



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

# DISEÑO ÓPTIMO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO Y PRETENSADO CONSIDERANDO LA VIDA ÚTIL COMO REQUISITO PRESTACIONAL

Treball realitzat per:  
**Arántzazu España Roch**

Dirigit per:  
**Dr. Jesús Miguel Bairán García**

Màster en:  
**Ingeniería Estructural y de la Construcción**

Barcelona, mayo de 2017

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

**TREBALL FINAL DE MÀSTER**



## AGRADECIMIENTOS.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que de una forma u otra me han ayudado y apoyado durante la realización de este TFM.

En primer lugar, quiero dar las gracias al director del trabajo, el Dr. Jesús Miguel Bairán García, por su inestimable ayuda y por todo lo que me ha enseñado a lo largo de este máster.

Asimismo, agradezco también la ayuda a todos los compañeros, pues he tenido la suerte de coincidir con, seguramente, la mejor promoción. Me han ayudado, me han dado ánimos y, sobre todo, hemos compartido momentos inolvidables.

También quería dar las gracias a mi familia que, aunque lejos, han sabido apoyarme en todo momento y mostrar hacia mí una confianza incondicional.

Por último y más importante, quería dar mi más profundo agradecimiento a Carlos, la persona que ha estado conmigo en cada momento. Me ha sabido escuchar, ha permitido que le explicase cada uno de mis problemas o ideas, y ha conseguido, siempre, inspirarme para encontrar la solución.



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

## RESUMEN.

La corrosión del acero de refuerzo es una de las principales causas de deterioro en las estructuras de hormigón. Las principales consecuencias de la corrosión de las armaduras son la reducción de la sección transversal de la barra, el desprendimiento y fisuración del recubrimiento y el deterioro de las características de adherencia entre el hormigón y el acero. Dichas consecuencias conllevan a la disminución de la capacidad portante máxima, la pérdida de la capacidad de servicio y la seguridad estructural.

En la actualidad existen dos teorías sobre si afecta o no la fisuración en la corrosión de las armaduras, llegando a ser contradictorias. La normativa española, EHE-08 (Gobierno de España, 2008) trata la fisuración con una de las teorías en el artículo 49º del Capítulo 11, prescribiendo anchos de fisura variables en función del ambiente, que pueden llegar a condicionar el diseño, mientras que en el método del Anejo 9 no considera la influencia de la fisuración.

Los códigos y normativas consideran que los criterios de durabilidad se deben satisfacer en términos de ancho de fisura, recubrimiento del hormigón y cantidad de cemento, los cuales deben ser satisfechos independientemente. Por este motivo, la fisuración tiene una gran influencia en la comprobación de la durabilidad y limitar la fisura es fundamental. Sin embargo, estos parámetros interactúan entre sí, abriendo la posibilidad de un diseño optimizado para una vida útil equivalente, no considerada en las normativas actuales, que pueden hacer que, aunque aparezcan microfisuras, la estructura siga teniendo la durabilidad adecuada para el tiempo para el que ha sido proyectado.

El objetivo de este TFM es estudiar cómo afecta la fisura en el cálculo de la durabilidad y determinar cuáles son los criterios para un diseño optimizado, en el que se tengan en cuenta factores como el recubrimiento y las características del hormigón, con un ancho de fisura menor que 0,5 mm. De este modo, se hará una comparativa sobre la armadura necesaria para cumplir con la normativa y la armadura necesaria en el caso del diseño optimizado.

## ABSTRACT.

Corrosion of reinforcing steel is one of the main causes which leads to the deterioration of concrete structures. The most significant consequences of above mentioned corrosion are: the reduction of cross-section of the reinforcing bars, spalling, loss of bond stress and cracking of the concrete cover, which in turn, could affect the concrete load capacity, serviceability and structural safety.

Currently, there are two theories concerning the influence of concrete cracking on the corrosion of steel reinforcement, which are contradictory. The Article 49 of the Spanish Code on Structural Concrete (EHE-08) states that the crack width, which depends on the environment, has an influence on design process of the concrete structures. However, the crack width should not be considered as a parameter during the designing, according to the information, which is provided in Annex 9 of above mentioned code.

Also, codes and standards state that the durability of concrete structure must meet the next requirements: established values concerning the crack width, concrete cover and water/cement ratio. It should be highlighted that above mentioned parameters are to be considered independently of each other. As it is possible to notice, cracking of the concrete has a significant influence on concrete design, therefore the reducing of crack widths is a crucial task. Nevertheless, above-named parameters are closely interrelated what gives the opportunity to optimize the design for service life of the structure which permits the certain appearance of microcracks while maintaining the appropriate durability for the established period of project.

The objective of this research is to study the cracks influence on the calculations concerning the durability of structure in order to determine the main criteria for the optimized design method which considers the next factors: the concrete cover and concrete type provided that the crack width is less than 0,5mm. For this purpose, it will be made a comparative between the required reinforcement to comply with the regulations and the calculated amount of reinforcement obtained by optimized design.



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

## ÍNDICE

<b><u>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</u></b> .....	<b>17</b>
1.1. <b>MOTIVACIÓN.</b> .....	<b>17</b>
1.2. <b>OBJETIVOS.</b> .....	<b>18</b>
1.3. <b>METODOLOGÍA.</b> .....	<b>18</b>
<b><u>CAPÍTULO 2: ESTADO DEL CONOCIMIENTO</u></b> .....	<b>20</b>
<b>2.1 PROCESOS DE DETERIORO DE LAS ARMADURAS: LA CORROSIÓN</b> .....	<b>20</b>
2.1.1 FUNDAMENTOS DE LA CORROSIÓN .....	21
2.1.2 PROCESO DE CORROSIÓN EN EL HORMIGÓN. ....	22
2.1.3 PASIVACIÓN. ....	23
2.1.4 ETAPAS DE LA CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN.....	25
2.1.4.1 Etapa I: Iniciación. Factores que afectan al tiempo de corrosión .....	25
2.1.4.2 Etapa II: Propagación. Factores que afectan la velocidad de corrosión .....	28
2.1.5 EL PAPEL DE LOS CLORUROS. ....	31
2.1.5.1 Umbral de corrosión de cloruro .....	32
2.1.6 LA CORROSIÓN EN EL HORMIGÓN PRETENSADO .....	34
<b>2.2 CONCEPTO DE DURABILIDAD Y FACTORES INFLUYENTES</b> .....	<b>36</b>
2.2.1 TRATAMIENTO NORMATIVO DE LA DURABILIDAD. ANEJO 9, EHE-08 (GOBIERNO DE ESPAÑA, 2008) ...	37
2.2.1.1 Modelos de durabilidad aplicables para los procesos de corrosión de las armaduras. .	38
2.2.1.2 Estimación de la vida útil debida a la corrosión de las armaduras .....	42
<b>2.3 LA FISURACIÓN EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN</b> .....	<b>43</b>
2.3.1 ENFOQUE NORMATIVO DE LA FISURACIÓN SEGÚN EUROCÓDIGO 2 (AENOR, 2004) .....	44
2.3.1.1 Comprobación del estado límite de fisuración .....	46
<b>2.4 EFECTO DE LA FISURACIÓN EN LA CORROSIÓN</b> .....	<b>48</b>
2.4.1 CARBONATACIÓN .....	51
2.4.2 PENETRACIÓN DE CLORUROS. ....	51
<b><u>CAPÍTULO 3: ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE AMBIENTE Y DURABILIDAD EN LA CUANTÍA DE ARMADURA NECESARIA</u></b> .....	<b>57</b>
<b>3.1 ARMADURA NECESARIA PARA EL CUMPLIMIENTO DE ESTADO LÍMITE ÚLTIMO Y ESTADO LÍMITE DE DURABILIDAD</b> .....	<b>57</b>
<b>3.2 AFECTACIÓN DEL ANCHO DE FISURA EN EL CÁLCULO DE LA DURABILIDAD</b> .....	<b>63</b>
3.2.1 CÁLCULO DE LA DURABILIDAD MEDIANTE LA INTRODUCCIÓN DEL ANCHO DE FISURA.....	66
<b>3.3 CONCLUSIONES SOBRE LA AFECTACIÓN DEL ANCHO DE FISURA EN EL CÁLCULO DE LA DURABILIDAD</b> .....	<b>72</b>
<b><u>CAPÍTULO 4: MÉTODO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO Y HORMIGÓN PRETENSADO</u></b> .....	<b>78</b>



