar el doble de recubrimiento, el período también es el doble.

9.2. Estructura alternativa 2

Para agilizar el estudio, en esta estructura se modificarán el resto de parámetros. El cemento utilizado en los pilares es el CEM II/B-S y en las zapatas se utiliza el CEM I.

9.2.1. Durabilidad de los pilares principales

Se han estudiado los pilares modificando la dosificación.

En los procesos de corrosión por penetración de cloruros, un parámetro que tiene una importancia relevante es el coeficiente de difusión de cloruros. Éste depende de la relación agua/cemento y del tipo de cemento: utilizando relaciones bajas y cementos que lleven a hormigones poco permeables, este parámetro

adquiere valores menores. Al ser inversamente proporcional a la durabilidad, al disminuir el coeficiente de difusión de cloruros aumenta la vida útil de la estructura.

En este caso, se utilizará el CEM II/B-S con una relación agua/cemento a/c del 0,4, 0,45 y 0,5. La EHE 08 explica el motivo por el cual se utiliza una relación a/c baja: el objetivo es conseguir una permeabilidad reducida, mayor resistencia mecánica y a las heladas, y la retracción del material inyectado. Además, a mayores relaciones a/c, más tiempo necesita el hormigón para alcanzar su resistencia.

En el artículo 71.6 de dicha Instrucción, "Curado del hormigón", se observa que para relaciones altas el tiempo de curado mínimo es mayor. Para justificarlo, utiliza la siguiente ecuación:

$$D = KLD_0 + D_1$$

En donde:

- **D**: duración mínima, en días, del curado
- **K**: coeficiente de ponderación ambiental
- **L**: coeficiente de ponderación térmica
- **D₀**: parámetro básico de curado
- **D₁**: parámetro función del tipo de cemento

Toda la información de las constantes se obtiene de las tablas 71.6 de la propia normativa. El parámetro D₀ es el que depende de la relación agua/cemento, pudiendo variar entre 1 (a/c < 0,50) y 8 días (a/c < 0,60). El parámetro D₁ depende del tipo de cemento, pudiendo variar de 0 (CEM I) a 4 días (ESP VI, CEM III/B y CEM V). De esta forma, en el mejor de los casos el tiempo mínimo de curado es de 1 día y en el peor de ellos de 22 días.

Cómo se ha utilizado en los pilares de la estructura principal una relación a/c de 0,40, ahora se analizará lo que pasaría si se aumentara dicha relación.

El efecto del aire ocluido solo afecta al período de carbonatación de los modelos de la EHE 08 y del borrador del futuro Código Estructural. Cómo hemos observado en la Tabla 16, con ambos modelos se llega al mismo resultado.

En este caso, se ha considerado utilizar un porcentaje mayor o igual del 4,5% de aire ocluido solamente en el modelo del futuro Código Estructural. De esta forma, se podrá comparar los resultados del modelo de la EHE 08 con los de la Tabla 16 (al tener todos los mismos parámetros, a excepción de la relación a/c) y con los del modelo del futuro Código Estructural, permitiendo comparar así el efecto del aumento de la relación a/c y del aire ocluido.

En la Tabla 29 se resumen los valores de periodo de iniciación de la carbonatación, periodo de iniciación de los cloruros y periodo de propagación, al aplicar los diferentes métodos en las zapatas de los pilares.

Tabla 29. Períodos de iniciación y de propagación de los pilares principales en función de cada modelo

		EHE 08	Jiménez Montoya	Código Estructural	Modelo FIB
Período de iniciación (carbonatación) (años),	a/c = 0,45 (≥4,5% aire ocluido en CE)	29,83	117	60,89	34
	a/c = 0,50 (≥4,5% aire ocluido en CE)	29,83	75	60,89	22
Período de iniciación	a/c = 0,45	4794	3041	3041	

(cloruros) (años)	a/c = 0,50	1473	991	991	
Período de propagación(años)	Ø20mm	5			

Al aumentar la relación a/c se produce una disminución de la vida útil, salvo en el período de iniciación por carbonatación calculado según la EHE 08 y el Código Estructural. En el resto de períodos de iniciación, la durabilidad disminuye con este aumento.

En lo que se refiere al aumento del porcentaje del aire ocluido, se observa que aumenta la vida útil con respecto a la carbonatación. Sin embargo, este aumento sólo se ve reflejado en los resultados de los modelos de la EHE 08 y del Código Estructural.

El período de propagación no se ve afectado por ninguno de los dos parámetros estudiados (relación a/c y % aire ocluido).

9.2.2. Durabilidad de los pilares intermedios de los testeros

El tiempo de curado sólo influye en el período de iniciación por carbonatación. En los pilares intermedios de los testeros se ha modificado el tiempo de curado. Se observa que, al aumentar éste, aumenta la vida útil en los modelos de la FIB y de Jiménez Montoya. Los cálculos se han hecho aquí con un contenido de aire ocluido mayor del 4,5% y una relación a/c de 0,40. De esta forma, poco a poco, se va mejorando la estructura base.

En la Tabla 30 se resumen los valores de periodo de iniciación de la carbonatación al aplicar los diferentes métodos en los pilares intermedios de los testeros.

Tabla 30. Período de iniciación de la carbonatación de los pilares testeros en función de cada modelo

		EHE 08	Jiménez Montoya	Código Estructural	Modelo FIB
Período de iniciación (carbonatación) (años)	7 días	92,56	532	92,56	166
	8 días		574		180
	9 días		614		192
	10 días		652		204
	11 días		688		215

9.2.3. Durabilidad de las zapatas

Se ha estudiado el efecto del recubrimiento utilizando cemento CEM I, una relación a/c = 0,39 y un contenido de aire ocluido mayor al 4,5%.

En la Tabla 31 se resumen los valores de periodo de iniciación de la carbonatación, periodo de iniciación de los cloruros y periodo de propagación, al aplicar los diferentes métodos en las zapatas.

Tabla 31. Períodos de iniciación y de propagación de las zapatas en función de cada modelo

		EHE 08	Jiménez Montoya	Código Estructural	Modelo FIB
Período de iniciación (carbonatación) (años),	50mm	1480,89	2130	4113,59	667
	55mm	1791,88	2578	4977,44	808
Período de iniciación (cloruros) (años)	50mm	18123	8474	8474	
	55mm	26534	12407	12407	
Período de propagación(años) Ø16mm	50mm	12,5			
	55mm	13,75			

Si se aumenta el recubrimiento, la durabilidad de los elementos estructurales aumenta también. En todos los períodos de iniciación se observa, con facilidad, el efecto del aumento del recubrimiento. Sin embargo, en el período de propagación, al tratarse de una clase de exposición agresiva (lo que supone una velocidad de corrosión alta), la diferencia entre utilizar un recubrimiento mayor o menor es escasa.

9.3. Estudio de la durabilidad de los elementos de la estructura base mejorada

Finalmente se ha proyectado una cuarta estructura a la que se ha llamado “estructura base mejorada” o, simplemente, “estructura mejorada”, en la que se aumenta la vida útil de la estructura base empleando los aspectos relevantes que se han visto en epígrafes anteriores. La Tabla 32 recoge el valor que toman, para la estructura base mejorada, los principales parámetros relacionados con la durabilidad en lo relativo a modelos que se limitan a la carbonatación y corrosión por cloruros.

Tras ello, se ha realizado un análisis de cada elemento estructural de la estructura base mejorada. Además, se ha calculado el porcentaje de aumento y disminución de la estimación de vida útil realizada con cada modelo, en comparación con la estimación realizada en base a la EHE 08.

Los cambios que se han realizado, con respecto a la estructura base, para obtener la estructura base mejorada son los siguientes:

- En todos los pilares se utilizará cemento CEM II/B-S en vez del CEM III/A.
- El recubrimiento de los pilares será de 30mm en vez de 25mm.
- La relación agua/cemento a/c utilizada para las zapatas es de 0,4.
- En los pilares y en las zapatas se utilizará un porcentaje de aire ocluido mayor del 4,5%. En la estructura base, el porcentaje de aire ocluido era menor del 4,5%.
- Se aumentará en un día el tiempo de curado (8 días en vez de 7)
- Los pilares estarán constituidos por un hormigón de una resistencia característica del 35MPa, en vez de 30MPa.

No se han hecho cambios en correas y vigas, por ser prefabricadas; a futuro, cabría hacer un análisis, de la mano del prefabricador.

Tabla 32. Parámetros de cada elemento estructural de la nueva estructura

PARÁMETROS	CORREAS	VIGAS	ZAPATAS	ZAPATAS testeros	PILARES	PILARES testeros
Recubrimiento (mm)	20	40	50	50	30	30
Tipo de cemento	CEM I	CEM I	CEM I	CEM I	CEM II/B-S	CEM II/B-S
Clase de exposición	IIIa	IIIa	IIIa	IIIa	IIIa	IIIa
Diámetro máximo de las armaduras (mm)	5	12,7	16	16	20	16
Fck (N/mm ²)	40	40	30	30	35	35
Fyk (MPa)	1636	1636	500	500	500	500
Tiempo de curado (días)	8	8	8	8	8	8
a/c	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Temperatura media (°C)	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5
H(%)	81	81	81	81	81	81
Días de lluvia (días)	183	183	183	183	183	183
Interno/externo	Interno	Interno	Interno	Interno	Interno	Interno
Aire ocluido	<4,5%	<4,5%	≥4,5%	≥ 4,5%	≥4,5%	≥4,5%
Protegido de la lluvia	si	si	Si	Si	si	si
Vida útil nominal (años)	50	50	50	50	50	50
Vida útil del proyecto (1,1xVida útil nominal) (años)	55	55	55	55	55	55

9.3.1. Durabilidad de los pilares principales

En la Tabla 33 se recogen los resultados de periodo de iniciación de la carbonatación, periodo de iniciación por cloruros, periodo de propagación, vida útil de servicio por carbonatación, vida útil de servicio por cloruros, y vida útil de la estructura (mínimo de los dos valores de vida útil anteriores), al aplicar los distintos modelos de durabilidad a los pilares.

Tabla 33. Vida útil de los pilares principales en función de cada modelo

	EHE 08	Jiménez Montoya	Código Estructural	Modelo FIB
Período de iniciación (carbonatación) (años)	202,91	827	202,91	259
Período de iniciación (cloruros) (años)	1513	776	776	
Período de propagación(años)	6			
Vida útil de servicio (años) (carbonatación)	208,91	833	208,91	
Vida útil de servicio (años) (cloruros)	1519	782	782	
Vida útil de servicio (años) (mínimo)	208,91	782	208,91	

9.3.2. Durabilidad de los pilares intermedios de los testeros

En la Tabla 34 se recogen los mismos resultados que en la Tabla 33, ahora para los pilares principales.

Tabla 34. Vida útil de los pilares testeros en función de cada modelo

	EHE 08	Jiménez Montoya	Código Estructural	Modelo FIB
Período de iniciación (carbonatación) (años)	202,91	827	202,91	259
Período de iniciación (cloruros) (años)	1513	776	776	
Período de propagación(años)	7,5			
Vida útil de servicio (años) (carbonatación)	210,41	834,5	210,41	
Vida útil de servicio (años) (cloruros)	1520,5	783,5	783,5	
Vida útil de servicio (años) (mínimo)	210,41	783,5	210,41	

9.3.3. Durabilidad de las zapatas

De acuerdo con la normativa vigente, en las zapatas debe considerarse una clase de exposición IIa. Por otro lado, una zapata puede estar apoyada en terreno con cloruros, en cuyo caso la clase de exposición sería la IIIa. Como ya se ha dicho con anterioridad, y al igual que en el resto de la estructura, aquí se ha considerado una clase IIIa debido a que, al margen de ser una posibilidad, en los modelos de durabilidad que se han empleado, en el proceso de degradación de la estructura resulta clave el concurso de cloruros. Una clase IIa impediría analizar la durabilidad de la estructura utilizando el modelo matemático completo de las diversas fuentes consultadas.

En la Tabla 35 se recogen los mismos resultados que en las tablas 33 y 34, ahora para las zapatas.

Tabla 35. Vida útil de las cimentaciones en función de cada modelo

	EHE 08	Jiménez Montoya	Código Estructural	Modelo FIB
Período de iniciación (carbonatación) (años)	1480,89	2298	4113,59	720
Período de iniciación (cloruros) (años)	11682	5989	5989	
Período de propagación(años)	12,5			
Vida útil de servicio (años) (carbonatación)	1493,39	2310,5	4126,09	
Vida útil de servicio (años) (cloruros)	11694,5	6001,5	6001,5	
Vida útil de servicio (años) (mínimo)	1493,39	2310,5	6001,5	

9.4. Estudio de la durabilidad de los pilares principales desde el punto de vista del modelo MIVES

En este epígrafe se ha analizado la durabilidad de los elementos de las estructuras base y mejorada desde aplicando el modelo MIVES de la Tesis Doctoral de Mel (2017). Al modificar únicamente los parámetros que se consignan en la Tabla 32, los únicos indicadores que se ven afectados en este modelo son el indicador V2, de dosificación del hormigón, y el V3, de ejecución de la estructura. Al ser el resto de los indicadores idénticos, el alumno ha decidido no repetirlos.

En las tablas 36 y 37 se muestra la re-evaluación, respectivamente, de los indicadores V2 y V3, para la estructura mejorada.

Tabla 36. Indicador V2: dosificación del hormigón (estructura final)

Aspectos evaluables		INDICADOR V2: Dosificación del hormigón				
		Agresividad moderada (IIa, IIIa, IIIb, IV / las anteriores + Qa, Qb)				
		Elemento estructural	Correas	Vigas	Zapatatas	Pilares
Se utiliza una relación a/c inferior a la máxima indicada por la EHE-08 para el caso de aplicación	a/c inferior a a/c_{max} hasta en un 5%	$\lambda^V_{21}=15$ (HM)	-	-	-	-
		$\lambda^V_{21}=10$ (HA, HP)	10	10	-	-
	a/c inferior a a/c_{max} en más del 5%	$\lambda^V_{21}=30$ (HM)	-	-	-	-
		$\lambda^V_{21}=20$ (HA, HP)	-	-	20	20
Se utiliza un contenido en cemento equivalente superior al mínimo indicado por la EHE-08 para el caso de aplicación	Se supera el cont. mínimo hasta en un 10%	$\lambda^V_{22}=15$ (HM)	-	-	-	-
		$\lambda^V_{22}=10$ (HA, HP)	-	-	-	-
	Se supera el cont. mínimo en más de un 10%	$\lambda^V_{22}=30$ (HM)	-	-	-	-
		$\lambda^V_{22}=20$ (HA, HP)	20	20	20	20
Se emplean cementos con adiciones, según RC-16	CEM II, III, IV, V / A	$\lambda^V_{23}=20$ (HM)	-	-	-	-
		$\lambda^V_{23}=15$ (HA)	-	-	-	-
		$\lambda^V_{23}=30$ (HP)	-	-	-	-
	CEM II, III, IV, V / B	$\lambda^V_{23}=35$ (HM)	-	-	-	-
		$\lambda^V_{23}=30$ (HA)	-	-	-	30
		- (HP)	-	-	-	-
Se emplean adiciones al hormigón recogidas en RC-16 (cenizas volantes, humo de sílice), existiendo ensayos de dosificación positivos para la combinación.	La adición supone hasta un 15% en peso del material cementante	$\lambda^V_{24}=20$ (HM)	-	-	-	-
		$\lambda^V_{24}=15$ (HA, HP)	-	-	-	-
	La adición supone más de un 15% en peso del material cementante	$\lambda^V_{24}=35$ (HM)	-	-	-	-
		$\lambda^V_{24}=30$ (HA, HP)	-	-	-	-
Se añade a la dosificación del hormigón un aditivo inhibidor de la corrosión.		$\lambda^V_{25}=20$ (HA, HP)	-	-	-	-
		- (HM)	-	-	-	-
Se añaden polímeros a la dosificación del hormigón, bien en forma de fibras, bien como sustitutivo del cemento (resinas epoxídicas).		$\lambda^V_{26}=10$ (HM)	-	-	-	-
		$\lambda^V_{26}=5$ (HA, HP)	-	-	-	-
Se añaden aditivos superplastificantes a la dosificación del hormigón.		$\lambda^V_{27}=10$ (HM)	-	-	-	-
		$\lambda^V_{27}=5$ (HA, HP)	-	-	-	-
TOTAL			30	30	40	70

Tabla 37. Indicador V3: ejecución de la estructura (estructura final)

Aspectos a valorar		INDICADOR V3: Ejecución de la estructura				
		Agresividad moderada (IIa, IIIa, IIIb, IV / cualquiera de las anteriores +Qa, Qb, H)				
		Elemento estructural	Correas	Vigas	Zapatas	Pilares
Duración del periodo de curado controlado del hormigón (% sobre el tiempo necesario para alcanzar f_{ck})		$\lambda_{31}^V = 70 \cdot (\%t_c/100)$	$70 \cdot (7/28) = 17,5$	$70 \cdot (7/28) = 17,5$	$70 \cdot (8/28) = 20$	$70 \cdot (8/28) = 20$
Inclusión en el proyecto de especificaciones relativas a los tiempos y procedimientos de curado, en función de los elementos de obra.		$\lambda_{32}^V = 5$	5	5	5	5
Empleo de sistemas de ejecución avanzados (curado de alta eficiencia o al vapor, encofrados de permeabilidad controlada, control del curado en tiempo real mediante ensayos eléctricos, etc.)		$\lambda_{33}^V = 10$	-	-	-	-
Recubrimientos superiores a los mínimos indicados en EHE-08	Incremento de hasta un 30%	$\lambda_{34}^V = 33.3 \cdot (\Delta R/R_{EHE})$	-	-	-	-
	Incremento entre el 30% y el 60%	$\lambda_{34}^V = 40 - 133.3 \cdot (\Delta R/R_{EHE})$	8.88	-	-	-
Adopción de un nivel de control intenso.		$\lambda_{35}^V = 15$	15	15	15	15
Se fija una apertura máxima de fisura inferior a la indicada en EHE-08.		$\lambda_{36}^V = 5$	5	5	5	5
Se incluyen en el proyecto indicaciones relativas a los encofrados y al tiempo de desencofrado, en función de los elementos de obra.		$\lambda_{37}^V = 5$	5	5	5	5
Se incluyen en el proyecto indicaciones relativas al vertido y compactación del hormigón (conveniencia del bombeo, tipo y tamaño adecuados de vibrador, etc), en función de los elementos de obra.		$\lambda_{38}^V = 5$	-	-	-	-
Porcentaje de hormigón prefabricado sobre el total de la estructura.		$\lambda_{39}^V = 20 \cdot (M_{pref} / M_{tot})$	$20 \cdot 0.25 = 5$	$20 \cdot 0.25 = 5$	$20 \cdot 0.25 = 5$	$20 \cdot 0.25 = 5$
TOTAL			61,38	52,5	55	55

Una vez actualizados los dos indicadores que varían para cada elemento de la estructura, se han calculado los valores de cada uno de ellos. En la Tabla 38 se presenta el resumen de sus valores y sus pesos, cifras que han servido de base para calcular el Índice de Extensión de Vida Útil (IEVU) de cada elemento estructural.

Tabla 38. Tabla resumen de los valores y pesos estructura final

Indicador	Peso (%)					Valor				
	Vigas	Correas	Zapatas	Pilares testereros	Pilares	Vigas	Correas	Zapatas	Pilares testereros	Pilares
Soluciones de diseño (V1)	100					1				
Dosificación del hormigón (V2)	30	30	40	70	70	0,31	0,31	0,41	0,71	0,71
Ejecución del hormigón (V3)	52,5	61,38	55	55	55	0,043	0,106	0,056	0,056	0,056
Protección superficial (V4)	0					0				
Protección de las armaduras (V5)	100	100	70	70	70	1	1	0,71	0,71	0,71
Evaluación, medición y control de la durabilidad (V6)	100					1	1	1	1	1

Aplicando el método correspondiente a la Tesis Doctoral de Mel (2017), se obtiene el Índice de Extensión de Vida Útil (IEVU), que ha sido explicado con anterioridad en este TFG, y que evalúa aspectos adicionales a la carbonatación del hormigón y la corrosión de armaduras por cloruros. El IEVU toma valores entre 0 y 1, siendo 1 el mayor índice de satisfacción con respecto a la durabilidad de la estructura, y 0 el mínimo. En la Tabla 39 se incluyen los valores que toma el IEVU para los diferentes elementos de la estructura mejorada. Se puede ver que los valores obtenidos son bastante satisfactorios, en el entorno de 0,61 a 0,66, en números redondos

Tabla 39. IEVU de cada elemento estructural de la estructura mejorada

	Vigas	Correas	Zapatas	Pilares testereros	Pilares
IEVU	0,641	0,649	0,609	0,662	0,662

9.5. Estudio de la durabilidad de los pilares principales desde el punto de vista del modelo MIVES

En este epígrafe se estudian diferentes parámetros que no tienen en cuenta los distintos modelos que se limitan a los efectos de carbonatación y corrosión.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el modelo MIVES de Mel (2017) es más completo que los anteriores. El objetivo de este epígrafe es ver que el IEVU puede mejorar o empeorar al hacer determinados cambios que no dan lugar a posibles

comparaciones con el resto de los modelos, por no ser tenidos en cuenta por estos últimos.

Se han estudiado los pilares principales de tres estructuras alternativas a la estructura base mejorada. Todas ellas tienen en cuenta los parámetros de la Tabla 32.

Estas alternativas, tendrán en cuenta más aspectos y se nombrarán de la siguiente forma: Estructura M1, Estructura M2 y Estructura M3

La Tabla 40 se corresponde con el primer indicador, de “soluciones de diseño”. Éste es el indicador que más peso tiene en el estudio. Como ya se había mencionado en el epígrafe 8.4, si el proyectista tiene en cuenta los aspectos definidos en la tabla, obtener la puntuación máxima es sencillo. Para la primera estructura alternativa (Estructura M1), el alumno supone que el proyectista no consideró los aspectos 1, 4 y 5, de tal forma que su puntuación baja a 50. Los aspectos 1, 4 y 5 son los siguientes:

- (1) El proyecto identifica los puntos de la estructura más propensos a la acumulación de agua, polvo y otros materiales que perjudican la durabilidad, e incluye medidas para evitar los riesgos derivados (drenajes, goterones, sistemas autolavantes, etc.) y la obra se ejecuta de acuerdo a ello.
- (4) Durante la fase de diseño se ha tenido en cuenta la temperatura media anual a la hora de considerar los factores que afectan a la durabilidad.
- (5) Durante la fase de diseño se ha dispuesto de información relativa a la naturaleza y concentración de agentes agresivos presentes en el medio (análisis de aguas, procesos industriales, estudios de suelos, etc.).

En la segunda (Estructura M2), se considera que son los dos últimos aspectos (4 y 5) los que no se tienen en cuenta, mientras que en la estructura final (Estructura M3) el alumno supone que el proyectista considera todos los aspectos referidos, obteniéndose así la puntuación máxima.

Las Tablas 41, 42, 43 y 44 pertenecen al requerimiento “Durabilidad de los materiales”.

La Tabla 41 se corresponde con el segundo indicador, “dosificación del hormigón”. Los pilares de la primera estructura alternativa (Estructura M1) son idénticos que los de la estructura base mejorada, para los de la Estructura M2 se utilizan aditivos superplastificantes, y a los pilares de la última alternativa (Estructura M3) se le añade además un aditivo inhibidor de la corrosión.

El indicador, “ejecución de la estructura” se resume en la Tabla 42 y trata, entre otros aspectos, el recubrimiento y el tiempo de curado. En los pilares de la última alternativa (Estructura M3) se han tenido en cuenta los aspectos 3 y 8.

- (3) Empleo de sistemas de ejecución avanzados (curado de alta eficiencia o al vapor, encofrados de permeabilidad controlada, control del curado en tiempo real mediante ensayos eléctricos, etc.)
- (8) Se incluyen en el proyecto indicaciones relativas al vertido y compactación del hormigón (conveniencia del bombeo, tipo y tamaño adecuados de vibrador, etc), en función de los elementos de obra.

El cuarto indicador, “protección superficial del hormigón”, se resume en la Tabla 43. En este indicador se valora la adopción de sistemas de protección superficial del hormigón, que disminuyan la penetración de humedad y la de agentes agresivos. Al igual que en el anterior indicador, la única estructura en la que se han considerado cambios es la última estructura alternativa (Estructura M3). Se ha supuesto que se ha aplicado una protección superficial de eficacia media. Lo normal en estructuras de naves industriales que no tengan problemas especiales (como pueda ser su uso para almacenaje de productos especialmente agresivos con la estructura) sería la no aplicación de ninguna protección superficial.

En el último indicador de este requerimiento, “protección de las armaduras”, únicamente se diferencia entre elementos estructurales de hormigón armado y elementos estructurales de hormigón pretensado. Se resume en la Tabla 44. No se aplicará ninguna protección especial.

Finalmente, lo relativo al indicador 6, “evaluación, mediciones y control de la durabilidad”, se resume en la Tabla 45. Este es el único que pertenece al tercer requerimiento, con el cual comparte nombre. En él se obtiene la puntuación máxima en las dos últimas estructuras (Estructura M2 y M3), mientras que, en la primera (Estructura M1), al no tener en cuenta el primer aspecto, la puntuación se ve fuertemente castigada.

- (1) Se incluye en el proyecto un cálculo detallado de la vida útil de la estructura, basado en el Anejo 9 de la EHE-08 o en un modelo de durabilidad análogo.

Tabla 40. Indicador V1. Soluciones de diseño (alternativas MIVES)

Aspectos a valorar	INDICADOR V1: Concepción orientada a la durabilidad			
	Agresividad moderada / alta (IIa, IIIa, IIIb, IIIc, IV / cualquier clase específica)			
		Estructura M1	Estructura M2	Estructura M3
El proyecto identifica los puntos de la estructura más propensos a la acumulación de agua, polvo y otros materiales que perjudican la durabilidad, e incluye medidas para evitar los riesgos derivados (drenajes, goterones, sistemas autolavantes, etc.) y la obra se ejecuta de acuerdo a ello.	$\lambda_{11}^V = 30$	-	-	30
El proyecto identifica zonas de riesgo de aparición de fisuras por contracción / retracción (elevada relación superficie / volumen, cambios bruscos de sección, unión de elementos de muy diferente rigidez, etc.) e incluye medidas correctoras (juntas, etc.) y la obra se ejecuta de acuerdo a ello.	$\lambda_{12}^V = 30$	30	30	30
El proyecto incluye la verificación de que no existen materiales incompatibles (pares galvánicos) en ningún punto de la estructura y la obra se ejecuta de acuerdo a ello.	$\lambda_{13}^V = 20$	20	20	20
Durante la fase de diseño se ha tenido en cuenta la temperatura media anual a la hora de considerar los factores que afectan a la durabilidad.	$\lambda_{14}^V = 10$	-	-	10
Durante la fase de diseño se ha dispuesto de información relativa a la naturaleza y concentración de agentes agresivos presentes en el medio (análisis de aguas, procesos industriales, estudios de suelos, etc.).	$\lambda_{15}^V = 10$	-	-	10
	TOTAL	50	80	100

Tabla 41. Indicador V2. Dosificación del hormigón (alternativas MIVES)

Aspectos evaluables		INDICADOR V2: Dosificación del hormigón			
		Agresividad moderada (IIa, IIIa, IIIb, IV / las anteriores + Qa, Qb)			
			Estructura M1	Estructura M2	Estructura M3
Se utiliza una relación a/c inferior a la máxima indicada por la EHE-08 para el caso de aplicación	a/c inferior a a/c_{max} hasta en un 5%	$\lambda^V_{21}=15$ (HM)	-	-	-
		$\lambda^V_{21}=10$ (HA, HP)	-	-	-
	a/c inferior a a/c_{max} en más del 5%	$\lambda^V_{21}=30$ (HM)	-	-	-
		$\lambda^V_{21}=20$ (HA, HP)	20	20	20
Se utiliza un contenido en cemento equivalente superior al mínimo indicado por la EHE-08 para el caso de aplicación	Se supera el cont. mínimo hasta en un 10%	$\lambda^V_{22}=15$ (HM)	-	-	-
		$\lambda^V_{22}=10$ (HA, HP)	-	-	-
	Se supera el cont. mínimo en más de un 10%	$\lambda^V_{22}=30$ (HM)	-	-	-
		$\lambda^V_{22}=20$ (HA, HP)	20	20	20
Se emplean cementos con adiciones, según RC-16	CEM II, III, IV, V / A	$\lambda^V_{23}=20$ (HM)	-	-	-
		$\lambda^V_{23}=15$ (HA)	-	-	-
		$\lambda^V_{23}=30$ (HP)	-	-	-
	CEM II, III, IV, V / B	$\lambda^V_{23}=35$ (HM)	-	-	-
		$\lambda^V_{23}=30$ (HA)	30	30	30
		- (HP)	-	-	-
Se emplean adiciones al hormigón recogidas en RC-16 (cenizas volantes, humo de sílice), existiendo ensayos de dosificación positivos para la combinación.	La adición supone hasta un 15% en peso del material cementante	$\lambda^V_{24}=20$ (HM)	-	-	-
		$\lambda^V_{24}=15$ (HA, HP)	-	-	-
	La adición supone más de un 15% en peso del material cementante	$\lambda^V_{24}=35$ (HM)	-	-	-
		$\lambda^V_{24}=30$ (HA, HP)	-	-	-
Se añade a la dosificación del hormigón un aditivo inhibidor de la corrosión.		$\lambda^V_{25}=20$ (HA, HP)	-	-	20
		- (HM)	-	-	-
Se añaden polímeros a la dosificación del hormigón, bien en forma de fibras, bien como sustitutivo del cemento (resinas epoxídicas).		$\lambda^V_{26}=10$ (HM)	-	-	-
		$\lambda^V_{26}=5$ (HA, HP)	-	-	-
Se añaden aditivos superplastificantes a la dosificación del hormigón.		$\lambda^V_{27}=10$ (HM)	-	-	-
		$\lambda^V_{27}=5$ (HA, HP)	-	5	5
TOTAL			70	75	95

Tabla 42. Indicador V3. Ejecución de la estructura (alternativas MIVES)

Aspectos a valorar		INDICADOR V3: Ejecución de la estructura			
		Agresividad moderada (IIa, IIIa, IIIb, IV / cualquiera de las anteriores +Qa, Qb, H)			
			Estructura M1	Estructura M2	Estructura M3
Duración del periodo de curado controlado del hormigón (% sobre el tiempo necesario para alcanzar f_{ck})		$\lambda_{31}^V = 70 \cdot (\%t_c / 100)$	$70 \cdot (8/28) = 20$	$70 \cdot (8/28) = 20$	$70 \cdot (8/28) = 20$
Inclusión en el proyecto de especificaciones relativas a los tiempos y procedimientos de curado, en función de los elementos de obra.		$\lambda_{32}^V = 5$	5	5	5
Empleo de sistemas de ejecución avanzados (curado de alta eficiencia o al vapor, encofrados de permeabilidad controlada, control del curado en tiempo real mediante ensayos eléctricos, etc.)		$\lambda_{33}^V = 10$	-	-	10
Recubrimientos superiores a los mínimos indicados en EHE-08	Incremento de hasta un 30%	-	-	-	-
	Incremento entre el 30% y el 60%	-	-	-	-
Adopción de un nivel de control intenso.		$\lambda_{35}^V = 15$	15	15	15
Se fija una apertura máxima de fisura inferior a la indicada en EHE-08.		$\lambda_{36}^V = 5$	5	5	5
Se incluyen en el proyecto indicaciones relativas a los encofrados y al tiempo de desencofrado, en función de los elementos de obra.		$\lambda_{37}^V = 5$	5	5	5
Se incluyen en el proyecto indicaciones relativas al vertido y compactación del hormigón (conveniencia del bombeo, tipo y tamaño adecuados de vibrador, etc), en función de los elementos de obra.		$\lambda_{38}^V = 5$	-	-	5
Porcentaje de hormigón prefabricado sobre el total de la estructura.		$\lambda_{39}^V = 20 \cdot (M_{pref} / M_{tot})$	$20 \cdot 0.25 = 5$	$20 \cdot 0.25 = 5$	$20 \cdot 0.25 = 5$
TOTAL			55	55	70