<b>4.1 ARMADURA NECESARIA PARA EL CUMPLIMIENTO DE ELU Y ELS.....</b>	<b>78</b>
4.1.1 OPTIMIZACIÓN EN VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO.....	80
4.1.2 OPTIMIZACIÓN EN VIGAS DE HORMIGÓN PRETENSADO. ....	87
<b>4.2 COMPARATIVA ECONÓMICA ENTRE EL MÉTODO NORMATIVO Y EL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN.....</b>	<b>97</b>
<b>4.3 RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO POR DURABILIDAD.....</b>	<b>101</b>

<u>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES .....</u>	<u>103</u>
---------------------------------------	------------

<u>CAPÍTULO 6: BILIOGRAFÍA.....</u>	<u>107</u>
-------------------------------------	------------

<u>ANEJO I: GRÁFICOS DE OPTIMIZACIÓN. VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO (HA) .....</u>	<u>109</u>
---	------------

<u>ANEJO II: GRÁFICOS DE OPTIMIZACIÓN. VIGAS DE HORMIGÓN PRETENSADO PARCIAL (HPP).....</u>	<u>117</u>
--	------------

## ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1 Tabla A.9.1 Coeficiente  $C_{env}$ ..... 39
- Tabla 2 Tabla A.9.2 Coeficiente  $C_{air}$ ..... 39
- Tabla 3 Tabla A.9.3 Coeficientes a y b, conforme a la EHE-08 (Gobierno de España, 2008)..... 39
- Tabla 4 Tabla A.9.4 Coeficientes  $D(t_0)$  ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s) conforme a la EHE-08 (Gobierno de España, 2008)..... 41
- Tabla 5 Tabla A.9.4 Concentración de cloruros en superficie de hormigón conforme a la EHE-08 (Gobierno de España, 2008)..... 41
- Tabla 6 Tabla A.9.5 Velocidad de corrosión  $V_{corr}$  según la clase general de exposición conforme a la EHE-08 (Gobierno de España, 2008)..... 42
- Tabla 7 Tabla 4.1 Clases de exposición relacionadas con las condiciones ambientales conforme a la Norma EN 206-1..... 44
- Tabla 8 Tabla 7.1 N Valores recomendados de  $w_{max}$  (mm) conforme al Eurocódigo 2 (AENOR, 2004)..... 46
- Tabla 9 Casos estudiados para diámetros 16 y 25 mm ..... 58
- Tabla 10 Resultados obtenidos de la comparación de armadura necesaria final, con la armadura necesaria para ELU, para diámetro 16 mm..... 58
- Tabla 11 Resultados obtenidos de la comparación de armadura necesaria final, con la armadura necesaria para ELU, para diámetro 25 mm..... 59
- Tabla 12 Valores de carga y factores de combinación utilizados..... 60
- Tabla 13 Resultados del cálculo de la durabilidad con el Anejo 9 de la EHE-08 (Gobierno de España, 2008) para diámetro 16 mm..... 63
- Tabla 14 Resultados del cálculo de la durabilidad con el Anejo 9 de la EHE-08 (Gobierno de España, 2008) para diámetro 25 mm..... 64
- Tabla 15 Resultados obtenidos del cálculo de la durabilidad introduciendo el ancho de fisura, a partir de la fisura obtenida con la armadura necesaria para cumplir ELU, para diámetro 16 mm..... 67
- Tabla 16 Resultados obtenidos del cálculo de la durabilidad introduciendo el ancho de fisura, a partir de la fisura obtenida con la armadura necesaria para cumplir ELU para diámetro 25 mm..... 68
- Tabla 17 Parámetros favorables, desfavorables e indiferentes para cada uno de los ambientes agresivos, en el cálculo de la durabilidad ..... 76
- Tabla 18 Precios para cada uno de los casos estudiados, por tipos de ambientes para el cálculo normativo y el cálculo optimizado..... 98

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1 Mecanismos de deterioro por corrosión del acero en hormigón .....20
- Figura 2 Mecanismos y fases de la corrosión, adaptado desde (Gestión de Estructuras. Juan Ramón Casas Rius. UPC, n.d.) .....21
- Figura 3 Modelo simplificado del proceso de corrosión (ACI, 1984) .....22
- Figura 4 Corrosión en macrocelda en fisura (West et al., 1999) .....23
- Figura 5 Esquema de los mecanismos de corrosión de las armaduras .....24
- Figura 6 Etapas de la corrosión del acero en el hormigón. Modelo de Tuutti (West et al., 1999) .....25
- Figura 7 Influencia de la fisuración en la corrosión de las armaduras a largo plazo frente a un hormigón no fisurado adaptado de (Gestión de Estructuras. Juan Ramón Casas Rius. UPC, n.d.) .....29
- Figura 8 Contenido crítico de ion cloruro según el Comité Euro-Internacional du Béton17 (CEB) (West et al., 1999) .....33
- Figura 9 Área de superficie para una barra y un cordón de igual diámetro (West et al., 1999) .....35
- Figura 10 Tiempo de fallo desde el inicio de la corrosión (Darmawan & Stewart, 2007) .....35
- Figura 11 Esquema del proceso de deterioro de estructuras de hormigón pretensado (Darmawan & Stewart, 2007) .....36
- Figura 12 Relación entre la Resistencia a tracción y compresión del hormigón .....43
- Figura 13 Esquema sobre la influencia del recubrimiento en la corrosión .....50
- Figura 14 La primera ley de difusión de Fick expresa que el flujo de iones cloruro en el hormigón es proporcional al gradiente de concentración de cloruros normal a la sección (Poulsen, 1993) .....53
- Figura 15 La primera ley de difusión de Fick expresa el cambio en el flujo por unidad en el eje x (Poulsen, 1993) .....53
- Figura 16 El coeficiente de difusión de cloruros D del hormigón decrece con la madurez del mismo (Poulsen, 1993) .....53
- Figura 17 Modelo de ingreso de cloruros para  $t < 30$  años .....55
- Figura 18 Modelo de ingreso de cloruros para  $t \geq 30$  años .....55
- Figura 19 Diagrama de flujo de la obtención de la armadura necesaria para ELU y ELD .....57
- Figura 20 Relación de área de armadura final-área de armadura para ELU para diferentes ambientes y casos de carga, para un diámetro de armadura 16 mm: a)2,57, b)2,37; c)1,96; d)1,86 .....61
- Figura 21 Relación de área de armadura final-área de armadura para ELU para diferentes ambientes y casos de carga, para un diámetro de armadura 25 mm: a)2,57, b)2,37; c)1,96; d)1,86 .....61

- Figura 22 Comparación de la relación de área de armadura final-área de armadura para ELU para diferentes ambientes y casos de carga, para diámetro de armadura 16 y 25 mm: a)2,57, b)2,37; c)1,96; d)1,86.....62
- Figura 23 Durabilidad en función del ambiente y la vida útil necesaria para: a) diámetro 16 mm, b) diámetro 25 mm .....65
- Figura 24 Durabilidad en función del ambiente y diámetro de la armadura para las vidas útiles de: a) 30 años, b) 50 años; c) 100 años.....65
- Figura 25 Relación entre la fórmula ( 9) y la fórmula ( 32).....66
- Figura 26 Comparativa entre la vida útil estimada obtenida mediante la difusión media, propuesta por (Poulsen, 1993) (fórmula (27)) y la obtenida mediante la difusión  $D(t)w$  (fórmula (33)), para una vida útil de 30 años, relación de cargas 1,86 y diámetro de armadura 25 mm. ....67
- Figura 27 Comparativa de vidas útiles obtenidas mediante la introducción del ancho de fisura con el Anejo 9, por relaciones de carga, para 30 años y diámetros: a) 16 mm; b) 25 mm. ....70
- Figura 28 Comparativa de vidas útiles obtenidas mediante la introducción del ancho de fisura con el Anejo 9, por relaciones de carga, para 50 años y diámetros: a) 16 mm; b) 25 mm. ....70
- Figura 29 Comparativa de vidas útiles obtenidas mediante la introducción del ancho de fisura con el Anejo 9, por relaciones de carga, para 100 años y diámetros: a) 16 mm; b) 25 mm. ....70
- Figura 30 Vida útil por relación de carga y ambiente de exposición para 30 años y diámetros:.....71
- Figura 31 Vida útil por relación de carga y ambiente de exposición para 50 años y diámetros:.....71
- Figura 32 Vida útil por relación de carga y ambiente de exposición para 100 años y diámetros:.....71
- Figura 33 Relación ancho de fisura y tiempo de iniciación para el caso de carbonatación del ambiente XC4, y recubrimiento 40 mm.....72
- Figura 34 Afectación de la fisuración en la durabilidad, dependiendo de la vida útil: a) 30 años; b) 50 años; c)100 años.....73
- Figura 35 Influencia de la difusión media y cloruros en superficie en la durabilidad .....73
- Figura 36 Relación del tiempo de inicio con la vida útil aproximada para los ambientes: a) XS2; b) XD3; c) XS3 para una vida útil de 100 años .....74
- Figura 37 Vida útil en función de los parámetros influyentes y el recubrimiento mínimo.....75
- Figura 38 Vida útil en función de diferentes parámetros y tipos de ambiente, con diámetro 16 mm para las vidas útiles de proyecto de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....77
- Figura 39 Diagrama de flujo para el caso de vigas de hormigón armado .....80