Tabla 43. Indicador V4. Protección superficial del hormigón (alternativas MIVES)

Aspectos a valorar	INDICADOR V4: Protección superficial del hormigón		
	Agresividad de origen químico (IIa, IIIa, IIIb, IIIc, IV / cualquier clase general +Qa, Qb, Qc, F)		
		Estructuras M1 Y M2	Estructura M3
No se adopta ninguna medida especial de protección superficial.	-	-	-
Se aplica una protección superficial de eficacia media (acrílica, caucho clorado, emulsión polimérica, etc.).	$\lambda V42 = 30$	-	30
Se aplica una protección superficial de eficacia elevada (resina epoxi, poliuretano, etc.).	$\lambda V43 = 50$	-	-
Se aplica superficialmente un inhibidor de corrosión migratorio.	$\lambda V44 = 30$	-	-
Se emplea una protección pesada frente a acciones mecánicas (asfalto, vidrio, gres, goma, acero, etc.).	-	-	-
Se adoptan medidas para garantizar un incremento de la dureza superficial del hormigón, certificable mediante ensayos.	-	-	-
El Plan de Mantenimiento de la estructura incluye indicaciones relativas a la vida esperada de las protecciones superficiales y sus intervalos de renovación.	$\lambda V47 = 20$	-	-
TOTAL		0	30

Tabla 44. Indicador V5. Protección de las armaduras (alternativas MIVES)

Aspectos a valorar	INDICADOR V5: Protección de las armaduras	
	Agresividad química moderada (IIa, IIIa, IIIb, IV / cualquiera de las anteriores + Qa, Qb)	
No se utiliza ninguna protección especial sobre la armadura.	$\lambda_{51}^V = 100$ (HM, HP)	-
	$\lambda_{51}^V = 70$ (HA)	70
Las armaduras se protegen mediante su galvanizado en caliente.	- (HM, HP)	0
	$\lambda_{52}^V = 20$ (HA)	0
Las armaduras se protegen mediante un recubrimiento a base de resina epoxídica.	- (HM, HP)	0
	$\lambda_{53}^V = 20$ (HA)	0
Se emplean armaduras de acero inoxidable en las zonas de la estructura más sometidas a posible degradación.	- (HM, HP)	0
	$\lambda_{54}^V = 20$ (HA)	0
Se emplean armaduras no metálicas en las zonas de la estructura más sometidas a posible degradación.	- (HM, HP)	0
	$\lambda_{55}^V = 20$ (HA)	0
Se emplea un sistema de protección catódica.	- (HM, HP)	0
	$\lambda_{56}^V = 20$ (HA)	0
Se asegura, durante la ejecución, la continuidad eléctrica de toda la armadura.	- (HM, HP)	0
	$\lambda_{57}^V = 10$ (HA)	0
TOTAL		70

Tabla 45. Indicador V6. Evaluación, mediciones y control de la durabilidad (alternativas MIVES)

Aspectos a valorar	INDICADOR V6: Evaluación, mediciones y control de la durabilidad		
	Agresividad escasa o moderada (I, IIa, IIb, IIIa, IIIb, IV)		
		Estructura M1	Estructuras M2 Y M3
Se incluye en el proyecto un cálculo detallado de la vida útil de la estructura, basado en el Anejo 9 de la EHE-08 o en un modelo de durabilidad análogo.	$\lambda_{61}^V=80$	-	80
Se contempla la realización en obra de ensayos (destruyivos o no destruyivos) orientados a evaluar propiedades relacionadas con la durabilidad (porosidad, absorción de agua, permeabilidad de cloruros, resistividad eléctrica, eficacia del curado, resistencia a la abrasión, etc.).	$\lambda_{62}^V=20$	-	-
Se especifica en el proyecto un valor límite de resistividad eléctrica para el hormigón.	$\lambda_{63}^V=20$	-	-
Se incorporan a la estructura electrodos, sondas u otros elementos que permitan una monitorización de parámetros relacionados con la durabilidad (resistividad, potencial de corrosión, etc.)	-	-	-
Se incluyen en el Plan de Mantenimiento indicaciones relativas a ensayos o medidas a realizar durante la vida útil de la estructura, encaminados a evaluar el estado real y la evolución del posible deterioro de la misma.	$\lambda_{65}^V=20$	20	20
TOTAL		20	100
			100

Una vez analizados todos los indicadores para cada alternativa, se ha calculado los valores de cada uno de ellos. En la Tabla 46 se presenta el resumen de sus valores y sus pesos.

Tabla 46. Tabla resumen de los valores y pesos de cada indicador

Indicador	Peso (%)				Valor			
	Estructura base mejorada	Estructura alternativa 3	Estructura alternativa 4	Estructura alternativa 5	Estructura base mejorada	Estructura alternativa 3	Estructura alternativa 4	Estructura alternativa 5
Soluciones de diseño (V1)	100	50	80	100	0,71	0,04	0,40	1
Dosificación del hormigón (V2)	70	70	75	95	0,71	0,71	0,76	0,95
Ejecución del hormigón (V3)	55	55	55	70	0,06	0,06	0,06	0,22
Protección superficial (V4)	0	0	0	30	0	0	0	0,1
Protección de las armaduras (V5)	70	70	70	70	0,71	0,71	0,71	0,71
Evaluación, medición y control de la durabilidad (V6)	100	20	100	100	1	0,00	1	1

El modelo de la Tesis Doctoral de Mel (2017), ha sido explicado con anterioridad en este TFG. Recordemos que evalúa aspectos adicionales a la carbonatación del hormigón y la corrosión de armaduras por cloruros. El IEVU toma valores entre 0 y 1, siendo 1 el mayor índice de satisfacción con respecto a la durabilidad de la estructura, y 0 el mínimo. En la Tabla 47 se incluyen los valores que toma el IEVU para los pilares de las diferentes estructuras.

Se puede observar que para la primera y segunda estructura alternativa (Estructura M1 y M2), los valores obtenidos son muy pocos satisfactorios, sobre todo en la primera.

La gran diferencia entre la segunda estructura alternativa (Estructura M2), que tiene un IEVU de 0,490 y la estructura base mejorada, cuyo IEVU es de 0,638, reside en la etapa de diseño. En las dos primeras alternativas (Estructura M1 y M2), el proyectista no tuvo en cuenta la totalidad de los aspectos en el primer indicador, "Soluciones de diseño". No consideró los aspectos 1, 4 y 5. Al tratarse de una función creciente, cóncava y con una fuerte pendiente, es necesario un elevado grado de cumplimiento de requerimientos para alcanzar una buena puntuación.

El tercer indicador, "Ejecución de la estructura", también presenta una función creciente, cóncava y con una fuerte pendiente; mientras que el segundo, "Dosificación del hormigón", y el cuarto, "Protección superficial del hormigón", tienen una función lineal.

Finalmente, ya se había comentado que el resto de los modelos numéricos utilizados en el trabajo eran complementarios al modelo MIVES. Esto se puede observar en la importancia que el último indicador, "Evaluación, mediciones y control de la

durabilidad”, proporciona a la utilización de modelos que calculan la vida útil de la estructura, como el de la EHE 08 o el del futuro Código Estructural.

Tabla 47. IEVU de los pilares de cada estructura

	Estructura base mejorada	Estructura M1	Estructura M2	Estructura M3
IEVU	0,638	0,275	0,490	0,718
Cambios introducidos	V1: Soluciones de diseño	No se consideran los aspectos 1, 4 y 5	No se consideran los aspectos 4 y 5	Ningún cambio
	V2: Dosificación del hormigón	Ningún cambio	Se utilizan aditivos superplastificantes	Se utilizan aditivos superplastificantes y un aditivo inhibidor de la corrosión
	V3: Ejecución de la estructura	Ningún cambio	Ningún cambio	Se consideran los aspectos 3 y 8
	V4: Protección superficial del hormigón	Ningún cambio	Ningún cambio	Se aplica una protección superficial de eficacia media
	V5: Protección de las armaduras	Ningún cambio	Ningún cambio	Ningún cambio
	V6: Evaluación, mediciones y control de la durabilidad	No se tiene en cuenta el aspecto 1	Ningún cambio	Ningún cambio

10. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Una vez analizada la nueva nave industrial, se ha realizado un análisis final, junto con las correspondientes conclusiones.

Para que los modelos y las estructuras sean más fáciles de comparar, se han realizado las Tablas 48, 49 y 50, en las que se compara cada modelo, de los que se limitan a la carbonatación y corrosión de armaduras, con el de la normativa vigente en España (EHE-08), así como la estructura base con la estructura base mejorada, a dichos efectos (carbonatación y corrosión de armaduras).

Los cambios introducidos en la estructura mejorada, con respecto a la base, son los siguientes:

- Pilares principales: se utiliza cemento CEM II/B-S en vez del CEM III/A, se aumenta el recubrimiento a 30mm, se utiliza un porcentaje de aire ocluido mayor al 4,5%, se emplea hormigón de 35MPa y se aumenta en un día el tiempo de curado (8 días en vez de 7).
- Pilares intermedios de los testeros: se utiliza cemento CEM II/B-S en vez del CEM III/A, se aumenta el recubrimiento a 30mm, se utiliza un porcentaje de aire ocluido mayor al 4,5%, se emplea hormigón de 35MPa y se aumenta en un día el tiempo de curado (8 días en vez de 7).
- Zapatas: se emplea una relación agua/cemento a/c de 0,40, se utiliza un porcentaje de aire ocluido mayor al 4,5% y se aumenta en un día el tiempo de curado (8 días en vez de 7).

Además del tiempo en años de cada período de la vida útil, dichas tablas incluyen un porcentaje de incremento (verde y positivo) o decremento (rojo y negativo), que refleja:

- Tanto en la primera parte de cada tabla, relativa a la estructura base, como en la segunda, relativa a la estructura base mejorada, el aumento o disminución del correspondiente período de la vida útil de cada modelo, con respecto al tiempo estimado con el modelo de la EHE-08.
- En la tercera parte de cada tabla, de comparación entre la estructura base y la mejorada, el aumento o la disminución del correspondiente período de la vida útil de la estructura final, con respecto a la inicial.

También se ha preparado una cuarta tabla, la Tabla 51, en la que se comparan las estructuras base (inicial) y mejorada, mediante el modelo de Mel (2017).

Tabla 48. Comparación final pilares principales

PILARES		EHE 08	Jiménez Montoya		Código estructural		Modelo FIB	
		años	años	% Sobre la EHE 08	años	% Sobre la EHE 08	años	% Sobre la EHE 08
ESTRUCTURA BASE	Iniciación (carbonatación)	29,84	228	664%	45,35	52%	68	128%
	Iniciación (Cloruros)	45777	21405	-53%	21405	-53%		
	Propagación	5						
	vida útil de servicio (años) (mínimos)	34,84	233	569%	50,35	45%		
ESTRUCTURA BASE MEJORADA	Iniciación (carbonatación)	202,91	827	308%	202,91	0%	259	28%
	Iniciación (Cloruros)	1513	776	-49%	776	-49%		
	Propagación	6						
	vida útil de servicio (años) (mínimos)	208,91	782	274%	208,91	0%		
COMPARACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS BASE (EBase) y BASE MEJORADA (EBaseMej) (% EBaseMej sobre EBase)	Iniciación (carbonatación)	580%	263%		347%		281%	
	Iniciación (Cloruros)	-97%	-96%		-96%			
	Propagación	20%						
	vida útil de servicio	500%	236%		315%			

Tabla 49. Comparación final pilares intermedios de los testers

PILARES		EHE 08	Jiménez Montoya		Código estructural		Modelo FIB	
		años	años	% Sobre la EHE 08	años	% Sobre la EHE 08	años	% Sobre la EHE 08
ESTRUCTURA BASE	Iniciación (carbonatación)	29,84	228	664%	45,35	52%	68	128%
	Iniciación (Cloruros)	45777	21405	-53%	21405	-53%		
	Propagación	6,25						
	vida útil de servicio (años) (mínimos)	36,09	234,25	549%	51,6	43%		
ESTRUCTURA BASE MEJORADA	Iniciación (carbonatación)	202,91	827	308%	202,91	0%	259	28%
	Iniciación (Cloruros)	1513	776	-49%	776	-49%		
	Propagación	7,5						
	vida útil de servicio (años) (mínimos)	210,41	783,5	272%	210,41	0%		
COMPARACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS BASE (EBase) y BASE MEJORADA (EBaseMej) (% EBaseMej sobre EBase)	Iniciación (carbonatación)	580%	263%		347%		281%	
	Iniciación (Cloruros)	-97%	-96%		-96%			
	Propagación	20%						
	vida útil de servicio	483%	234%		308%			

Tabla 50. Comparación final zapatas

zapatas		EHE 08	Jiménez Montoya		Código estructural		Modelo FIB		
		años	años	% Sobre la EHE 08	años	% Sobre la EHE 08	años	% Sobre la EHE 08	
ESTRUCTURA BASE	Iniciación (carbonatación)	725,64	1385	91%	2015,66	178%	423	-42%	
	Iniciación (Cloruros)	2769	1756	-37%	1756	-37%			
	Propagación	12,5							
	vida útil de servicio (años) (mínimos)	738,14	1397,5	89%	1768,5	140%			
ESTRUCTURA BASE MEJORADA	Iniciación (carbonatación)	1480,89	2298	55%	4113,59	178%	720	-51%	
	Iniciación (Cloruros)	11682	5989	-49%	5989	-49%			
	Propagación	12,5							
	vida útil de servicio (años) (mínimos)	1493,39	2310,5	55%	4126,09	176%			
COMPARACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS BASE (EBase) y BASE MEJORADA (EBaseMej) (% EBaseMej sobre EBase)	Iniciación (carbonatación)	104%	66%		104%		70%		
	Iniciación (Cloruros)	322%	241%		241%				
	Propagación	0%							
	vida útil de servicio	102%	65%		133%				

Tabla 51. Comparación final MIVES

	Vigas	Correas	Zapatatas	Pilares testeros	Pilares
IEVU (mejorada)	0,641	0,649	0,607	0,638	0,638
IEVU (base)	0,641	0,649	0,609	0,662	0,662
Mejora entre las 2 estructuras	0%	0%	0,33 %	3,76 %	3,76 %
Cambios que se han introducido en la mejora con respecto a la base	V2: Dosificación del hormigón		Ningún cambio	Se utiliza el cemento CEM II/B-S en vez del CEM III/A	Se utilizan aditivos superplastificantes y un aditivo inhibidor de la corrosión
	V3: Ejecución de la estructura		Se aumenta el tiempo de curado en un día, de 7 a 8 días.	Se aumenta el tiempo de curado en un día, de 7 a 8 días; y el recubrimiento.	Se aumenta el tiempo de curado en un día, de 7 a 8 días; y el recubrimiento

Vamos a comenzar con el modelo MIVES de Mel (2017), en lo relativo a la Tabla 51. Al variar únicamente los parámetros de la Tabla 32, el resultado que se obtiene para la estructura mejorada es muy parecido al de la estructura base. El aumento en un día del tiempo de curado apenas influye en el IEVU final de las zapatas. En los pilares, en cambio, el aumento en un día del tiempo de curado y la utilización de un cemento mejor mejora nuestra estructura en un 3,76%

Si se compara con el resto de modelos (carbonatación y corrosión de armaduras), se ve que la mejora que se obtiene no es tan grande. El máximo aumento en el modelo MIVES es de un 3,92% y en la EHE 08 del 580%. Consecuentemente, por lo menos en el caso que nos ocupa, el modelo MIVES es más exigente que los restantes modelos.

Con respecto a la Tabla 47, en la cual se hacen cambios diferentes a los de la Tabla 51, se observa que hay factores que afectan mucho más a la durabilidad que la corrosión. En la Tabla 51 el IEVU apenas varía, mientras que en la tabla 47, dependiendo de los aspectos que se tengan en cuentas, se observan resultados totalmente distintos.

Pasemos ahora a la comparación del resto de modelos entre sí (modelos de carbonatación y corrosión de armaduras). Al realizar las comparaciones reflejadas en las tablas 48 a 50, se observa que se ha mejorado la estructura en casi todos los aspectos. Únicamente se ha reducido la vida útil de los pilares principales y de los pilares testeros en el período de iniciación ante procesos de corrosión debidos a cloruros. Sin embargo, si se compara la vida útil de servicio final, es decir, la mínima de cada modelo, se observa que se ha mejorado para todos los elementos estructurales analizados, siendo la menor mejora la de las zapatas (solo un 65% de mejora).

Se han obtenido importantes mejoras en el período de iniciación por carbonatación en los pilares. Si observamos las cifras de la estructura base, la durabilidad no alcanzaba la vida útil nominal. En cambio, en la estructura mejorada se supera con creces dicho valor.

Al comparar los modelos con la actual normativa vigente en España, EHE-08, se observa que es más restrictiva que los modelos propuestos por Jiménez Montoya y por el futuro Código Estructural español, en lo que se refiere a los procesos de carbonatación. En cambio, éstas son más restrictivas que la EHE-08 en procesos de corrosión por cloruros. Al comparar la vida útil de servicio mínima, vuelve a ser la EHE 08 la normativa más conservadora.

A menos que los elementos se encuentren enterrados, la EHE 08 y el Código Estructural coinciden en la durabilidad ante fenómenos de carbonatación. Cuando los elementos estructurales se encuentran bajo tierra, como es el caso de las zapatas, el Código Estructural tiene en cuenta un parámetro adicional, obteniéndose un resultado mayor y probablemente más preciso.

En el punto 9.1.1 “Durabilidad de los pilares” se hablaba de que dosificaciones bajas y cementos que lleven a hormigones poco permeables, como el cemento CEM III/B, mejoraban la vida útil de la estructura. Esto es cierto para casos en los que la corrosión se lleve a cabo por procesos de penetración por cloruros. En el caso de la carbonatación, la utilización de cementos con más del 65% de escoria de alto horno no implica mejores prestaciones. Como se observa en la Tabla 26, la utilización de este tipo de cemento empeora bastante la vida útil de los pilares.

A pesar de que los procesos de carbonatación y corrosión influyen mucho en la vida útil, el estudio de la durabilidad basado únicamente en éste proceso, desde el punto de vista del alumno, es insuficiente y puede confundir al profesional de la calle, al no tener en cuenta el resto de procesos, ataques, problemas o fallos que pueden afectar a la durabilidad estructural. Así, la aparición de fisuras debido a un mal diseño o cálculo erróneo, provocaría que los procesos de corrosión de las armaduras se acelerasen.

Otro problema frecuente, que reduce drásticamente la durabilidad, es un proyecto con una concepción errónea o con detalles constructivos inadecuados. Esto es más frecuente de lo que se piensa, tiene consecuencias mucho peores que la carbonatación y el ataque por cloruros, y algunos prestigiosos autores, como Calavera (1999), basándose en su experiencia profesional en materia de patología estructural, consideran que estos son los problemas que más peso tienen sobre la durabilidad. Obviamente, el mantenimiento debe pesar mucho también.

Desafortunadamente, no hay estudios que permitan estimar años de vida útil en función de todos los aspectos que realmente influyen en ella.

El único modelo conocido que sí que tiene en cuenta todas estas variables es el de la Tesis de Mel (2017), y no queda más remedio que recurrir a modelos como el de dicha Tesis, que estima una ratio que incluye la práctica totalidad de los aspectos relacionados con la durabilidad, expresada de 0 a 1 o de 0 a 100%, siendo estos valores de mínima y máxima satisfacción del proyecto realizado, a efectos de durabilidad.

En otro orden de cosas, la EHE 08, en el artículo 37 “Durabilidad del hormigón y de las armaduras”, indica que, para conseguir una estructura durable, es necesario que el Autor del proyecto diseñe una estrategia que tenga en cuenta las especificaciones de ese capítulo y que, alternativamente, para procesos de corrosión de las armaduras, se pueda utilizar el modelo de la propia normativa. A pesar de establecer lo que se acaba de comentar, la EHE 08 no propone posibles estrategias, cosa que sí hace el modelo de MEL (2017).

Es cierto que, al no proporcionar un valor en años de la vida útil, el modelo MIVES parece menos preciso. Sin embargo, si se consigue un valor elevado del IEVU, las garantías de que nuestra nave industrial alcance la vida útil nominal son elevadas.

Además, la existencia de un valor en años no implica una mayor precisión, pues dependiendo del modelo utilizado, la vida útil puede ser muy distinta. Realmente, como se ha ido viendo con el análisis realizado, esas diferencias pueden ser enormes, cosa que hace dudar de la solidez de este tipo de modelos.

Además, se puede observar que, a excepción del MIVES, el resto de modelos no tienen en cuenta el posible aumento excesivo del recubrimiento de las armaduras, no fijan un valor máximo de recubrimiento.

Hay que tener en cuenta, por otro lado, aquellos modelos que evalúan el fenómeno de penetración por cloruros, simplifican bastante el proceso físico-químico que realmente se produce. Como se ha explicado en el Capítulo 6 de este trabajo, en la superficie del hormigón aparecen más procesos a tener en cuenta, además del de difusión.

Una conclusión que se podría hacer, común a todos los modelos relacionados con la carbonatación y corrosión de armaduras, es que en la estructura base mejorada todos cumplen el requisito de la vida útil nominal, con las reservas que hay que hacer, ya que esto sólo contempla la carbonatación y corrosión de armaduras, y hay cosas más importantes.

Finalmente, según las hipótesis que se han tenido en cuenta, algunos de los periodos de iniciación de la estructura base alcanzan valores de más de muchísimos miles de años. Estas durabilidades son sorprendidas, tanto para el alumno como para los tutores.

El alumno ha realizado las comprobaciones oportunas, incluso en una de las ocasiones con la presencia y el concurso de los tutores, y los cálculos están bien realizados.

Sin embargo, dichas durabilidades no son realistas, por la sencilla razón de que sólo tienen en cuenta el ataque de cloruros como único proceso de deterioro, al margen de no corresponderse con la práctica profesional.

Todo lo más, se podría decir que un determinado elemento estructural tendría una durabilidad muy alta en ausencia de problemas diferentes a los de carbonatación del hormigón y la corrosión del acero por cloruros, pero nada más.

A diferencia de los otros cuatro modelos analizados, estos problemas, que pueden reducir las cifras de durabilidad real a siglos o décadas (algo más acorde con la realidad), sí se incluyen en el modelo de la Tesis de Mel (2017).

De ahí que estos modelos de estimación de vida útil en años deban usarse con mucha precaución. Sin despreciar su importancia, debe prestarse mucha más atención a otros aspectos que tienen una influencia mucho mayor sobre la durabilidad.

De todas formas, debe ser posible alcanzar durabilidades altísimas con adecuados diseño, cálculo, dimensionamiento y mantenimiento ya que, de hecho, existen construcciones romanas, como el Panteón de Roma, realizadas con hormigones primitivos, que siguen en pie. También existen, todavía, construcciones romanas de fábrica de ladrillo, con morteros primitivos, que siguen en pie después de varios milenios.

A pesar de ello, no se puede responder con el máximo rigor a la pregunta de ¿hasta dónde se puede llegar, en materia de durabilidad, con los hormigones actuales?. La razón es clara: todavía no ha dado tiempo a experimentarlo empíricamente. De todas formas, debería poderse llegar a cifras milenarias en los supuestos antedichos de diseño, cálculo, dimensionamiento y mantenimiento adecuados.

Una vez expuesto todo lo anterior, hay que decir también que los modelos de la literatura existente apenas van más allá de la consideración de los fenómenos de carbonatación del hormigón y de corrosión del acero por cloruros. Hay algunas publicaciones que estudian otros tipos de ataques químicos, pero se trata de aspectos que no aportan mucho más al caso que nos ocupa.

Por tanto, hay mucho que estudiar, todavía, en materia de durabilidad de estructuras de hormigón.

11. BIBLIOGRAFÍA

Arroyo Portero, Juan Carlos, y otros (2018): “Jiménez Montoya - Hormigón Armado”, 16ª edición. Editorial Cinter, Madrid.

Calavera, José (1999): “Proyecto y cálculo de estructuras de hormigón”, Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC), Madrid.

Clifton, James R, y otros (2000), ACI 365.1R-00: “Service Life Prediction, State of the Art Report”, American Concrete Institute

D’Andréa, Renata (2010): “Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión: aplicación de la resistividad eléctrica”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

Freyssinet España (2019): “Reparación de las pilas norte y sur del puente de Rande (Pontevedra)”, disponible en Internet:

http://www.freyssinet.es/freyssinet/wfreyssinetsa_sp.nsf/sb/reparacion-puente-rande-pontevedra

Mel Fraga, José (2017): “Nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad de estructuras de hormigón”. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña.

Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2008): “EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural”. Comisión Permanente del Hormigón. Ministerio de Fomento, Madrid.

Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2019): Borrador del nuevo Código Estructural español. Comisiones Permanentes del Hormigón y del Acero. Ministerio de Fomento, Madrid.

Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2019): Código Técnico de la Edificación. disponible en Internet: <https://www.codigotecnico.org>.

Rey Gomis, Eloy (2019): “Optimización de la contribución al desarrollo sostenible de una estructura de hormigón armado”, Trabajo Fin de Máster, Universidade da Coruña, Escuela Politécnica Superior.

The International Federation for Structural Concrete (fib) (2012): “Model Code 2010”, Final draft, Volume 1. The International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland.

The International Federation for Structural Concrete (fib) (2006): Bulletin 34, “Model Code for Service Life Design” The International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland.

Tuutti, Kyösti (1982): “Corrosion of Steel in concrete”, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.

Xunta de Galicia (2019): “Meteogalicia”, disponible en Internet: https://www.meteogalicia.gal/observacion/informesclima/informesIndex.action?request_local_e=g

ANEXOS

Anexo 1: Modelo MIVES

Todas las tablas están sacadas del Capítulo 10 de la tesis doctoral “Nuevo Modelo de evaluación de la sostenibilidad de estructuras de hormigón” de José Mel Fraga.

Tabla 52. Carácter de la estructura

Utilización prevista de la estructura	Carácter (c)
La construcción es provisional; o tiene un periodo de vida útil inferior a 10 años; o está vinculada a una utilización con un tiempo de duración determinado de antemano, muy inferior a la durabilidad estimada para el hormigón de la estructura en sus condiciones de exposición. Todo ello deberá justificarse adecuadamente.	0
La construcción es de carácter permanente; vinculada a una utilización de duración indefinida; o a una duración determinada, pero de un orden de magnitud similar o superior a la durabilidad estimada para el hormigón de la estructura en sus condiciones de exposición.	1

Tabla 53. Valores orientativos de la Probabilidad de Obsolescencia Prematura (POP) para distintos tipos de estructuras. (Tesis José Mel)

Tipo de Estructura	Factores a tener en cuenta	Posibles valores habituales de POP
Obras públicas (Ingeniería Civil)	Tamaño (a mayor entidad de la obra más difícil será su obsolescencia). Naturaleza de la obra. Por ejemplo, dentro de las infraestructuras destinadas al transporte se considerarían como de mayor vigencia en el tiempo las ferroviarias o las vías de alta capacidad, mientras que las instalaciones portuarias se encuentran más ligadas a la evolución de la construcción naval (necesidad de mayor calado, nuevas modalidades de transporte, etc.).	0,00 – 0,10
Estructuras de edificios institucionales (públicos o privados) singulares, monumentales y de gran tamaño.	Es muy posible que el valor arquitectónico que suele otorgarse a estas construcciones les garantice una pervivencia muy prolongada, con modificación o no de su uso inicial, por mucho que la estética sea relativamente fácil de percibir aunque difícil de ajustar a una definición técnica.	0,00 – 0,05
Estructuras de edificios institucionales y convencionales del sector terciario.	Al igual que en el caso anterior, el valor arquitectónico puede ser un factor importante. La falta de versatilidad de su diseño de cara a un cambio de uso puede incidir negativamente en su expectativa de vida. Cuando el propietario es una administración pública puede existir mayor probabilidad de demolición, sea por mayor disponibilidad de recursos que en el sector privado, sea por diferente criterio a la hora de gestionar esos recursos, sea por decisiones políticas.	0,00 – 0,25

Estructuras de edificios residenciales.	<p>Las construcciones de menor calidad han sido las más propensas a desaparecer antes de tiempo.</p> <p>En la actualidad, las tendencias arquitectónicas se inclinan hacia la reutilización y rehabilitación.</p> <p>Cuando la propiedad es compartida, es mucho más difícil que se pueda dar un acuerdo para la demolición prematura del edificio.</p> <p>Cuando se producen circunstancias económicas como la especulación con el precio del suelo o de la vivienda, esto puede tener gran influencia sobre la POP.</p>	0,00 – 0,30
Estructuras de edificios industriales, agrícolas o ganaderos.	<p>En general, cabe esperar que pocas estructuras ubicadas en construcciones de este tipo agoten su vida útil.</p> <p>En determinados casos, dependiendo de la ubicación, del valor arquitectónico y de la relevancia social adquirida, se puede adoptar una segunda vida con un cambio de uso, generalmente orientado hacia el sector terciario y dotacional.</p> <p>Estructuras industriales relacionadas directamente con equipos o sistemas de proceso podrían estar en el límite entre esta categoría y el ser consideradas estructuras temporales ($c=0$). Ejemplos de ello son bancadas y otras estructuras de soporte de maquinaria, depósitos y tanques, construcciones adaptadas "ad hoc" para un equipo determinado.</p>	0,25 – 0,75

Tabla 54. Coeficientes de ponderación para el cálculo del IEVU

Coeficiente de ponderación	Valor	Coeficiente de ponderación	Valor
α^V_1	0,30	γ^V_1	1,00
$\alpha^V_2, \alpha^V_3, \alpha^V_4, \alpha^V_5$	0,60	γ^V_2	0,60
α^V_6	0,10	γ^V_3	0,40
β^V_1	1,00	γ^V_4	0,40
β^V_2, β^V_3	0,50	γ^V_5	0,60
β^V_4, β^V_5	0,50	γ^V_6	1,00
β^V_6	1,00		

1.1. Indicador V1: soluciones de diseño

Tabla 55. Aspectos a valorar en el indicador V1 (soluciones de diseño) y puntuaciones λ^V_{1x} asociadas

Aspectos a valorar	λ^V_{1x}	
	Clase de exposición	
	Agresividad escasa (I, IIb)	Agresividad moderada / alta (IIa, IIIa, IIIb, IIIc, IV / cualquier clase específica)
El proyecto identifica los puntos de la estructura más propensos a la acumulación de agua, polvo y otros materiales que perjudican la durabilidad, e	$\lambda^V_{11} = 40$	$\lambda^V_{11} = 30$

incluye medidas para evitar los riesgos derivados (drenajes, goterones, sistemas autolavantes, etc.) y la obra se ejecuta de acuerdo a ello.		
El proyecto identifica zonas de riesgo de aparición de fisuras por contracción / retracción (elevada relación superficie / volumen, cambios bruscos de sección, unión de elementos de muy diferente rigidez, etc.) e incluye medidas correctoras (juntas, etc.) y la obra se ejecuta de acuerdo a ello.	$\lambda^V_{12} = 40$	$\lambda^V_{12} = 30$
El proyecto incluye la verificación de que no existen materiales incompatibles (pares galvánicos) en ningún punto de la estructura y la obra se ejecuta de acuerdo a ello.	$\lambda^V_{13} = 20$	$\lambda^V_{13} = 20$
Durante la fase de diseño se ha tenido en cuenta la temperatura media anual a la hora de considerar los factores que afectan a la durabilidad.	-	$\lambda^V_{14} = 10$
Durante la fase de diseño se ha dispuesto de información relativa a la naturaleza y concentración de agentes agresivos presentes en el medio (análisis de aguas, procesos industriales, estudios de suelos, etc.).	-	$\lambda^V_{15} = 10$