- Figura 40 Curva de optimización para una vida útil de 30 años, Ambiente XC1 y resistencia .....81
- Figura 41 Curva de optimización para una vida útil de 50 años, Ambiente XC1 y resistencia .....82
- Figura 42 Curva de optimización para vida útil 100 años, Ambiente XC1, resistencia  $f_{ck}= 20$  MPa: a)1,86; b)1,96; c)2,37; d)2,57 .....82
- Figura 43 Curva de optimización para la relación de carga de 1,86; Ambiente XC4; resistencia  $f_{ck}=30$  MPa para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....83
- Figura 44 Curva de optimización para la relación de carga de 1,86; Ambiente XS2; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....84
- Figura 45 Curva de optimización para la relación de carga de 1,86; Ambiente XD3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....85
- Figura 46 Curva de optimización para la relación de carga de 1,86; Ambiente XS3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....85
- Figura 47 Curvas de diseño de recubrimiento óptimo para diferentes ambientes dependiendo del caso de carga: a) $Q_d/Q_{cuasi}=1,86$ ; b)  $Q_d/Q_{cuasi}=1,96$ ; c)  $Q_d/Q_{cuasi}=2,37$ ; c)  $Q_d/Q_{cuasi}=2,57$ . .....86
- Figura 48 Curvas de diseño de ancho de fisura óptimo para diferentes ambientes dependiendo del caso de carga: a) $Q_d/Q_{cuasi}=1,86$ ; b)  $Q_d/Q_{cuasi}=1,96$ ; c)  $Q_d/Q_{cuasi}=2,37$ ; c)  $Q_d/Q_{cuasi}=2,57$ . .....87
- Figura 49 Diagrama de flujo para el caso de vigas de hormigón pretensado .....88
- Figura 50 Curva de optimización para la relación de carga de 1,86; Ambiente XC1; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....93
- Figura 51 Curva de optimización para la relación de carga de 1,86; Ambiente XC4; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....93
- Figura 52 Curva de optimización para la relación de carga de 1,86; Ambiente XS2; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....94
- Figura 53 Curva de optimización para la relación de carga de 1,86; Ambiente XD3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....95
- Figura 54 Curva de optimización para la relación de carga de 1,86; Ambiente XS3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....95
- Figura 55 Recubrimiento necesario para elementos de hormigón pretensado, para cumplir con la durabilidad deseada, según el tipo de ambiente.....96
- Figura 56 Comparativa entre la armadura de pretensado necesaria mediante el método utilizado en este TFM y el método habitual de cálculo de hormigón pretensado parcial, calculada a partir de una hoja de Excel proporcionada por la UPC para los tipos de ambiente: a) XC1; b) XC4; c) XS2; d) XD3; e) XS3. ....97
- Figura 57 Comparativa de precios para el método por optimización y el método del Anejo 9 para: a) XC1; b) XC4; c) XS2; d) XD3; e) XS3.....100
- Figura 58 Recubrimiento mínimo necesario y ancho de fisura máximo para elementos de hormigón armado para diferentes vidas útiles en ambientes de exposición: a) XC1, b) XC4, .....105

- Figura 59 Recubrimiento mínimo necesario y ancho de fisura máximo para elementos de hormigón pretensado parcial para diferentes vidas útiles en ambientes de exposición: a) XC1, .....106
- Figura 60 Curva de optimización HA para la relación de carga de 2,57; Ambiente XC1; resistencia  $f_{ck}=20$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años. ....109
- Figura 61 Curva de optimización HA para la relación de carga de 2,57; Ambiente XC4; resistencia  $f_{ck}=30$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años. ....109
- Figura 62 Curva de optimización HA para la relación de carga de 2,57; Ambiente XS2; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....110
- Figura 63 Curva de optimización HA para la relación de carga de 2,57; Ambiente XD3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años. ....110
- Figura 64 Curva de optimización HA para la relación de carga de 2,57; Ambiente XS3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....111
- Figura 65 Curva de optimización HA para la relación de carga de 2,37; Ambiente XC1; resistencia  $f_{ck}=20$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años. ....111
- Figura 66 Curva de optimización HA para la relación de carga de 2,37; Ambiente XC4; resistencia  $f_{ck}=30$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años. ....112
- Figura 67 Curva de optimización HA para la relación de carga de 2,37; Ambiente XS2; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....112
- Figura 68 Curva de optimización HA para la relación de carga de 2,37; Ambiente XD3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años. ....113
- Figura 69 Curva de optimización HA para la relación de carga de 2,37; Ambiente XS3; resistencia  $f_{ck}=30$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....113
- Figura 70 Curva de optimización HA para la relación de carga de 1,96; Ambiente XC1; resistencia  $f_{ck}=20$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años. ....114
- Figura 71 Curva de optimización HA para la relación de carga de 1,96; Ambiente XC4; resistencia  $f_{ck}=30$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años. ....114
- Figura 72 Curva de optimización HA para la relación de carga de 1,96; Ambiente XS2; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....115

- Figura 73 Curva de optimización HA para la relación de carga de 1,96; Ambiente XD3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años. ....115
- Figura 74 Curva de optimización HA para la relación de carga de 1,96; Ambiente XS3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 año .....116
- Figura 75 Curva de optimización HPP para la relación de carga 2,57; Ambiente XC1; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....117
- Figura 76 Curva de optimización HPP para la relación de carga 2,57; Ambiente XC4; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....117
- Figura 77 Curva de optimización HPP para la relación de carga 2,57; Ambiente XS2; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....118
- Figura 78 Curva de optimización HPP para la relación de carga 2,57; Ambiente XD3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....118
- Figura 79 Curva de optimización HPP para la relación de carga 2,57; Ambiente XS3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....119
- Figura 80 Curva de optimización HPP para la relación de carga 2,37; Ambiente XC1; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....119
- Figura 81 Curva de optimización HPP para la relación de carga 2,37; Ambiente XC4; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....120
- Figura 82 Curva de optimización HPP para la relación de carga 2,37; Ambiente XS2; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....120
- Figura 83 Curva de optimización HPP para la relación de carga 2,37; Ambiente XD3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....121
- Figura 84 Curva de optimización HPP para la relación de carga 2,37; Ambiente XD3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.....121



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH



## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1. MOTIVACIÓN.

En España, bajo los criterios de la EHE-08 (Gobierno de España, 2008), y en general en las normativas actuales, factores como la fisuración tienen una gran influencia en la comprobación de la durabilidad. Siempre se había creído que limitar la fisura era fundamental, impidiendo así que la humedad y los agentes agresivos entraran en contacto con las armaduras provocando su corrosión, pero diversos estudios han comprobado que éste no es un hecho primordial que afecte a la durabilidad: la relación entre ancho de fisura y extensión de la corrosión no es particularmente alta, sobre todo para anchos de fisura tan finos como los que marca la norma (Hartt, 2009). Esto es debido a que hay otros factores a tener en cuenta, tales como el recubrimiento y la calidad del hormigón, que pueden hacer que, aunque aparezcan microfisuras, la estructura siga teniendo la durabilidad adecuada para el tiempo para el que ha sido proyectado.

En los años 80 éste ya era un problema consabido, por lo que la (ACI, 1984) en la Convención de otoño de ese mismo año celebró el debate “*Ancho de fisura, recubrimiento y corrosión*” en el que se cuestionaron las diversas teorías sobre si la fisura afecta o no negativamente en la durabilidad de la estructura. Cabe recordar que las normativas limitaban el ancho de fisura a través de la tensión del acero, el espaciado de las barras, el recubrimiento del hormigón y las condiciones de exposición. De este modo, un incremento severo de las condiciones de exposición requería anchos de fisura más finos. Paradójicamente, bajo las disposiciones del momento para conseguir un ancho de fisura más fino era necesario reducir el recubrimiento. Sin embargo, una reducción del recubrimiento de las armaduras podía llevar a un decrecimiento de la durabilidad, debido a la disminución de la protección de las armaduras frente a la corrosión. Hoy en día, las normativas actuales siguen teniendo el mismo enfoque.