1.2. Indicador V2: dosificación del hormigón

Tabla 56. Aspectos a valorar en el indicador V2 (dosificación del hormigón) y puntuaciones λ^V_{2x} asociadas

Aspectos evaluables		λ^V_{2x}					
		Clase de exposición					
		Agresividad escasa (I, IIb)	Agresividad moderada (IIa, IIIa, IIIb, IV / las anteriores + Qa, Qb)	Agresividad elevada (IIIc / cualquier clase general + Qc)	H	F	E
Se utiliza una relación a/c inferior a la máxima indicada por la EHE-08 para el caso de aplicación	a/c inferior a a/c_{max} hasta en un 5%	$\lambda^V_{21} = 15$	$\lambda^V_{21}=15$ (HM) $\lambda^V_{21}=10$ (HA, HP)	$\lambda^V_{21}=10$	$\lambda^V_{21}=20$	$\lambda^V_{21}=20$ (HM) $\lambda^V_{21}=15$ (HA, HP)	$\lambda^V_{21}=10$
	a/c inferior a a/c_{max} en más del 5%	$\lambda^V_{21}=25$	$\lambda^V_{21}=30$ (HM) $\lambda^V_{21}=20$ (HA, HP)	$\lambda^V_{21}=20$	$\lambda^V_{21}=40$	$\lambda^V_{21}=40$ (HM) $\lambda^V_{21}=35$ (HA, HP)	$\lambda^V_{21}=20$
Se utiliza un contenido en cemento equivalente superior al mínimo indicado por la EHE-08 para el caso de aplicación	Se supera el cont. mínimo hasta en un 10%	$\lambda^V_{22}=15$	$\lambda^V_{22}=15$ (HM) $\lambda^V_{22}=10$ (HA, HP)	$\lambda^V_{22}=10$	$\lambda^V_{22}=20$	$\lambda^V_{22}=20$ (HM) $\lambda^V_{22}=15$ (HA, HP)	$\lambda^V_{22}=10$
	Se supera el cont. mínimo en más de un 10%	$\lambda^V_{22}=25$	$\lambda^V_{22}=30$ (HM) $\lambda^V_{22}=20$ (HA, HP)	$\lambda^V_{22}=20$	$\lambda^V_{22}=40$	$\lambda^V_{22}=40$ (HM) $\lambda^V_{22}=35$ (HA, HP)	$\lambda^V_{22}=20$

Se emplean cementos con adiciones, según RC-16	CEM II, III, IV, V / A	$\lambda_{23}^V = 20$ (HM, HA) $\lambda_{23}^V = 35$ (HP)	$\lambda_{23}^V = 20$ (HM) $\lambda_{23}^V = 15$ (HA) $\lambda_{23}^V = 30$ (HP)	$\lambda_{23}^V = 10$ (HM,HA) $\lambda_{23}^V = 25$ (HP)	-	-	$\lambda_{23}^V = 15$
	CEM II, III, IV, V / B	$\lambda_{23}^V = 35$ (HM,HA) - (HP)	$\lambda_{23}^V = 35$ (HM) $\lambda_{23}^V = 30$ (HA) - (HP)	$\lambda_{23}^V = 25$ (HM,HA) - (HP)	-	-	$\lambda_{23}^V = 25$ (HM,HA) -(HP)
Se emplean adiciones al hormigón recogidas en RC-16 (cenizas volantes, humo de sílice), existiendo ensayos de dosificación positivos para la combinación.	La adición supone hasta un 15% en peso del material cementante	$\lambda_{24}^V = 20$	$\lambda_{24}^V = 20$ (HM) $\lambda_{24}^V = 15$ (HA, HP)	$\lambda_{24}^V = 10$	-	-	$\lambda_{24}^V = 15$
	La adición supone más de un 15% en peso del material cementante	$\lambda_{24}^V = 35$	$\lambda_{24}^V = 35$ (HM) $\lambda_{24}^V = 30$ (HA, HP)	$\lambda_{24}^V = 25$	-	-	$\lambda_{24}^V = 25$
Se añade a la dosificación del hormigón un aditivo inhibidor de la corrosión.	-	-	$\lambda_{25}^V = 20$ (HA, HP) - (HM)	$\lambda_{25}^V = 30$ (HA, HP) - (HM)	$\lambda_{25}^V = 10$ (HA, HP) - (HM)	$\lambda_{25}^V = 30$ (HA, HP) - (HM)	$\lambda_{25}^V = 5$ (HA, HP) - (HM)
Se añaden polímeros a la dosificación del hormigón, bien en forma de fibras, bien como sustitutivo del cemento (resinas epoxídicas).	-	-	$\lambda_{26}^V = 10$ (HM) $\lambda_{26}^V = 5$ (HA, HP)	$\lambda_{26}^V = 20$	$\lambda_{26}^V = 20$	$\lambda_{26}^V = 20$	$\lambda_{26}^V = 5$
Se añaden aditivos superplastificantes a la dosificación del hormigón.	$\lambda_{27}^V = 15$	-	$\lambda_{27}^V = 10$ (HM) $\lambda_{27}^V = 5$ (HA, HP)	$\lambda_{27}^V = 20$	$\lambda_{27}^V = 20$	$\lambda_{27}^V = 20$	$\lambda_{27}^V = 5$
Se emplean áridos de prestaciones superiores a las indicadas en EHE-08.	-	-	-	-	-	-	$\lambda_{28}^V = 30$

1.3. Indicador V3: ejecución de la estructura

Tabla 57. Aspectos a valorar en el indicador V3 (ejecución de la estructura) y puntuaciones λ_{3x}^V asociadas

Aspectos a valorar	λ_{3x}^V		
	Clase de exposición		
	Agresividad escasa (I, IIb)	Agresividad moderada (IIa, IIIa, IIIb, IV / cualquiera de las anteriores +Qa, Qb, H)	Agresividad elevada (IIIc / cualquier clase general + Qb, Qc, F, E)
Duración del periodo de curado controlado del hormigón (% sobre el tiempo necesario para alcanzar f_{ck})	$\lambda_{31}^V = 70 \cdot (\%t_c/100)$	$\lambda_{31}^V = 60 \cdot (\%t_c/100)$	$\lambda_{31}^V = 50 \cdot (\%t_c/100)$
Inclusión en el proyecto de especificaciones relativas a los tiempos y procedimientos de curado, en función de los elementos de obra.	$\lambda_{32}^V = 5$	$\lambda_{32}^V = 5$	$\lambda_{32}^V = 5$

Empleo de sistemas de ejecución avanzados (curado de alta eficiencia o al vapor, encofrados de permeabilidad controlada, control del curado en tiempo real mediante ensayos eléctricos, etc.)		$\lambda_{33}^V = 10$	$\lambda_{33}^V = 10$	$\lambda_{33}^V = 10$
Recubrimientos superiores a los mínimos indicados en EHE-08	Incremento de hasta un 30%	-	$\lambda_{34}^V = 33.3 \cdot (\Delta R/R_{EHE})$	$\lambda_{34}^V = 50 \cdot (\Delta R/R_{EHE})$
	Incremento entre el 30% y el 60%	-	$\lambda_{34}^V = 40 - 133.3 \cdot (\Delta R/R_{EHE})$	$\lambda_{34}^V = 50 - 83.3 \cdot (\Delta R/R_{EHE})$
Adopción de un nivel de control intenso.		$\lambda_{35}^V = 20$	$\lambda_{35}^V = 15$	$\lambda_{35}^V = 15$
Se fija una apertura máxima de fisura inferior a la indicada en EHE-08.		$\lambda_{36}^V = 5$	$\lambda_{36}^V = 5$	$\lambda_{36}^V = 5$
Se incluyen en el proyecto indicaciones relativas a los encofrados y al tiempo de desencofrado, en función de los elementos de obra.		$\lambda_{37}^V = 5$	$\lambda_{37}^V = 5$	$\lambda_{37}^V = 5$
Se incluyen en el proyecto indicaciones relativas al vertido y compactación del hormigón (conveniencia del bombeo, tipo y tamaño adecuados de vibrador, etc), en función de los elementos de obra.		$\lambda_{38}^V = 5$	$\lambda_{38}^V = 5$	$\lambda_{38}^V = 5$
Porcentaje de hormigón prefabricado sobre el total de la estructura.		$\lambda_{39}^V = 20 \cdot (M_{pref} / M_{tot})$	$\lambda_{39}^V = 20 \cdot (M_{pref} / M_{tot})$	$\lambda_{39}^V = 20 \cdot (M_{pref} / M_{tot})$

1.4. Indicador V4: protección superficial del hormigón

Tabla 58. Aspectos a valorar en el indicador V4 (protección superficial del hormigón) y puntuaciones λ_{4x}^V asociadas

Aspectos a valorar	λ_{4x}^V		
	Clase de exposición		
	Agresividad escasa (I, IIb)	Agresividad de origen químico (IIa, IIIa, IIIb, IIIc, IV / cualquier clase general +Qa, Qb, Qc, F)	Agresividad de origen mecánico (cualquier clase general +E)
No se adopta ninguna medida especial de protección superficial.	$\lambda_{41}^V = 80(*)$	-	-
Se aplica una protección superficial de eficacia media (acrílica, caucho clorado, emulsión polimérica, etc.).	$\lambda_{42}^V = 10 (**)$	$\lambda_{42}^V = 30$	-
Se aplica una protección superficial de eficacia elevada (resina epoxi,	$\lambda_{43}^V = 20 (**)$	$\lambda_{43}^V = 50$	-

poliuretano, etc.).			
Se aplica superficialmente un inhibidor de corrosión migratorio.	$\lambda_{44}^V = 10$ (**)	$\lambda_{44}^V = 30$	-
Se emplea una protección pesada frente a acciones mecánicas (asfalto, vidrio, gres, goma, acero, etc.).	-	-	$\lambda_{45}^V = 50$
Se adoptan medidas para garantizar un incremento de la dureza superficial del hormigón, certificable mediante ensayos.	-	-	$\lambda_{46}^V = 30$
El Plan de Mantenimiento de la estructura incluye indicaciones relativas a la vida esperada de las protecciones superficiales y sus intervalos de renovación.	$\lambda_{47}^V = 10$ (**)	$\lambda_{47}^V = 20$	$\lambda_{47}^V = 20$
<p>(*) Condicionado a la consecución de $\lambda_{31}^V > 40$ según la tabla 51</p> <p>(**) Estas puntuaciones son adicionales a las indicadas para no adopción de ninguna medida.</p>			

1.5. Indicador V5: protección de las armaduras

Tabla 59. Aspectos a valorar en el indicador V5 (protección de las armaduras) y puntuaciones λ_{5x}^V asociadas

Aspectos a valorar	λ_{5x}^V		
	Clase de exposición		
	Agresividad escasa (I, IIb)	Agresividad química moderada (IIa, IIIa, IIIb, IV / cualquiera de las anteriores + Qa, Qb)	Agresividad química elevada (IIIc / cualquier clase general + Qc, F)
No se utiliza ninguna protección especial sobre la armadura.	$\lambda_{51}^V = 100$	$\lambda_{51}^V = 100$ (HM, HP) $\lambda_{51}^V = 70$ (HA)	$\lambda_{51}^V = 100$ (HM, HP) - (HA)
Las armaduras se protegen mediante su galvanizado en caliente.	-	- (HM, HP) $\lambda_{52}^V = 20$ (HA)	- (HM, HP) $\lambda_{52}^V = 50$ (HA)
Las armaduras se protegen mediante un recubrimiento a base de resina epoxídica.	-	- (HM, HP) $\lambda_{53}^V = 20$ (HA)	- (HM, HP) $\lambda_{53}^V = 50$ (HA)
Se emplean armaduras de acero inoxidable en las zonas de la estructura más sometidas a posible degradación.	-	- (HM, HP) $\lambda_{54}^V = 20$ (HA)	- (HM, HP) $\lambda_{54}^V = 70$ (HA)
Se emplean armaduras no metálicas en las zonas de la estructura más sometidas a posible degradación.	-	- (HM, HP) $\lambda_{55}^V = 20$ (HA)	- (HM, HP) $\lambda_{55}^V = 70$ (HA)

Se emplea un sistema de protección catódica.	-	- (HM, HP) $\lambda_{56}^V=20$ (HA)	- (HM, HP) $\lambda_{56}^V=100$ (HA)
Se asegura, durante la ejecución, la continuidad eléctrica de toda la armadura.	-	- (HM, HP) $\lambda_{57}^V=10$ (HA)	- (HM, HP) $\lambda_{57}^V=40$ (HA)

1.6. Indicador V6: evaluación, mediciones y control de la durabilidad

Tabla 60. Aspectos a valorar en el indicador V6 (evaluación, mediciones y control de la durabilidad) y puntuaciones λ_{6x}^V asociadas

Aspectos a valorar	λ_{6x}^V	
	Clase de exposición	
	Agresividad escasa o moderada (I, IIa, IIb, IIIa, IIIb, IV)	Agresividad elevada (IIIc / cualquier clase específica)
Se incluye en el proyecto un cálculo detallado de la vida útil de la estructura, basado en el Anejo 9 de la EHE-08 o en un modelo de durabilidad análogo.	$\lambda_{61}^V=80$	$\lambda_{61}^V=60$
Se contempla la realización en obra de ensayos (destructivos o no destructivos) orientados a evaluar propiedades relacionadas con la durabilidad (porosidad, absorción de agua, permeabilidad de cloruros, resistividad eléctrica, eficacia del curado, resistencia a la abrasión, etc.).	$\lambda_{62}^V=20$	$\lambda_{62}^V=40$ (HM) $\lambda_{62}^V=30$ (HA, HP)
Se especifica en el proyecto un valor límite de resistividad eléctrica para el hormigón.	$\lambda_{63}^V=20$	$\lambda_{63}^V=40$ (HM) $\lambda_{63}^V=30$ (HA, HP)
Se incorporan a la estructura electrodos, sondas u otros elementos que permitan una monitorización de parámetros relacionados con la durabilidad (resistividad, potencial de corrosión, etc.)	-	- (HM) $\lambda_{64}^V=20$ (HA, HP)
Se incluyen en el Plan de Mantenimiento indicaciones relativas a ensayos o medidas a realizar durante la vida útil de la estructura, encaminados a evaluar el estado real y la evolución del posible deterioro de la misma.	$\lambda_{65}^V=20$	$\lambda_{65}^V=20$ (HM) $\lambda_{65}^V=10$ (HA, HP)

Anexo 2: Modelo de la EHE 08

A menos que se indique lo contrario, todas las tablas están sacadas del Anejo 9 “Consideraciones adicionales sobre la durabilidad” de la EHE 08.

El método general de cálculo es el siguiente:

1. Elegir la vida útil del proyecto.
2. Elegir el coeficiente de seguridad de vida útil (normalmente será 1,1)
3. Identificar las clases de exposición ambiental a las que puede estar sometida la estructura identificando para cada clase, el proceso de degradación predominante.
4. Aplicar el siguiente modelo y estimar la vida útil de servicio de la estructura t_L ,
5. Comprobar el Estado Límite para cada uno de los procesos de degradación identificados relevantes para la durabilidad de la estructura.

2.1. Comprobación Estado Límite

En la comprobación del estado límite se debe satisfacer la siguiente condición:

$$t_L > t_d$$

$$t_L = t_i + t_p$$

$$t_d = Y_t t_g$$

Dónde:

- t_L : valor estimado de la vida útil
- t_d : valor de cálculo de la vida útil. Esta se define como el producto de la vida útil del proyecto por un coeficiente de seguridad.
- t_i : período de iniciación
- t_p : período de propagación
- Y_t : coeficiente de seguridad de vida útil, para cuyo valor se adoptará $Y_t = 1,10$
- t_g : vida útil de proyecto

2.2. Período de iniciación

$$t_{inic} = \left(\frac{d}{K}\right)^2$$

Siendo:

- K : Coeficiente que depende del tipo de proceso agresivo, de las características del material y de las condiciones ambientales
- d : Profundidad de penetración del agresivo en mm, para una edad t en años

La EHE diferencia dos tipos de corrosión: la primera debido a la carbonatación y la segunda debido a cloruros.

2.2.1. Modelo de carbonatación

$$t_i = \left(\frac{d}{K_c}\right)^2$$

$$K_c = c_{env} \cdot c_{air} \cdot a \cdot f_{cm}^b$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8$$

Siendo:

- K_c : coeficiente de carbonatación
- f_{cm} : Resistencia media del hormigón a compresión, en N/mm^2 , que puede estimarse a partir de la resistencia característica especificada (f_{ck}).
- c_{air} : coeficiente de aireantes
- c_{env} : coeficiente de ambiente
- a, b : parámetros función del tipo de conglomerante

Tabla 61. Coeficiente de aireantes y de ambiente

Ambiente	c_{env}
Protegido de la lluvia	1
Expuesto a la lluvia	0.5
Aire ocluido (%)	c_{air}
<4,5 %	1
≥4,5 %	0.7

Tabla 62. Coeficientes a y b

Conglomerante	Cementos de la Instrucción RC 03	a	b
Cemento Portland	CEM I CEM II/A CEM II/B-S CEM II/B-L CEM II/B-LL CEM II/B-M CEM V	1800	-1.7
Cemento Portland + 28% cenizas volantes	CEM II/B-P CEM II/B-V CEM IV/A CEM IV/B	360	-1.2
Cemento Portland + 9% humo de sílice	CEM II/A-D	400	-1.2
Cemento Portland + 65 % escorias	CEM III/A CEM III/B	360	-1.2

2.2.2. Modelo de penetración por cloruros

Todos los modelos de penetración por cloruros utilizan un estudio paramétrico para hallar el tiempo de iniciación pues el coeficiente de penetración de cloruros K_{Cl} depende del tiempo.

$$t_{inic} = \left(\frac{d}{K_{Cl}} \right)^2$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot \sqrt{12D(t)} \left(1 - \sqrt{\frac{C_{th} - C_b}{C_s - C_b}} \right)$$

$$D(t) = D(t_0) \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$$

$$C_b \sum_{i=1}^n C_{b,i}$$

Siendo:

- **K_{Cl}**: coeficiente de penetración de cloruros
- **56157**: factor de conversión de unidades
- **D(t)**: coeficiente de difusión efectivo de cloruros, para la edad t, expresado en cm²/s
- **C_{th}**: concentración crítica de cloruros, expresada en % en peso de cemento. En condiciones normales puede adoptarse un valor del 0,6% del peso del cemento. En el caso de armaduras activas pretensas puede adoptarse un valor límite de 0,3% del peso del cemento
- **C_s**: concentración de cloruros en la superficie del hormigón, expresada en % en peso de cemento. Dado que esta concentración de cloruros suele obtenerse en % en peso de hormigón, su equivalente en peso de cemento se puede calcular a partir del contenido de cemento del hormigón (en kg/m³) como:
C_s (% peso de cemento) = C_s (% peso de hormigón) * (2300/contenido de cemento)
- **C_b**: contenido de cloruros aportado por las materias primas (áridos, cemento, agua, etc.), en el momento de fabricación del hormigón. La EHE 08 indica que el contenido total de cloruros en el hormigón debe ser inferior al 0,4 % del peso del cemento. En nuestro estudio hemos utilizado un valor fijo de 0,15%.¹⁸
- **D(t₀)**: es el coeficiente de difusión de cloruros a la edad t₀=0,0767 años
- **n**: factor de edad, que puede tomarse, a falta de valores específicos obtenidos mediante ensayos sobre el hormigón de que se trate, igual a 0,5

Tabla 63. Coeficientes D (t₀) (x10⁻¹²m²/s)

Tipo de cemento	a/c = 0,40	a/c = 0,45	a/c = 0.50	a/c = 0.55	a/c = 0.60
CEM I	8,9	10,0	15,8	19,7	25,0
CEM II/A-V	5,6	6,9	9,0	10,9	14,9
CEM III	1,4	1,9	2,8	3,0	3,4

Tabla 64. Concentración de cloruros en la superficie del hormigón

Clase general de exposición	IIa		IIIb	IIIc	IV
	Distancia respecto a la costa	Hasta 500m	500m – 5000m	Cualquiera	

¹⁸ El contenido de iones cloruro en el agua de Ferrol es prácticamente despreciable. Según datos proporcionados por Emafesa, empresa municipal de aguas de Ferrol, el contenido de iones cloruro en el agua tratada va desde 17 a 24mg/l. La EHE 08 fija un valor máximo de 300 mg/l.

C_s (% peso de cemento)	0,14	0,07	0,72	0,5	0,5
---------------------------	------	------	------	-----	-----

En el caso de que $C_{th}-C_b > C_s$, se considerará comprobado el Estado Límite sin necesidad de efectuar ninguna comprobación numérica.

2.3. Período de propagación

La etapa de propagación se considera concluida cuando se produce una pérdida de sección de la armadura inadmisibles o cuando aparecen fisuras en el recubrimiento de hormigón. El período de tiempo para que se produzca puede obtenerse de acuerdo con la siguiente expresión:

$$t_p = \frac{80 \cdot c}{\emptyset \cdot V_{corr}}$$

Siendo:

- c : Espesor del recubrimiento del hormigón, expresado en mm
- \emptyset : diámetro de la armadura, en mm
- V_{corr} : velocidad de corrosión, expresado en $\mu\text{m/año}$, cuyos valores de referencia se encuentran en la siguiente tabla

Tabla 65. Velocidad de corrosión según la clase de exposición

Clases general de exposición			V_{corr} ($\mu\text{m/año}$)
Normal	Humedad alta	Ila	3
	Humedad media	IIb	2
Marina	Aérea	IIIa	20
	Sumergida	IIIb	4
	En zonas de mareas	IIIc	50
Con cloruros de origen diferente del medio marino		IV	20

2.4. Requisitos de dosificación y resistencias mínimas recomendadas

Tabla 66. Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	Clase de exposición												
		I	Ila	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Máxima relación a/c	Masa	0,65	-	-	-	-	-	-	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	Armado	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	Pretensado	0,60	0,60	0,55	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45	0,45	0,55	0,50	0,50
Mínimo contenido de cemento (kg/m^3)	Masa	200	-	-	-	-	-	-	275	30	325	275	300	275
	Armado	250	275	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300
	Pretensado	275	300	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300

Tabla 67. Resistencias mínimas recomendadas en función de los requisitos de durabilidad¹⁹

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	Clase de exposición												
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Resistencia mínima (N/mm ²)	Masa	20	-	-	-	-	-	-	30	30	35	30	30	30
	Armado	25	25	30	30	30	35	30	30	30	35	30	30	30
	Pretensado	25	25	30	30	35	35	35	30	35	35	30	30	30

Dependiendo de la clase de exposición a la que esté sometida el elemento de hormigón, la EHE 08 proporciona, en su anejo 4, información sobre el cemento recomendado según la aplicación prevista.

Tabla 68. Tipos de cementos en función de las clases de exposición

Clase de exposición	Tipo de proceso (agresividad debida a)	Cementos recomendados
I	Ninguno	Todos los recomendados según la aplicación prevista
II	Corrosión de las armaduras de origen diferente a cloruros	CEM I, cualquier CEM II (preferentemente CEM II/A), CEM III/A, CEM IV/A.
III ²⁰	Corrosión de las armaduras por cloruros de origen marino	Muy adecuados los cementos CEM II/S, CEM II/V (preferentemente los CEM II/B-V), CEM II/P (preferentemente los CEM II/B-P), CEM II/A-D, CEM III, CEM IV (preferentemente los CEM IV/A) y CEM V/A
IV	Corrosión de las armaduras por cloruros de origen no marino	Preferentemente, los CEM I y CEM II/A y, además, los mismos que para la clase de exposición III.
Q ²¹	Ataque al hormigón por sulfatos	Los mismos que para la exposición III
Q	Lixiviación del hormigón por aguas puras, ácidas, o con CO ₂ agresivo	Los cementos comunes de los tipos CEM II/P, CEM II/V, CEM II/A-D, CEM II/S, CEM III, CEM IV y CEM V
Q	Reactividad álcali-árido	Cementos de bajo contenido en alcalinos ²² óxidos de sodio y de potasio)

¹⁹ Estos valores reflejan las resistencias que pueden esperarse con carácter general cuando se emplean áridos de buena calidad y se respetan las especificaciones estrictas de durabilidad incluidas en esta Instrucción. Se trata de una tabla meramente orientativa, al objeto de fomentar la deseable coherencia entre las especificaciones de durabilidad y las especificaciones de resistencia. En este sentido, se recuerda que en algunas zonas geográficas en las que los áridos sólo pueden cumplir estrictamente las especificaciones definidos para ellos en esta Instrucción, puede ser complicado obtener estos valores.

²⁰ En esta clase de exposición es necesario cumplir las prescripciones relativas al empleo de la característica adicional de resistencia al agua de mar (MR), tal y como establece la Instrucción de Hormigón Estructural EHE.

²¹ En esta clase de exposición es necesario cumplir las prescripciones relativas al empleo de la característica adicional de resistencia a los sulfatos (SR), en el caso de la clase específica Qb o Qc, tal y como establece el articulado de esta Instrucción. En los casos en que el elemento esté en contacto con agua de mar será necesario cumplir las prescripciones relativas al empleo de la característica adicional de resistencia al agua de mar (MR).

²² También son recomendables los cementos citados en la tabla A4.2. del anejo 4 de la EHE 08 para hormigones con áridos potencialmente reactivos (que necesitarían cementos con bajo contenido en alcalinos)

Anexos

Pablo García Bernárdez

		en los que $(\text{Na}_2\text{O})_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} (\%) + 0'658 \text{K}_2\text{O} (\%) < 0'60$
--	--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Anexo 3: Modelo del borrador del nuevo Código Estructural español

Todas las ecuaciones han sido sacadas del Anejo 12 “Estimación de la vida útil de las estructuras” del borrador del futuro Código Estructural español.

Al igual que en el resto de modelos, la vida útil se obtiene como el sumatorio de dos periodos: el de iniciación y el de propagación.

$$t_L = t_i + t_p$$

3.1. Período de iniciación

$$t_i = \left(\frac{d}{K}\right)^2$$

Siendo:

- **K**: constante de despasivación
- **d**: profundidad de penetración del agresivo en mm, para una edad *t* en años

3.1.1. Modelo para las clases XC. Carbonatación del hormigón

$$t_i = \left(\frac{d}{K_c}\right)^2$$

El valor de K_c se determinará, preferentemente, de forma experimental, según la UNE 83993-1. En su caso, a falta de datos experimentales, el autor del proyecto podrá estimar su valor a partir de la siguiente expresión.

$$K_c = c_{env} \cdot c_{air} \cdot a \cdot (f_{ck} + 8)^b$$

Siendo:

- **K_c** : coeficiente de carbonatación
- **F_{ck}** : resistencia característica especificada para el hormigón, en N/mm².
- **c_{air}** : coeficiente de aireantes
- **c_{env}** : coeficiente de ambiente
- **a, b**: parámetros adimensionales función del tipo de conglomerante

Tabla 69. Coeficiente de aireantes y de ambiente

Ambiente	c_{env}
Protegido de la lluvia	1
Expuesto a la lluvia	0,5
Elementos enterrados, por encima del nivel freático	0,3
Elementos enterrados, por debajo del nivel freático	0,2
Aire ocluido (%)	c_{air}
<4,5 %	1
≥4,5 %	0,7

Tabla 70. Parámetros a y b para estimar el coeficiente de carbonatación aparente

Conglomerante	a	b
Cemento Portland	1800	-1.7
Cemento Portland + 28% cenizas volantes	360	-1.2
Cemento Portland + 9% humo de sílice	400	-1.2

3.1.2. Modelo para las clases XS o XD. Ingreso de iones cloruros en el hormigón

Todos los modelos de penetración por cloruros utilizan un estudio paramétrico para hallar el tiempo de iniciación pues el coeficiente de penetración de cloruros K_{Cl} depende del tiempo.

$$t_{inic} = \left(\frac{d}{K_{Cl}} \right)^2$$

$$K_{Cl} = 56157 \cdot \sqrt{12D(t)} \left(1 - \sqrt{\frac{C_{th} - C_b}{C_s - C_b}} \right)$$

$$D(t) = k_e D(t_0) \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$$

$$C_b \sum_{i=1}^n C_{b,i}$$

Siendo:

- K_{Cl} : coeficiente de penetración de cloruros
- **56157**: factor de conversión de unidades
- C_{th} : concentración crítica de cloruros, expresada en % en peso de cemento. Para todas las clases de exposición excepto para la XD3 puede adoptarse un valor del 0,6% del peso del cemento. En el caso de ésta última se adopta el valor del 0,4% del peso del cemento.
- C_s : concentración de cloruros en la superficie del hormigón, expresada en % en peso de cemento. A falta de información específica adicional, puede obtenerse de la siguiente tabla.

Tabla 71. Concentración de cloruros en la superficie del hormigón

Clase general de exposición	XS1			XS2	XS3	XD1,XD2,XD3
	Distancia respecto a la costa	Zona de spray, próxima a la zona de salpicaduras	Hasta 500m	500m – 5000m	Cualquiera	
C_s (% peso de cemento)	0,25	0,15	0,15	0,4	0,5	0,4

- C_b : contenido de cloruros aportado por las materias primas (áridos, cemento, agua, etc.), en el momento de fabricación del hormigón, expresados en porcentaje al peso del cemento.
- $D(t)$: coeficiente de difusión efectivo de cloruros, para la edad t, expresado en cm^2/s
- $D(t_0)$: coeficiente de difusión de cloruros a la edad $t_0=0,0767$ años

Tabla 72. Coeficientes $D(t_0)$ ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)

Valores de $D(t_0)$ ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)					
Tipo de conglomerantes	Relación ²³				
	0,40	0,45			
CEM I	8,9	10,0			
CEM I con adición de hasta el 22% de cenizas volantes	5,6	6,9			
CEM III/B	1,4	1,9			

- **n**: factor de edad, que, a falta de valores específicos obtenidos mediante ensayos sobre el hormigón de que se trate, puede obtenerse de la siguiente tabla tabla 73

Tabla 73. Coeficiente de envejecimiento, n

Relación a/c	Tipo de cemento	Coeficiente de envejecimiento
Entre 0,40 y 0,50	CEM I	0,3
Otros casos		0,5

- **k_e** : coeficiente que depende de la temperatura media ambiental, T_{real} , expresada en °C, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$k_e = e^{4800 \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + T_{real}} \right)}$$

3.2. Período de propagación

La etapa de propagación se considera concluida cuando se produce una pérdida de sección de la armadura inadmisibles o cuando aparecen fisuras en el recubrimiento de hormigón. El período de tiempo para que se produzca puede obtenerse de acuerdo con la siguiente expresión:

$$t_p = \frac{80 \cdot c}{\emptyset \cdot V_{corr}}$$

Siendo:

- **c**: espesor del recubrimiento del hormigón, expresado en mm
- **\emptyset** : diametro de la armadura, en mm
- **V_{corr}** : velocidad de corrosión, expresado en $\mu\text{m}/\text{año}$, cuyos valores de referencia se encuentran en la siguiente tabla:

²³ La relación agua/conglomerante equivalente $(a/c)_{eq}$ se obtendrá considerando tanto el contenido de clínker, como los de las adiciones, ponderados en este caso por sus correspondientes coeficientes de eficacia

Tabla 74. Velocidad de corrosión según la clase de exposición

Clases general de exposición			V_{corr} ($\mu\text{m/año}$)
Ambiente normal	Seco o permanentemente húmedo	XC1	1
	Humedad alta	XC2	4
	Humedad media	XC3	2
	Ciclos humedad – secado	XC4	5
Ambiente marino	Expuesto a aerosoles marinos	XS1	20
	Sumergido permanentemente	XS2	4
	En zonas de mareas o salpicaduras	XS3	50
Ambiente no marino	Humedad moderada	XD1	35
	Humedad alta	XD2	20
	Ciclos humedad – secado	XD3	35