La normativa española EHE-08 (Gobierno de España, 2008) hace referencia en dos partes de la misma al Estado Límite de Fisuración, en el *Artículo 49º Estado Límite de Fisuración* del Capítulo 11 y, para cálculos más específico, en el *Anejo 9 Consideraciones adicionales sobre durabilidad*. Hay que tener en cuenta que el Anejo 9 se basa en la teoría de que el ancho de fisura no afecta a la durabilidad, según confirmación del D. Fernando Rodríguez García, autor del mismo. Sin embargo, en el Artículo 49º se prescriben anchos de fisura variables en función del ambiente, que pueden llegar a condicionar el diseño.

Por lo tanto, en la actualidad, los códigos y normativas consideran que los criterios de durabilidad se deben satisfacer en términos de ancho de fisura, recubrimiento del hormigón y cantidad de cemento, los cuales deben ser satisfechos independientemente. Sin embargo, estos parámetros interactúan entre sí, abriendo la posibilidad de un diseño

optimizado para una vida útil equivalente, no considerada en las normativas actuales, evitando así incrementos innecesarios de armadura, y por consiguiente, de presupuesto.

## 1.2. OBJETIVOS.

Siguiendo con esta línea de investigación, se ha realizado el estudio para 4 casos de carga diferentes y para las vidas útiles de 30 años, 50 años y 100 años. Se pretende que este TFM tenga cuatro objetivos fijos:

1. Estudio numérico comparativo de la armadura necesaria para cumplir con el Estado Límite Último y el Estado Límite de Durabilidad (en adelante ELU y ELD, respectivamente) para los casos de carga y vidas útiles analizadas.
2. Comparación de la durabilidad obtenida mediante el Anejo 9 de la EHE-08 (Gobierno de España, 2008) y la obtenida considerando la abertura de fisura, para elementos de hormigón sometidos a flexión.
3. Determinación de los criterios para un diseño optimizado, a través de la elección de un recubrimiento y armado óptimos, según la vida útil y ambiente considerado, para hormigones armados y pretensados parcialmente.
4. Evaluación económica y recomendaciones para un diseño óptimo para diferentes vidas útiles, resistencias del hormigón y capacidad de servicio.

## 1.3. METODOLOGÍA.

Para la elaboración del presente TFM se han utilizado tanto el Eurocódigo 2 (AENOR, 2004) como la EHE-08 (Gobierno de España, 2008). Del Eurocódigo 2 (AENOR, 2004) se ha tenido en cuenta la división en clases estructurales. Se han asignado tres clases estructurales diferentes a cada una de las vidas útiles estudiadas y a partir de aquí se ha obtenido el recubrimiento mínimo. Por otro lado, para la comparación con el ancho de fisura y la comprobación de la durabilidad se ha usado la EHE-08 (Gobierno de España, 2008).

En primer lugar, se ha realizado un estudio comparativo para diferentes casos de carga y clases de exposición de una viga de hormigón armado sometida a flexión. En el estudio se compara la armadura necesaria para cumplir ELU y ELD. De este modo, se ha calculado la armadura para cumplir ELU y el ancho de fisura que se obtendría con dicha armadura. En caso de sobrepasar el ancho de fisura máximo que marca la norma para el ambiente considerado, se ha calculado cuánta armadura es necesaria para cumplir con el ancho de fisura fijado.

El primer estudio comparativo se ha realizado para vigas de hormigón armado con diámetro 16 mm y 25 mm, con diferentes casos de carga y factores de combinación  $\Psi_2$ . Se han considerado 5 tipos de ambientes diferentes, para ver el comportamiento con cada limitación de ancho de fisura. Así mismo, se estudia cómo afecta la relación entre carga de servicio y carga última en la cuantía de armadura necesaria para cumplir ELU y ELD, en cada uno de los ambientes.

En segundo lugar, se estudia la afectación de la introducción del ancho de fisura en el estudio de durabilidad. Actualmente, cuando se comprueba la durabilidad mediante el Anejo 9 de la EHE-08 (Gobierno de España, 2008), el ancho de fisura no es un dato que se haya de introducir, pues no lo tiene en cuenta. De este modo, se modifica la hoja Excel de cálculo de la durabilidad para ver cómo varía una vez se introduce el ancho de fisura.

En tercer lugar, mediante la herramienta Excel se ha realizado, tanto para hormigón armado como para hormigón pretensado parcial, unas hojas de cálculo en las que, introduciendo la vida útil deseada, los datos de la sección, las cargas y las características del hormigón, devuelve unos gráficos con el recubrimiento, armado y ancho de fisura óptimos para el diseño, de manera que cumpla tanto para ELU como para ELD.

Por último, se ha analizado económicamente el modelo propuesto, comparándolo con el método normativo, viendo las semejanzas y diferencias que hay entre ellos, en función del tipo de ambiente y la durabilidad.

## CAPÍTULO 2: ESTADO DEL CONOCIMIENTO

### 2.1 PROCESOS DE DETERIORO DE LAS ARMADURAS: LA CORROSIÓN

Las armaduras que conforman el hormigón armado, a lo largo de su vida útil, pueden sufrir un proceso de deterioro químico que provoca la corrosión de las mismas.

De acuerdo con (West et al., 1999), la corrosión de las armaduras es un proceso electroquímico en el cual el acero está afectado por un ambiente en concreto, dando lugar a una pérdida de sección de la armadura de refuerzo. Los iones ferrosos liberados son libres para unirse a los iones hidroxilo para formar diversos productos de corrosión dependiendo de la disponibilidad de oxígeno. Los productos de corrosión pueden ocupar hasta seis veces más volumen que el acero, lo que conduce a la formación de grietas y la rotura del hormigón. La corrosión de las armaduras en el hormigón puede afectar significativamente la integridad estructural a través de la reducción de la capacidad portante del acero de refuerzo, o incluso su rotura, debido a la pérdida de adherencia entre el acero y el hormigón o a través de la fisuración y el desprendimiento del hormigón.

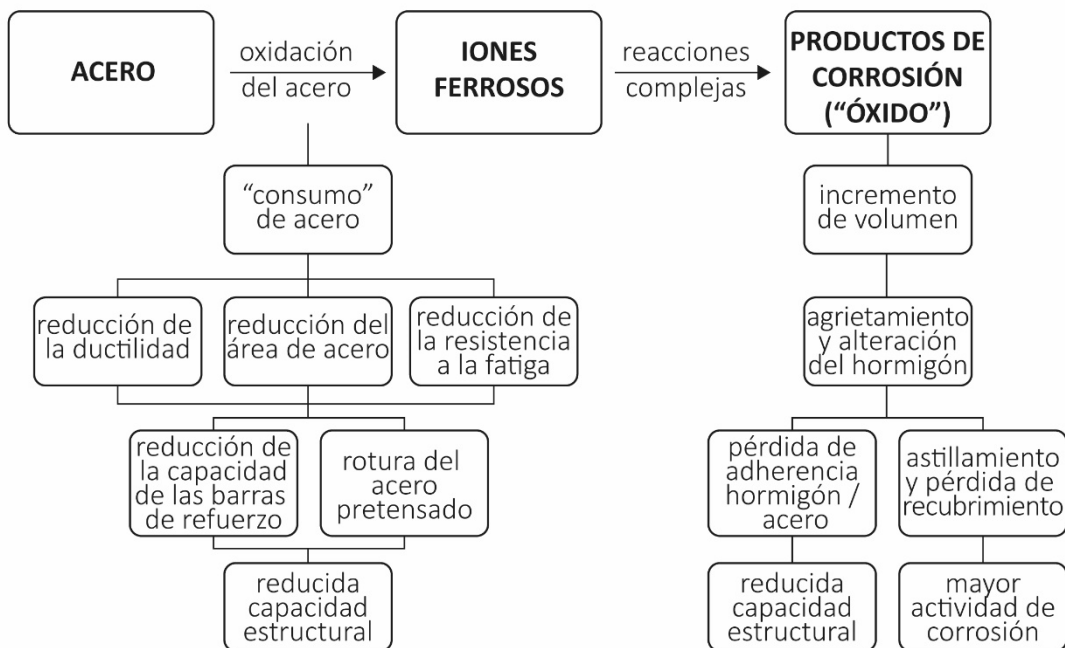


Figura 1 Mecanismos de deterioro por corrosión del acero en hormigón adaptado desde (West et al., 1999)

### 2.1.1 Fundamentos de la corrosión

Según (West et al., 1999), los fundamentos de la corrosión son similares tanto para las armaduras pasivas como para las activas. Cuando un hormigón está en buen estado, las armaduras se encuentran protegidas de la corrosión por una película pasivante de óxidos de hierro que se sitúan sobre el acero, gracias al entorno alcalino del hormigón. Sin embargo, la pasivación del acero puede ser destruida por la carbonatación ( $\text{CO}_2$ ) o por la presencia de iones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ). Por lo tanto, en ausencia de una película pasiva, puede ocurrir la corrosión.