Anexo 4: Modelo propuesto por Jiménez Montoya

Todos los datos utilizados pertenecen al capítulo 10 del libro “Hormigón Armado” de Jiménez Montoya.

$$t_L = t_i + t_p$$

Siendo:

- t_L : tiempo de vida útil
- t_i : tiempo de iniciación
- t_p : tiempo de propagación

4.1. Período de iniciación

$$t_{inic,desp} = \left(\frac{c}{k_{desp}} \right)^2$$

Dónde:

- c : recubrimiento mínimo
- k_{desp} : constante de despasivación, definida de acuerdo a las siguientes expresiones:
 $k_{desp} = k_{ap,carb}$ en el caso de carbonatación
 $k_{desp} = k_{ap,cl}$ en el caso de cloruros

4.1.1. Clases XC (Carbonatación)

De acuerdo con el código Modelo fib 2010, se puede obtener:

$$k_{ap,carb} = W(t) \cdot k_c$$

$$W(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} \cdot ToW)^{b_w}}{2}}$$

$$k_c = \sqrt{1.64 \cdot 10^{-3} \cdot k_e \cdot k_x \cdot (1.25 \cdot R_{ACC,0}^{-1} + 10^{-11})}$$

$$ToW = \frac{\text{promedio anual días de lluvia}}{365}$$

$$k_x = 3.01 \cdot t_c^{-0.567}$$

$$k_e = 1.361 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH_{real}}{100} \right)^5 \right]^{2.5}$$

Siendo:

- $W(t)$: función de clima
- k_c : constante de carbonatación
- t_0 : edad de referencia, que toma un valor de 0.0767 años
- p_{SR} : factor de viento. Para elementos interiores es igual a 0 y para exteriores igual a 1
- ToW : probabilidad de lluvia
- b_w : constante que toma un valor igual a 0,446

- k_e : factor ambiental
- k_x : factor de ejecución
- $R^{-1}_{ACC,0}$: inversa de la carbonatación efectiva
- RH_{real} : humedad relativa media en %
- t_c : período de curado

Tabla 75. Valores de $R^{-1}_{ACC,0}$

Valores de $R^{-1}_{ACC,0}$ [$10^{-11} (m^2/s)/(kg/m^3)$] ²⁴					
Tipo de conglomerante	Relación ²⁵				
	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
CEM I	3,1	5,2	6,8	9,8	13,4
CEM II-A/V, CEM II-B/V CEM I con adición de hasta el 35% de cenizas volantes	0,3	1,9	2,4	6,5	8,3
CEMM II-A/S, CEM III/A, CEM III/B CEM I con adición de hasta el 65 % de escorias de alto horno	8,3	16,9	26,6	44,3	80,0

4.1.2. Clases XS o XD (Cloruros)

$$K_{ap,cl} = 56157 \cdot \sqrt{12D(t)} \left(1 - \sqrt{\frac{C_{th} - C_b}{C_s - C_b}} \right)$$

$$D(t) = k_e D(t_0) \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$$

$$C_b \sum_{i=1}^n C_{b,i}$$

Siendo:

- $K_{ap,cl}$: coeficiente de penetración de cloruros
- **56157**: el factor de conversión de unidades
- $D(t)$: Coeficiente de difusión efectivo de cloruros, para la edad t , expresado en cm^2/s
- C_{th} : Contenido de cloruros en el hormigón que provoca el inicio de la corrosión. A falta de datos se puede tomar 0.60% del peso del cemento
- C_s : Contenido de cloruros en la superficie del hormigón expresados en porcentaje respecto al peso de cemento. A falta de información, se obtiene de la tabla 77
- C_b : Contenido de cloruros aportado por las materias primas (áridos, cemento, agua, etc.), en el momento de fabricación del hormigón
- $D(t_0)$: coeficiente de difusión de cloruros a la edad $t_0 = 0.0767$ años, obtenido por uno de los siguientes procedimientos:

²⁴ El autor del proyecto podrá adoptar otros valores de $R^{-1}_{ACC,0}$ siempre que sean deducidos experimentalmente a partir de ensayos de carbonatación

²⁵ La relación agua/conglomerante equivalente $(a/c)_{eq}$ se obtendrá considerando tanto el contenido de clínker, como los de las adiciones, ponderados en este caso por sus correspondientes coeficientes de eficacia

- Experimentalmente, a partir de ensayos específicos de difusión de cloruros, según la norma NT BUIL 492, de acuerdo con lo indicado por el autor del proyecto
- Tabla 76
- **n**: factor de edad, que puede tomarse, a falta de valores específicos obtenidos mediante ensayos sobre el hormigón de que se trate, igual a 0,5
- **k_e**: coeficiente que depende de la temperatura media ambiental, T_{real}, expresada en °C, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$k_e = e^{4800 \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + T_{real}} \right)}$$

Tabla 76. Coeficientes D(t₀) (x10⁻¹²m²/s)

Valores de D(t ₀) (x10 ⁻¹² m ² /s)					
Tipo de conglomerantes	Relación ²⁶				
	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
CEM I	8,9	10,0	15,8	19,7	25,0
CEM I con adición de hasta el 22% de cenizas volantes	5,6	6,9	9,0	10,9	14,9
CEM III/B	1,4	1,9	2,8	3,0	3,4

Tabla 77. Concentración de cloruros en la superficie del hormigón

Clase general de exposición	XS1			XS2	XS3	XD1,XD2,XD3
	Zona de spray, próxima a la zona de salpicaduras	Hasta 500m	500m – 5000m	Cualquiera		-
C _s (% peso de cemento)	0,25	0,15	0,10	0,35	0,45	0,4

4.2. Período de propagación

$$t_p = \frac{80 \cdot c}{\emptyset \cdot V_{corr}}$$

Siendo:

- **c**: espesor del recubrimiento del hormigón, expresado en mm
- **∅**: diámetro de la armadura, en mm
- **V_{corr}**: velocidad de corrosión, expresado en μm/año, cuyos valores de referencia se encuentran en la siguiente tabla:

²⁶ La relación agua/conglomerante equivalente (a/c)_{eq} se obtendrá considerando tanto el contenido de clínker, como los de las adiciones, ponderados en este caso por sus correspondientes coeficientes de eficacia

Tabla 78. Velocidad de corrosión según la clase de exposición

Clases general de exposición	V_{corr} ($\mu\text{m/año}$)
XC	1 - 5
XS	4 - 50
XD	20 - 35

Anexo 5: Código Modelo 2010 de la FIB

Sólo estudiaremos la corrosión debido a la carbonatación. Todas las ecuaciones pertenecen al Anexo C del boletín 34 de la norma.

La siguiente ecuación se basa en la difusión como el mecanismo de transporte predominante dentro del hormigón (primera ley de difusión de Fick). Se supone que el coeficiente de difusión del dióxido de carbono a través del material es una propiedad constante del material, aunque el coeficiente de difusión de CO₂ para un hormigón durante la vida útil puede ser función de numerosas variables.

$$x_{c,d}(t_{SL}) = \sqrt{2 \cdot k_{e,d} \cdot k_{c,d} \cdot C_{s,d}(k_{t,d} \cdot R_{ACC,0,k}^{-1} \cdot \gamma_R + \varepsilon_{t,d}) \cdot \sqrt{t_{SL}} \cdot W(t_{SL})}$$

Siendo:

- **W(t)**: función de clima
- **k_{e,d}**: valor de diseño del factor ambiental
- **k_{c,d}**: valor de diseño del factor de ejecución
- **k_{t,d}**: valor de diseño del parámetro de regresión. Es constante e igual 1,25
- **t_{SL}**: valor de diseño del tiempo de servicio
- **R⁻¹_{ACC,0,k}**: inversa de la carbonatación efectiva en (mm²/años)/(kg/m³)
- **γ_R**: factor de seguridad igual a 1,5
- **ε_{t,d}**: término de error igual a 315,5
- **C_{s,d}**: valor de diseño de la concentración de CO₂ en kg / m³. Es igual a 0.00082

Tabla 79. Factor de ejecución en función del tiempo de curado

Período de curado en días	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
k_{c,d}	3,00	2,03	1,61	1,37	1,20	1,09	1,00	0,92	0,86	0,81	0,77	0,73	0,70	0,67

$$k_{e,d} = \left[\frac{1 - \left(\frac{RH_{real}}{\gamma_{RH} 100} \right)^5}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^5} \right]^{2.5}$$

Siendo:

- **RH_{real}**: humedad relativa media en %
- **RH_{ref}**: humedad relativa de referencia igual a 65%
- **γ_{RH}**: factor de seguridad de la humedad relativa igual a 1,3

$$W(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} \cdot ToW)^{b_w}}{2}}$$

- **t₀**: edad de referencia, que toma un valor de 0.0767 años
- **p_{SR}**: factor "tiempo". Para elementos interiores es igual a 0 y para elementos exteriores horizontales igual a 1. Para elementos exteriores verticales se necesita información sobre la distribución del viento.
- **ToW**: probabilidad de lluvia

$$ToW = \frac{\text{promedio anual dias de lluvia}}{365}$$

- **b_w**: constante que toma un valor igual a 0,446

Tabla 80. Valores de $R^{-1}_{ACC,0}$

Valores de $R^{-1}_{ACC,0}$ [$10^{-11} (m^2/s)/(kg/m^3)$] ²⁷						
Tipo de conglomerante	Relación ²⁸					
	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
CEM I 42.5 R	-	3,1	5,2	6,8	9,8	13,4
CEM I 42.5 R + FA (k=0,5)	-	0,3	1,9	2,4	6,5	8,3
CEM I 42.5 R + SF (k=2,0)	3,5	5,5	-	-	16,5	-
CEM III/B 42.5	-	8,3	16,9	26,6	44,3	80,0

²⁷ El autor del proyecto podrá adoptar otros valores de $R^{-1}_{ACC,0}$ siempre que sean deducidos experimentalmente a partir de ensayos de carbonatación

²⁸ La relación agua/conglomerante equivalente $(a/c)_{eq}$ se obtendrá considerando tanto el contenido de clínker, como los de las adiciones, ponderados en este caso por sus correspondientes coeficientes de eficacia

Anexo 6: Ficha técnica de las correas prefabricadas



PREFHOR, s.l.

Avda. del Cementerio, 125 - 161
37500 CIUDAD RODRIGO (Salamanca)
email: info@prefhor.com
web: www.prefhor.com

Tel. 923 49 84 84
Móvil 639 83 83 01
Fax 923 48 00 15



Productos > Edificación Residencial > Viguetas

Ref. F01S01P02 Ver. 1.0 Fecha 05/10/2009

VIGUETAS (Ficha Técnica completa F01S01P01A002)

Vigueta Pretensada T-18

PESO = 29 Kg/ml

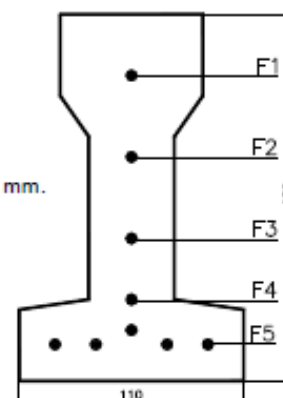
FABRICACIÓN SEGÚN TIPO Y MEDIDAS

T-18-7 de 2,20 a 3,80 m.
T-18-8 de 4,00 a 4,80 m.
T-18-9 de 5,00 a 6,00 m.

Las medidas de fabricación son cada 20 cm.

*Para otras medidas consultar fabricación.

Cotas en mm.



		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
SITUACION de las ARMADURAS	F1	1Ø4	1Ø4	1Ø4	1Ø4	1Ø4	1Ø4	1Ø5	1Ø5	1Ø5	1Ø5
	F2					1Ø4	1Ø4				1Ø5
	F3		1Ø4	1Ø4	1Ø4	1Ø4	1Ø4		1Ø5	1Ø5	1Ø5
	F4	1Ø4	1Ø4		1Ø4		1Ø4	1Ø5		1Ø5	
	F5	2Ø4	1Ø5	3Ø4	3Ø4	5Ø4	5Ø4	2Ø5	3Ø5	3Ø5	5Ø5

TIPO DE VIGUETA	FLEXIÓN POSITIVA		FLEXIÓN NEGATIVA		Rigidez (1)	Cortante Vu
	Momento	Momento	Momento	Momento		
	Último	Ejec. vano	Último	Ejec. s/sop		
	m·kN	m·kN	m·kN	m·kN	kN·m ²	KN
T1	7,20	2,99	2,89	1,81	1374	13,16
T2	8,37	3,35	3,26	2,01	1374	14,60
T3	8,73	3,87	3,14	1,82	1380	14,60
T4	9,58	4,66	3,26	1,72	1384	16,04
T5	10,48	6,07	4,47	1,84	1402	18,94
T6	10,78	7,02	4,52	1,76	1406	20,39
T7	9,77	4,60	4,21	2,03	1394	16,40
T8	10,09	5,73	4,45	2,02	1404	18,67
T9	10,58	6,91	4,54	1,88	1410	20,94
T10	11,40	7,45	5,12	0,62	1438	25,50

Características:

Vigueta de hormigón pretensado

Utilizada en la elaboración de forjados unidireccionales que pueden funcionar como autoportantes según luces y cargas (forjado de saneamiento)

También pueden usarse como correas en cubiertas



PREFHOR, s.l.

Avda. del Cementerio, 125 - 161
37500 CIUDAD RODRIGO (Salamanca)
email: info@prefhor.com
web: www.prefhor.com

Tel. 923 49 84 84
Móvil 699 83 83 01
Fax 923 48 00 15



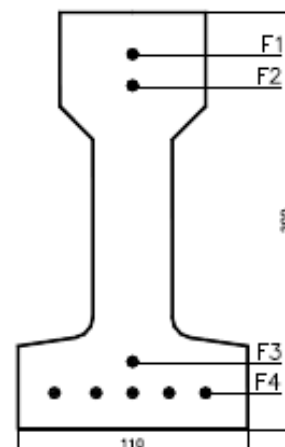
Productos > Edificación Residencial > Viguetas

Ref. F01S01P03 Ver. 1.0 Fecha 05/10/2009

VIGUETAS (Ficha Técnica completa F01S01P03A003)

Vigueta Pretensada T-20

PESO = 29,6 Kg/ml



Cotas en mm.

FABRICACIÓN SEGÚN TIPO Y MEDIDAS

T-20-4

Las medidas de fabricación son bajo encargo.

		T1	T2	T3	T4	T5
SITUACION de las ARMADURAS	F1	1 Ø 5	1 Ø 5	1 Ø 5	1 Ø 5	1 Ø 5
	F2	-	-	-	1 Ø 5	1 Ø 4
	F3	-	-	1 Ø 5	1 Ø 5	1 Ø 5
	F4	2 Ø 5	3 Ø 5	3 Ø 5	4 Ø 5	5 Ø 5

TIPO DE VIGUETA	FLEXIÓN POSITIVA		FLEXIÓN NEGATIVA		Rigidez (1) kN·m ²	Cortante Vu KN
	Momento Último m·kN	Momento Ejec. vano m·kN	Momento Último m·kN	Momento Ejec.s/sop m·kN		
	T1	8,82	3,28	4,81		
T2	12,37	5,54	4,74	2,20	1913	13,47
T3	13,38	7,49	4,79	1,88	1928	15,02
T4	14,37	9,13	4,70	1,33	1948	15,92
T5	14,10	9,16	7,82	1,80	1989	18,70

Características:

Vigueta de hormigón pretensado
Utilizada en la elaboración de forjados unidireccionales que pueden funcionar como autoportantes según luces y cargas (forjado de saneamiento)
También pueden usarse como correas en cubiertas



PREFHOR, s.l.