Cuando la corrosión ocurre, pasa por tres fases: la primera, en la que el agente agresivo llega a la armadura; la segunda, cuando se fisura el hormigón y salta el recubrimiento; por último, cuando la armadura deja de tener capacidad portante suficiente para que la estructura cumpla con el Estado Límite Último y el Estado Límite de Servicio, tal y como muestra la Figura 2.

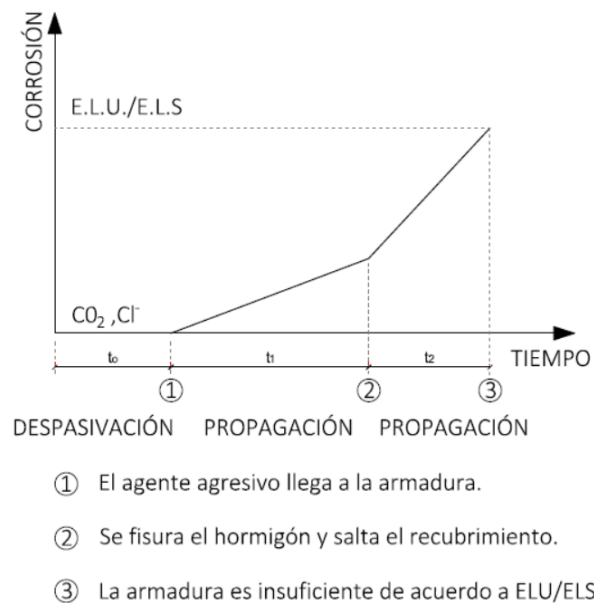


Figura 2 Mecanismos y fases de la corrosión, adaptado desde (Gestión de Estructuras. Juan Ramón Casas Rius. UPC, n.d.)

Sin embargo, tal y como apunta (West et al., 1999), el proceso electroquímico de corrosión requiere varios elementos clave, sin los cuales, la corrosión no se puede producir.

### 2.1.2 Proceso de corrosión en el hormigón.

Según (West et al., 1999), para que aparezca la corrosión es necesario que se produzca un proceso electroquímico en el que son necesarios tres elementos clave: el ánodo, el cátodo y el electrolito. El proceso electroquímico se originará en el acero, produciéndose reacciones químicas en las regiones anódica y catódica. El ánodo y el cátodo deben estar conectados eléctricamente para que ocurra la transferencia de carga. Dicha transferencia no sería posible sin la presencia del hormigón, pues actúa como electrolito en esta reacción, conduciendo la corriente a través de la transferencia de iones para completar el proceso de corrosión. Las reacciones básicas anódicas y catódicas son las siguientes:

- Reacción anódica:  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$
- Reacción catódica:  $1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2(\text{OH})^-$

De este modo, el hierro se oxida en el ánodo (es decir, se separa el hierro del acero y se liberan dos electrones). En el cátodo, el oxígeno se reduce por los electrones liberados en el ánodo, y se producen iones hidroxilo. Con el fin de conservar la carga, las velocidades de reacción para las reacciones anódica y catódica deben ser iguales. El flujo de carga en la celda de corrosión se completa con el movimiento de los iones hidroxilo del cátodo al ánodo por difusión. El proceso de difusión iónica puede ser modelado por la ley de Ohm, indicando que el flujo de carga entre el ánodo y el cátodo es inversamente proporcional a la resistividad del hormigón (electrolito).

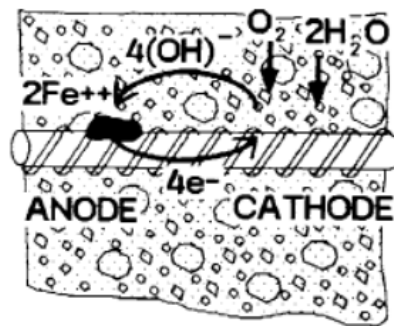


Figura 3 Modelo simplificado del proceso de corrosión (ACI, 1984)

Así mismo, se pueden dar dos tipos de celdas de corrosión: la macrocelda y la microcelda. Por un lado, la microcelda de corrosión consiste en ánodos y cátodos muy pequeños separados por una distancia tan pequeña como un micrón. Por otro lado, la macrocelda de corrosión se compone de regiones anódicas y catódicas separadas por una distancia finita de milímetros o metros, que puede desarrollarse en una sola barra, entre diferentes capas de acero, o bien en diferentes áreas de la estructura.

Esta forma de corrosión en macrocelda puede ocurrir donde hay fisuración. La reacción anódica se produce en las proximidades de la grieta, mientras que la reacción catódica tiene lugar en la misma barra dentro de la distancia entre grietas (ver Figura 4). El acero cerca de la grieta se despasiva debido a la penetración del cloruro o del dióxido de carbono a través de la grieta. Esta forma de corrosión puede conducir a velocidades de corrosión muy altas y a corrosión por picadura, debido a la gran área de cátodo en comparación con el área de ánodo. En la mayoría de las situaciones de corrosión en estructuras de hormigón se produce una combinación de corrosión en microcelda y macrocelda.

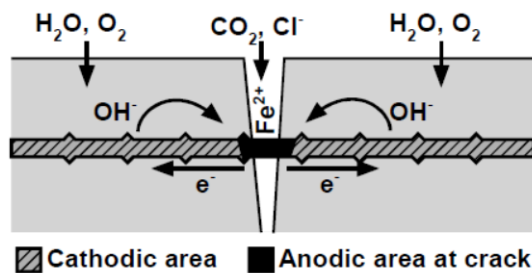


Figura 4 Corrosión en macrocelda en fisura (West et al., 1999)

Por lo tanto, para que ocurra el proceso de corrosión, la película pasiva sobre el acero debe romperse, para permitir la oxidación del hierro. Así mismo, el agua y el oxígeno deben estar disponibles en el cátodo y, además, la resistividad del hormigón debe ser lo suficientemente baja como para permitir la difusión iónica entre el ánodo y el cátodo. Por consiguiente, esto significa que, en hormigones secos, el proceso electroquímico estaría impedido, y en hormigones saturados, habría ausencia de oxígeno. Esto significa que en ambos casos la corrosión no se puede producir. Consecuentemente, los hormigones con mayor riesgo a sufrir corrosión son los que sufren cambios importantes de humectación y secado.

### 2.1.3 Pasivación.

Continuando con lo que afirma (West et al., 1999), una de las propiedades más interesantes del hormigón es su carácter protector de las armaduras frente a la corrosión. Gracias a la alta alcalinidad que aporta la hidratación de la pasta de cemento ( $pH > 13$ ), las barras de acero que están en el interior del hormigón sufren un proceso denominado pasivación. Éste es uno de los mecanismos más aceptados para la protección contra la corrosión y consiste en la formación de una película pasiva sobre la superficie de las armaduras de refuerzo. La película pasiva es una fina capa de óxido de hierro, firmemente adherida, que retarda o detiene el proceso de corrosión evitando que los iones ferrosos

(Fe<sup>2+</sup>) entren en la solución en el electrolito. La película pasiva sólo afecta a la reacción anódica, ya que la reacción catódica puede ocurrir en superficies donde la película esté intacta.

Inicialmente, el acero debe corroerse para producir la película pasiva. El proceso comienza poco después de la construcción de la estructura, ya que la hidratación del cemento eleva el pH del hormigón. El proceso de corrosión produce el hidróxido ferroso (Fe(OH)<sub>2</sub>). Si hay oxígeno y humedad, el hidróxido ferroso se convierte en óxido de hierro gamma ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y se forma una fina película pasiva sobre la superficie del acero. La película pasiva permanece estable cuando la alcalinidad del hormigón supera aproximadamente el pH 12, por lo que el acero estará protegido contra la corrosión adicional.

Si el recubrimiento de la pieza de hormigón es de espesor suficiente y de porosidad reducida, impedirá el paso de sustancias nocivas al interior del mismo, pues conserva su carácter básico. Pero si, por el contrario, el hormigón pierde su carácter básico (PH<9), la película pasiva comienza a perder efectividad en las zonas próximas al acero y puede verse afectada por fenómenos corrosivos.

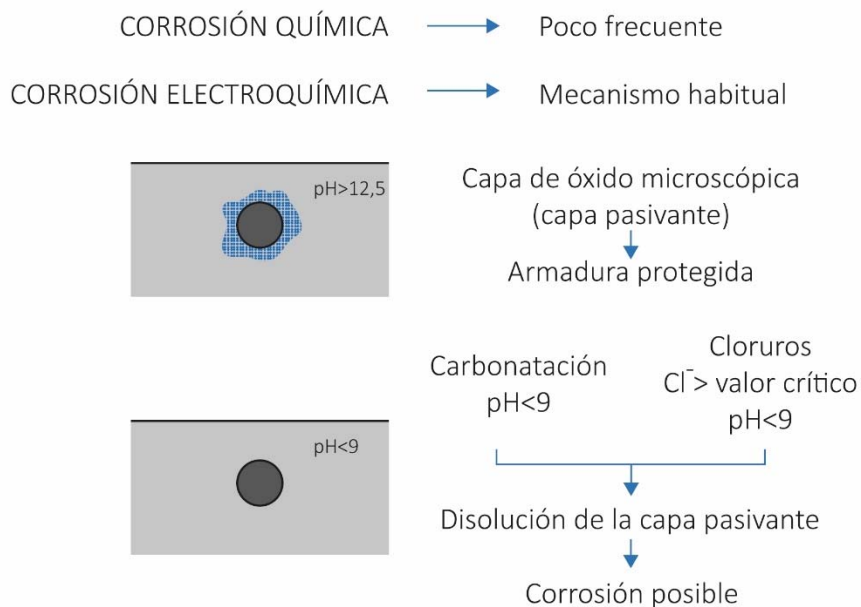


Figura 5 Esquema de los mecanismos de corrosión de las armaduras



#### 2.1.4 Etapas de la corrosión en estructuras de hormigón.

La mayoría de modelos de vida útil asociados a la corrosión de las armaduras del hormigón siguen el modelo introducido por (Tuutti, 1982) (Figura 6). Este modelo de corrosión se idealiza como una secuencia de dos etapas separadas:

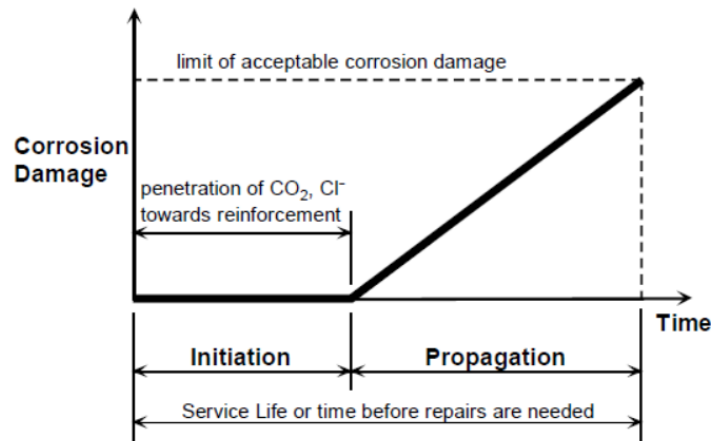


Figura 6 Etapas de la corrosión del acero en el hormigón. Modelo de Tuutti (West et al., 1999)

- En primer lugar, el período de iniciación, durante el cual el acero permanece en un estado de pasivación, bajo un ambiente alcalino.
- Posteriormente, el período de propagación, en el que la estructura se deteriora como resultado de la pérdida de área transversal y la acumulación de productos de corrosión alrededor de la superficie de la barra.

De acuerdo con (West et al., 1999), la depasivación del acero define la transición entre la etapa de iniciación y la etapa de propagación.

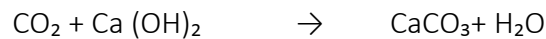
##### 2.1.4.1 Etapa I: Iniciación. Factores que afectan al tiempo de corrosión

Como se ha descrito anteriormente, el acero en el hormigón está, normalmente, protegido de la corrosión por una película de óxido pasiva sobre la superficie del acero, que previene o limita la corrosión. La destrucción de la película, o depasivación, puede permitir que la corrosión comience.

Según (West et al., 1999), la primera etapa del proceso de corrosión se refiere a la parte de la vida útil en la que varias acciones pueden conducir a la depasivación del acero. Las causas más comunes de la depasivación son la carbonatación del hormigón o la presencia de ciertas sustancias, en particular, la presencia de cloruros.

## Carbonatación

(West et al., 1999) afirma que la carbonatación del hormigón se produce cuando el dióxido de carbono atmosférico penetra en el hormigón. En presencia de humedad, el dióxido de carbono reacciona con hidróxido de calcio en el hormigón para producir carbonato de calcio, como se muestra a continuación:



La formación de carbonato de calcio reduce el pH del hormigón hasta 8, donde la película pasiva ya no es estable, permitiendo así que comience la corrosión.

Existen varios modelos para predecir la “profundidad de carbonatación” en hormigón no fisurado. La mayor parte de los modelos existentes están basados en soluciones de la ecuación de difusión de la ley de Fick, cuya formulación matemática básica se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

Siendo C la concentración de dióxido de carbono, D el coeficiente de difusión, t el tiempo y x la profundidad de penetración del CO<sub>2</sub>.

La resolución de esta ecuación, variando las condiciones iniciales y de contorno, da lugar a diferentes soluciones, en las cuales se basan algunos de los modelos que a continuación se explican. El modelo más sencillo, derivado de una solución de esta ecuación, considera la ‘profundidad’ de carbonatación proporcional a la raíz cuadrada del tiempo según la siguiente expresión:

$$x = k\sqrt{t} \quad (2)$$

donde x es la profundidad de penetración del agresivo, en este caso el CO<sub>2</sub> en mm, k es la ‘velocidad’ de avance del mismo en mm/año<sup>1/2</sup> y t es el tiempo en años. Calculando la constante de proporcionalidad o ‘velocidad’ de carbonatación para un cierto tiempo, esta ecuación se puede utilizar para predecir ‘profundidades’ a diferentes edades del hormigón. Algunos autores han planteado expresiones para calcular la ‘velocidad’ de carbonatación k en función de diferentes factores como la resistencia mecánica, la concentración de CO<sub>2</sub>, la temperatura, el tiempo de curado, el tipo de cemento, o la humedad relativa. (Tuutti, 1982), entre otros, propone un modelo basado en el coeficiente de difusión del CO<sub>2</sub>. A continuación, se explica brevemente:

- Modelo de Tuutti

El modelo de (Tuutti, 1982), basado en la difusión de fronteras móviles, considera que el frente de carbonatación avanza según el modelo de la raíz del tiempo, y supone que todo el CO<sub>2</sub> reacciona con las fases sólidas de forma que, detrás del frente de carbonatación, la concentración de CO<sub>2</sub> es cero, mientras que delante de él es 100%.

Según (Tuutti, 1982) la zona de reacción está bien definida por un 'frente abrupto'. La expresión propuesta para hacer predicciones de la 'profundidad' de carbonatación en diferentes tiempos es la siguiente:

$$\frac{C_s}{C_x} = \sqrt{\pi \left( \frac{x}{2\sqrt{D}} \right) \cdot \exp\left( \frac{x^2}{4 \cdot D} \right) \cdot \operatorname{erf}\left( \frac{x}{2\sqrt{D}} \right)} \quad (3)$$

Donde  $C_s$  es la concentración ambiental de  $\text{CO}_2$  ( $\text{kmol}/\text{m}^3$ ),  $C_x$  es la concentración de  $\text{CO}_2$  ligado en el hormigón ( $\text{kmol}/\text{m}^3$ ),  $x$  es la profundidad de carbonatación (m),  $t$  es el tiempo (s) y  $D$  es el coeficiente de difusión ( $\text{m}^2/\text{s}$ ). Para más información, consultar (Tuutti, 1982).

Por otra parte, y siguiendo con (West et al., 1999), el proceso de carbonatación es lento en hormigones de buena calidad. Los factores que afectan la velocidad de carbonatación incluyen la permeabilidad del hormigón, el agrietamiento, el contenido de humedad del hormigón y la humedad relativa. La presencia de grietas permitirá que el frente de carbonatación alcance rápidamente el acero (a escala local). Esta carbonatación puede contribuir a la formación de una macrocelda de corrosión en la fisura (ver Figura 4). Sin embargo, la carbonatación no ocurrirá en hormigones que estén saturados o muy secos, mientras que la velocidad de carbonatación es más alta para humedades relativas del 50% al 70%.

### Penetración de cloruros

De acuerdo con (West et al., 1999), el papel de los cloruros en la despasivación ha sido muy debatido. El consenso general es que una vez que el nivel de cloruros en las armaduras del hormigón excede un cierto límite, la película pasiva se rompe o no puede proteger el acero de la corrosión. En términos generales, el papel de los cloruros en la despasivación puede tomar una, o una combinación de las formas siguientes:

- Los iones cloruro pueden dispersar la película pasiva.
- Los iones cloruro pueden hacer que la película sea permeable a los iones  $\text{Fe}^{2+}$ , permitiendo que la reacción anódica ocurra, incluso cuando la película pasiva está presente.
- Los iones cloruro pueden penetrar en la película pasiva y pueden producirse reacciones anódicas con  $\text{Cl}^-$ , actuando como catalizador.
- Los iones cloruro pueden reducir el pH, haciendo que la película pasiva sea inestable.