Avda. del Cementerio, 125 - 161
37500 CIUDAD RODRIGO (Salamanca)
email: info@prefhor.com
web: www.prefhor.com

Tel. 923 49 84 84
Móvil 639 83 83 01
Fax 923 48 00 15



Productos > Edificación Residencial > Viguetas

Ref. F01S01P04 Ver. 1.0 Fecha 05/10/2009

VIGUETAS (Ficha Técnica completa F01S01P03A004)

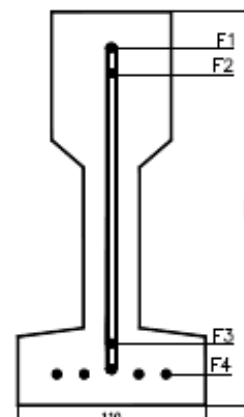
Vigueta Pretensada T-23

PESO = 36,1 Kg/ml

FABRICACIÓN SEGÚN TIPO Y MEDIDAS T-23-10

Las medidas de fabricación son bajo encargo.

Cotas en mm.



		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
SITUACION de las ARMADURAS	F1	1Ø4	1Ø4	1Ø4	1Ø4	1Ø4	1Ø5	1Ø5	1Ø5	1Ø5	1Ø5
	F2				1Ø4	1Ø4			1Ø5	1Ø5	1Ø5
	F3	1Ø4		1Ø4		1Ø4	1Ø5		1Ø5		1Ø5
	F4	2Ø4	3Ø4	3Ø4	5Ø4	5Ø4	2Ø5	3Ø5	3Ø5	5Ø5	5Ø5

TIPO DE VIGUETA	FLEXIÓN POSITIVA		FLEXIÓN NEGATIVA		Rigidez (1)	Cortante Vu
	Momento Último	Momento Ejec. vano	Momento Último	Momento Ejec.s/sop		
	m·kN	m·kN	m·kN	m·kN		
T1	9,82	4,02	3,89	2,71	2855	13,36
T2	10,13	4,24	3,74	2,51	2862	13,36
T3	12,76	5,58	3,88	2,22	2875	14,96
T4	15,83	6,98	6,65	3	2922	17,68
T5	17,79	8,44	6,69	2,71	2935	19,04
T6	14,31	6,43	5,76	2,93	2900	16,66
T7	14,80	6,79	5,53	2,62	2911	16,66
T8	17,03	7,99	10	4,39	2961	20,92
T9	19,26	10,90	9,51	3,35	3004	23,06
T10	19,92	12,69	9,47	2,88	3023	25,20

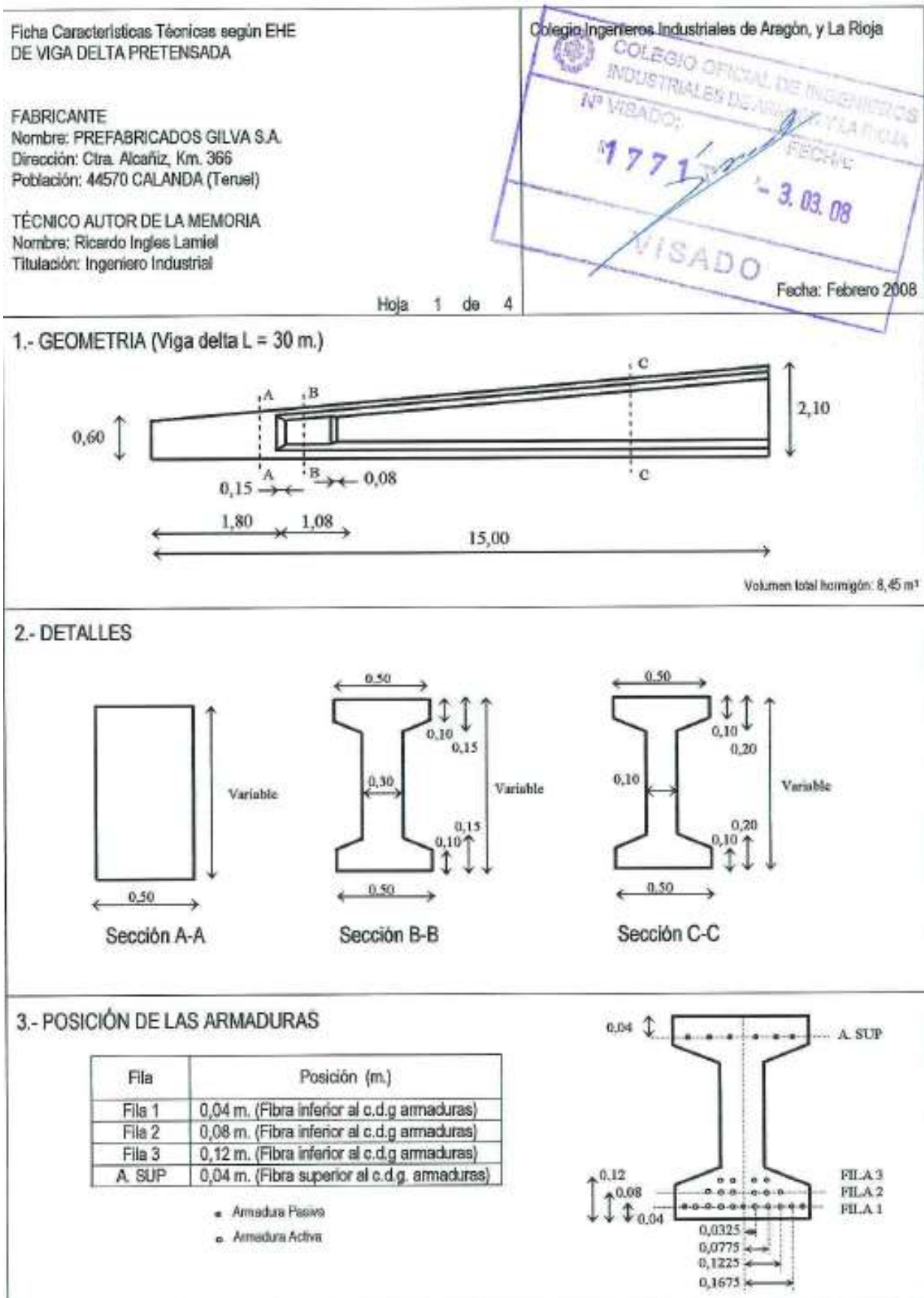
Características:

Vigueta de hormigón pretensado

Utilizada en la elaboración de forjados unidireccionales que pueden funcionar como autoportantes según luces y cargas (forjado de saneamiento)

También pueden usarse como correas en cubiertas

Anexo 7: Ficha técnica de las vigas prefabricadas



Ficha Características Técnicas según EHE
DE VIGA DELTA PRETENSADA

FABRICANTE

Nombre: PREFABRICADOS GILVA S.A.
Dirección: Ctra. Alcañiz, Km. 366
Población: 44570 CALANDA (Teruel)

TÉCNICO AUTOR DE LA MEMORIA

Nombre: Ricardo Ingles Lamiel
Titulación: Ingeniero Industrial

Colegio Ingenieros Industriales de Aragón y La Rioja



Hoja 2 de 4

4.- MATERIALES (Viga delta L = 30 m.)

HORMIGÓN DE LA VIGA	HP-40	$f_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$	$\gamma_c = 1,50$
ACERO DE PRETENSAR CORDON Alargamiento rotura 4%	Y-1880 S7	$f_{pk} = 1.636 \text{ N/mm}^2$	$\gamma_s = 1,15$
ACERO ARMADURA PASIVA	B-500 S	$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$	$\gamma_s = 1,15$
	B-500 SD	$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$	$\gamma_s = 1,15$

Nota: El recubrimiento será acorde al ambiente de exposición del elemento en obra.

5.- ARMADO DE LA VIGA DELTA

Situación de las armaduras

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Fila 1 (Armadura activa)	8ø 0,5"	8ø 0,5"	8ø 0,5"	8ø 0,5"	8ø 0,5"	8ø 0,5"	8ø 0,5"
Fila 2 (Armadura activa)		2ø 0,5"	4ø 0,5"	6ø 0,5"	6ø 0,5"	6ø 0,5"	6ø 0,5"
Fila 3 (Armadura activa)					2ø 0,5"	4ø 0,5"	2ø 0,5"
Fila 1 (Armadura pasiva)							3ø 16
Tensión inicial (N/mm ²)	1.395	1.395	1.395	1.395	1.395	1.395	1.395

Armadura de piel

ø8	Separación máxima 30 cm.
----	--------------------------

Armadura operación de izado



A. Superior	6 ø 16
L_izado	4,00 m. desde los extremos
L_izado	10,00 m. desde los extremos

Ficha Características Técnicas según EHE
DE VIGA DELTA PRETENSADA

FABRICANTE
Nombre: PREFABRICADOS GILVA S.A.
Dirección: Ctra. Alcañiz, Km. 366
Población: 44570 CALANDA (Teruel)

TÉCNICO AUTOR DE LA MEMORIA
Nombre: Ricardo Ingles Lamiel
Titulación: Ingeniero Industrial

Colegio Ingenieros Industriales de Aragón y La Rioja

Fecha: Febrero 2008

Hoja 3 de 4

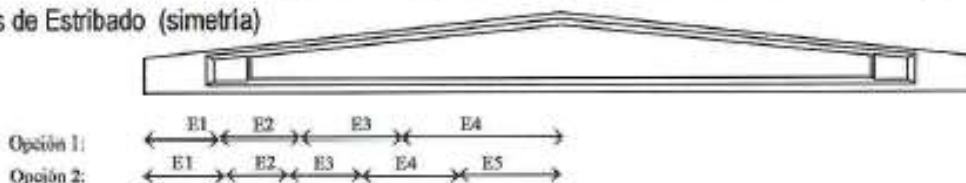
6.- CARACTERISTICAS MECANICAS DE LAS VIGAS (Viga delta L = 30 m.)

Tipo de Armado	σ Transversal (N/mm ²)		FLEXIÓN POSITIVA			Zonas de Etribado (simetría)					
	σ _{sup}	σ _{inf}	Carga máxima (kN/m)	Carga de Servicio según Ambiente (kN/m)			Zona E1	Zona E2	Zona E3	Zona E4	Zona E5
				I	II, III, IV	F, G, Q ₁ , Q ₂					
T1	7,83	-1,88	4,85	4,85	3,20	2e ∅ 8 c/15 cm. L1 = 1,80 m.	e ∅ 8 c/15 cm. L2 = 1,70 m.	e ∅ 8 c/20 cm. L3 = 4,00 m.	e ∅ 8 c/30 cm. L4 = 7,50 m.		
T2	10,28	-1,74	7,21	7,21	5,25	2e ∅ 8 c/10 cm. L1 = 1,80 m.	e ∅ 8 c/10 cm. L2 = 2,20 m.	e ∅ 8 c/20 cm. L3 = 3,50 m.	e ∅ 8 c/30 cm. L4 = 7,50 m.		
T3	13,16	-1,67	9,47	9,47	7,18	2e ∅ 8 c/10 cm. L1 = 1,80 m.	e ∅ 8 c/10 cm. L2 = 2,20 m.	e ∅ 8 c/15 cm. L3 = 2,00 m.	e ∅ 8 c/20 cm. L4 = 1,50 m.	e ∅ 8 c/30 cm. L5 = 7,50 m.	
T4	15,98	-2,31	11,58	11,58	9,00	2e ∅ 8 c/7,5 cm. L1 = 1,80 m.	e ∅ 8 c/7,50 cm. L2 = 1,70 m.	e ∅ 8 c/10 cm. L3 = 2,50 m.	e ∅ 8 c/20 cm. L4 = 2,00 m.	e ∅ 8 c/30 cm. L5 = 7,00 m.	
T5	18,59	-1,03	14,04	14,04	10,64	2e ∅ 8 c/7,5 cm. L1 = 1,80 m.	e ∅ 8 c/7,5 cm. L2 = 1,70 m.	e ∅ 8 c/10 cm. L3 = 3,00 m.	e ∅ 8 c/20 cm. L4 = 1,50 m.	e ∅ 8 c/30 cm. L5 = 7,00 m.	
T6	21,14	-1,55	15,92	15,92	12,20	2e ∅ 8 c/5 cm. L1 = 1,80 m.	e ∅ 8 c/5 cm. L2 = 2,20 m.	e ∅ 8 c/10 cm. L3 = 3,00 m.	e ∅ 8 c/20 cm. L4 = 2,00 m.	e ∅ 8 c/30 cm. L5 = 6,00 m.	
T7	18,83	-1,07	15,93	15,93	10,70	2e ∅ 8 c/5 cm. L1 = 1,80 m.	e ∅ 8 c/5 cm. L2 = 2,20 m.	e ∅ 8 c/10 cm. L3 = 3,00 m.	e ∅ 8 c/20 cm. L4 = 2,00 m.	e ∅ 8 c/30 cm. L5 = 6,00 m.	

Zonas de Entubado (simetría)

- T1: 2 No es necesario entubar
- T2: 2 cordones de la fila 1 entubados 1,50 m.
- T3: 4 cordones de la fila 1 entubados 1,50 m.
- T4: 6 cordones de la fila 1 entubados 2,50 m
- T5: 8 cordones de la fila 1 entubados 3,00 m.
- T6 y T7: 8 cordones de la fila 1 entubados 2,50 m.

Zonas de Etribado (simetría)



Las acciones derivadas del peso propio de la delta están incluidas en la obtención de los valores de carga reflejados.

Los valores de carga máxima corresponden con valores de servicio, donde se han utilizado como coeficientes de mayoración $\gamma_s = 1,50$ para las acciones variables y $\gamma_p = 1,35$ para las cargas permanentes.

La carga de servicio sobre la viga proveniente de las acciones debe ser menor que el valor de carga reflejado de acuerdo a la clase de exposición.

La armadura correspondiente a los estribos es la necesaria para verificar los esfuerzos existentes originados por la carga máxima.

Definición de los estribos: e ∅ - c/ - cm. = Estribo simple (2 ramas por estribo).

2 e ∅ - c/ - cm. = Estribo doble (4 ramas por estribo).

Ficha Características Técnicas según EHE
DE VIGA DELTA PRETENSADA

FABRICANTE

Nombre: PREFABRICADOS GILVA S.A.
Dirección: Ctra. Alcañiz, Km. 366
Población: 44570 CALANDA (Teruel)

TÉCNICO AUTOR DE LA MEMORIA

Nombre: Ricardo Ingles Lamiel
Titulación: Ingeniero Industrial

Colegio Ingenieros Industriales de Aragón y La Rioja



Hoja 4 de 4

Fecha: Febrero 2008

7.- CARACTERÍSTICAS MECANICAS Y GEOMETRICAS SECCIÓN REFERENCIA (Viga delta L = 30 m.)

Tipo de Armado	FLEXIÓN POSITIVA				
	Inercia (cm ⁴)		Módulo Resistente (cm ³)		Momento de fisuración (kN m)
	Homogeneizada	Fisurada	Inferior	Superior	
T1	20012025	4865347	189294	191905	1754,72
T2	20089309	5226688	190454	192208	2039,00
T3	20106209	5719428	191613	192507	2309,30
T4	20242729	6160915	192772	192804	2566,29
T5	20311067	6551841	193833	193046	2803,52
T6	20379069	6882457	194893	193286	3029,66
T7	20595688	7049825	198123	194214	2819,77

8.- RESISTENCIA CARACTERÍSTICA MINIMA DEL HORMIGON EN LA ETAPA DE TRANSFERENCIA

Tipo de Armado	σ Transferencia (N/mm ²)	f_{ct} Transferencia (N/mm ²)
	σ_p Sin fisuras	
T1	7,83	13,05
T2	10,28	17,13
T3	13,16	21,93
T4	15,98	26,63
T5	18,58	30,98
T6	21,14	35,23
T7	18,83	31,38

En la obtención del momento de fisuración se ha utilizado el valor medio de resistencia a tracción del hormigón, de acuerdo a formulación según instrucción EHE art.º 39.

El valor correspondiente al momento de inercia homogeneizado corresponde al momento de inercia baricentrico de la sección.

Los valores correspondientes a los módulos resistentes, tanto para la fibra inferior y superior corresponden con la sección homogeneizada.