Los cloruros pueden estar presentes en el hormigón debido a cualquiera de sus componentes. La mayoría de las especificaciones de diseño y construcción, o pautas de durabilidad, limitan la cantidad de cloruros permitidos en los componentes del hormigón. Los cloruros también pueden penetrar en el hormigón desde fuentes externas, más comúnmente, a través de productos químicos de deshielo y agua de mar.

Los factores que afectan la penetración de los cloruros son los mismos que los de la carbonatación. La mejor protección contra la penetración de cloruros es el hormigón de buena calidad. Un recubrimiento más grueso de las armaduras aumenta la duración de la exposición requerida para los cloruros, de acuerdo con la relación de la raíz cuadrada.

El mecanismo de difusión para el caso de los cloruros es el siguiente:

$$C_{x,t} = C_b + (C_0 - C_b) \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_{cl}t}} \right) \right) \quad (4)$$

Siendo  $C_b$  la concentración inicial de cloruros en el hormigón en % en peso del cemento,  $C_0$  la concentración de cloruros en la superficie en % en peso del cemento, y  $D_{cl}$ , el coeficiente de difusión de cloruros en el hormigón en  $\text{mm}^2/\text{año}$ .

#### **2.1.4.2 Etapa II: Propagación. Factores que afectan la velocidad de corrosión**

De acuerdo con (West et al., 1999), una vez que la película pasiva sobre el acero ha sido destruida, el proceso de corrosión puede comenzar, siempre que los componentes esenciales de la celda de corrosión estén presentes. La velocidad de corrosión es una función de muchos factores, incluyendo la presencia de humedad y oxígeno, la permeabilidad y resistividad del hormigón, los gradientes en la concentración de iones cloruro, la heterogeneidad en el hormigón y el acero, el pH del agua de los poros del hormigón, la carbonatación, las fisuras y las corrientes aisladas.

En 1983, el ingeniero (Beeby, 1983), en su libro *“Fisuración, Recubrimiento y Corrosión de las armaduras”* sugirió que a largo plazo no existía relación entre el nivel de fisuración por flexión y la corrosión. En un inicio, la velocidad de corrosión aumentaría en un hormigón fisurado, pero a partir del momento de la despasivación de las armaduras, esta velocidad permanecería constante, al igual que le pasaría a la velocidad de corrosión de un hormigón no fisurado, influyendo poco en el resultado final (Figura 7).

A partir de este estudio, se investigó sobre lo que más afectaba a la durabilidad del hormigón armado y se demostró que para limitar este efecto, las medidas más efectivas eran la utilización de hormigones de mejor calidad y el aumento del espesor del recubrimiento de hormigón de las barras de refuerzo.

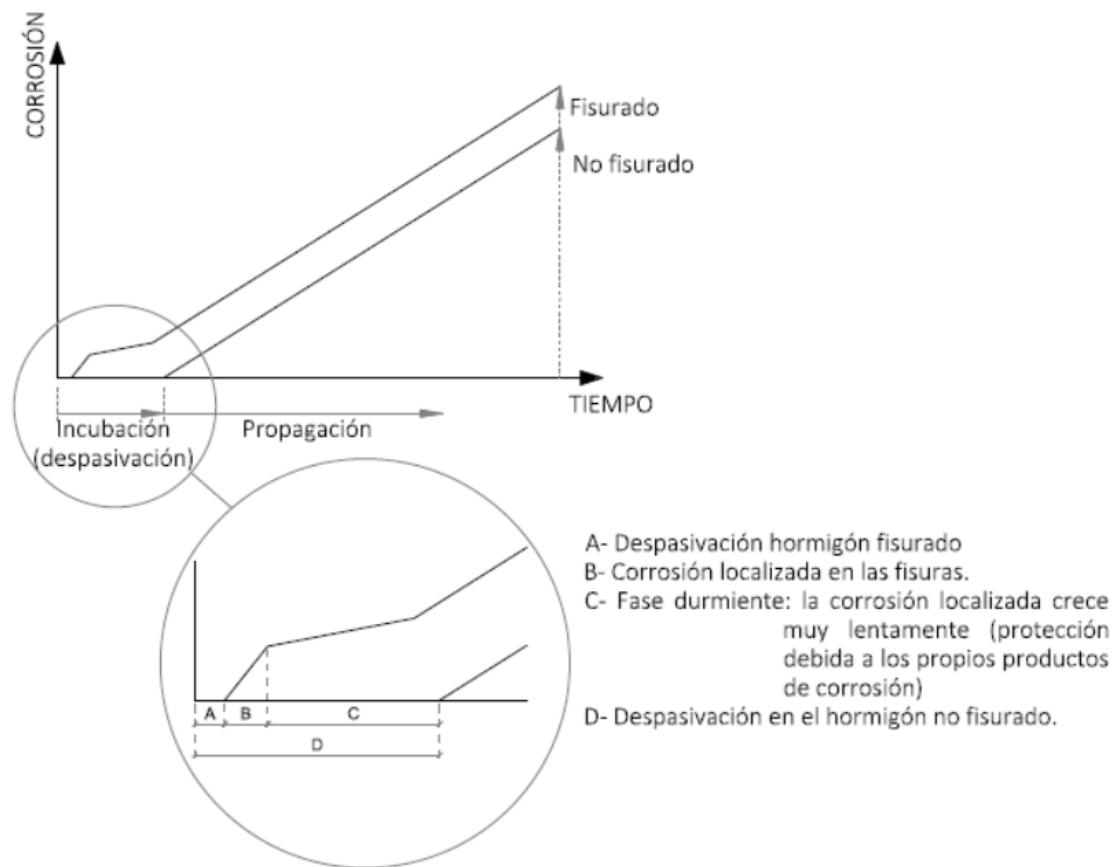


Figura 7 Influencia de la fisuración en la corrosión de las armaduras a largo plazo frente a un hormigón no fisurado adaptado de (Gestión de Estructuras. Juan Ramón Casas Rius. UPC, n.d.)

Por lo tanto, el recubrimiento constituye un parámetro de gran importancia para proveer al acero de refuerzo de la protección requerida durante el período de vida útil considerado de la estructura, siendo decisivo para esta protección, la calidad del hormigón y el espesor del mismo.

Por otro lado, (Otieno, Beushausen, & Alexander, 2012a) afirman que el éxito de incorporar el período de propagación  $t_p$  en el cálculo de la vida útil de las estructuras de hormigón armado, dependerá de lo correcta y realista que sea la velocidad de corrosión utilizada. En el artículo *“Predicción de la velocidad de corrosión en estructuras de hormigón armado – Revisión crítica y resultados preliminares”* hacen una recolección de todas las teorías actuales para obtener la velocidad de corrosión. Afirman que la velocidad de corrosión es uno de los parámetros más importantes para cuantificar el daño de la corrosión y que debe estudiarse más en profundidad.

### Componentes de las celdas de corrosión

Seguindo con (West et al., 1999), en general, las reacciones anódica y catódica deben ser capaces de producirse para que la celda de corrosión se desarrolle. Para la reacción anódica, la película pasiva debe estar ausente para permitir la oxidación del hierro. Un suministro de oxígeno y humedad es necesario para que ocurra la reacción catódica.

La relación entre el área del cátodo y el área del ánodo tiene un efecto significativo sobre la velocidad de corrosión. La velocidad o severidad de corrosión en términos de pérdida de metal está relacionada con la densidad de corriente en el ánodo (es decir, el número de electrones que fluyen a través del área del ánodo). Para una corriente dada en la celda de corrosión, la densidad de la corriente de corrosión aumenta a medida que disminuye el área del electrodo. Por lo tanto, a medida que aumenta la proporción del área del cátodo respecto al área del ánodo, aumenta la densidad de la corriente anódica. Las situaciones en las que existen grandes relaciones entre área de cátodo y área de ánodo pueden conducir a índices de corrosión muy altos y pérdida una muy alta pérdida de sección de la barra de acero en el ánodo. Las condiciones en las que el acero sólo está despasivado en un área pequeña, es decir, cuando se produce la corrosión por picadura, también conducirán a altas velocidades de corrosión.

La celda de corrosión también requiere la transferencia de carga entre el ánodo y el cátodo. Los electrones se mueven entre el ánodo y el cátodo a través del acero. Si se interrumpe el contacto eléctrico en una macrocelda de corrosión, la corrosión cesará. La transferencia de carga también se produce a través de la difusión de iones entre el ánodo y el cátodo. Si la resistividad del hormigón es alta, la difusión de los iones ferrosos e hidroxilo será lenta y la corrosión se limitará bajo los efectos de la polarización.

### Potencial de Corrosión (Fuerza motriz)

De acuerdo con (West et al., 1999), la celda de corrosión electroquímica funciona de la misma manera que un circuito eléctrico. La corriente que fluye en el circuito está relacionada con la fuerza electromotriz en la celda de corrosión. La fuerza electromotriz se mide como una diferencia de potencial (tensión) entre el ánodo y el cátodo. Dicha fuerza electromotriz indica la energía potencial en el sistema, pero no indica directamente la velocidad de corrosión.

La fuerza electromotriz o diferencia de potencial en la celda de corrosión puede resultar de muchas fuentes. En general, cualquier falta de uniformidad entre el ánodo y el cátodo o la no uniformidad dentro del electrolito (hormigón) producirá una diferencia de potencial. La existencia de células de concentración puede dar lugar a una diferencia de potencial resultante de concentraciones no uniformes de oxígeno, humedad, iones

cloruro o iones metálicos en el hormigón. Los gradientes de temperatura o las variaciones del pH también pueden producir células de concentración. Las células de concentración conducen comúnmente a macroceldas de corrosión.

### Efectos de polarización

Según (West et al., 1999), varios factores pueden limitar la velocidad de corrosión a pesar de haber una gran fuerza electromotriz. Estas condiciones se denominan efectos de polarización. Los efectos de la polarización se ilustran mejor utilizando la teoría de potencial de corrosión mixta.

La polarización se define como un cambio en el potencial de una semicélula de un electrodo alejado de su potencial libre o reversible debido al flujo de corriente. Cuando el ánodo y el cátodo están acoplados entre sí, la corriente comienza a fluir y se alcanza un equilibrio entre el potencial de circuito abierto del elemento corrosivo,  $E_{corr}$  y la corriente de corrosión,  $i_{corr}$ .

La velocidad de corrosión del sistema puede ser controlada por tres tipos diferentes de polarización: Polarización de Activación, Polarización de Concentración y Polimerización Óhmica. La polarización de activación se refiere a situaciones en las que la velocidad de corrosión es controlada por reacciones en la interfaz metal-electrolito.

Los mecanismos de control de la velocidad de corrosión más comunes en las estructuras de hormigón son la polarización de la concentración y la polarización óhmica. La polarización de la concentración ocurre cuando las condiciones cambian en el electrolito cerca del ánodo o del cátodo, retardando la velocidad de la reacción. Un ejemplo de polarización de concentración en el hormigón es el agotamiento del oxígeno cerca del cátodo. Esta condición se conoce como control de difusión catódica. La pendiente de la curva de reacción catódica polarizada se aproxima al infinito, dando como resultado potencial de media célula negativo con baja velocidad de corrosión. (Otieno, Beushausen, & Alexander, 2012b)

#### 2.1.5 El papel de los cloruros.

Los cloruros son uno de los factores que más influyen en la corrosión de las armaduras de refuerzo del hormigón. Por lo tanto, se resumirán alguno de los efectos ya contados anteriormente, así como se introducirá alguno más de interés. En este sentido, el papel de los cloruros en la corrosión incluye:

- Catalizador para la oxidación del hierro (reacción anódica): Los cloruros pueden acelerar la corrosión proporcionando reacciones anódicas adicionales.

- Depasivación del acero: La presencia de cloruros puede destruir la película protectora pasiva sobre el acero.
- Células de Concentración: Las concentraciones de cloruros en el hormigón producen un cambio en el potencial de media celda del acero. La diferencia de potencial resultante proporciona a la celda de corrosión la fuerza electromotriz para la corrosión.
- Resistividad del hormigón: La presencia de iones cloruro en el hormigón reduce la resistividad del hormigón. Además, los cloruros aumentan la saturación del hormigón, disminuyendo aún más la resistividad.
- Reducción del pH: La presencia de cloruros puede reducir el pH, afectando a la estabilidad de la película pasiva y aumentando la posibilidad de corrosión por picaduras.
- Daño por congelación: El daño por congelación-descongelación del hormigón es generalmente más severo en presencia de cloruros. El agrietamiento y desprendimiento del recubrimiento, por congelación-descongelación, permite una penetración más rápida de la humedad y de los cloruros, provocando daños más severos por corrosión.

#### *2.1.5.1 Umbral de corrosión de cloruro*

De acuerdo con (West et al., 1999), el riesgo de corrosión aumenta cuando aumenta la concentración de cloruros en el hormigón. El concepto de umbral de corrosión de cloruro se utiliza para indicar el contenido de cloruro por encima del cual se producirá la corrosión. Este concepto supone que la humedad y el oxígeno y las otras condiciones necesarias para la corrosión están presentes. Aunque este concepto es muy interesante, es muy difícil de definir, ya que hay muchos factores influyentes en el contenido de cloruros máximo para la corrosión. Algunas de las cuestiones incluyen:

- La determinación del nivel de cloruros: nivel de cloruros total, cloruros solubles en ácido o cloruros solubles en agua. Por otro lado, los cloruros pueden unirse a diversos compuestos en el hormigón, haciendo que no estén disponibles para la corrosión. Esta unión necesita agua y cloruros solubles. Sin embargo, posteriormente, aquellos cloruros que en principio no corroían el acero, pueden quedar más tarde disponibles para la corrosión, sugiriendo que el contenido de cloruro total o ácido-soluble sea más conservador.
- Si los cloruros fueron mezclados o introducidos por fuentes externas: Se agregarán más cloruros si se incorporan en el hormigón.
- Composición del cemento: El contenido de  $C_3A$  del cemento afecta a la unión de los cloruros.



- Condiciones de exposición: Las concentraciones de humedad y oxígeno influyen en la actividad de la corrosión y, por lo tanto, afectan al umbral. La presencia de sulfatos puede hacer que los cloruros se vuelvan "no adheridos".
- pH de la solución del poro de hormigón: dado que el pH influye en la película pasiva sobre el acero, algunos estudios sugieren que, en lugar de un umbral de cloruro, el umbral de corrosión debe ser en términos de la relación de iones cloruro a iones hidroxilo ( $Cl^- / OH^-$ ).

Muchos investigadores han propuesto valores de umbral de corrosión del cloruro. El Comité Euro-Internacional du Béton<sup>17</sup> (CEB) proporciona el gráfico que se muestra en la Figura 8. Esta figura muestra la influencia del ambiente, la calidad del hormigón y la carbonatación en el contenido crítico de cloruro.

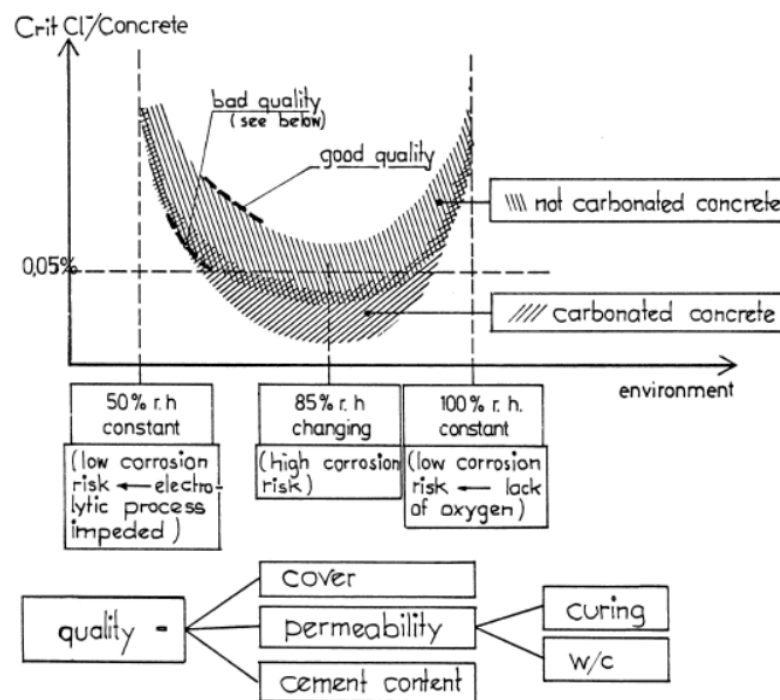


Figure 4.8 - CEB Critical Chloride Ion Content for Corrosion<sup>17</sup>

Figura 8 Contenido crítico de ion cloruro según el Comité Euro-Internacional du Béton<sup>17</sup> (CEB) (West et al., 1999)

Debido a la importancia de los cloruros en el proceso de corrosión, el diseño para la protección contra la corrosión se refiere, principalmente, a impedir que los cloruros entren en el hormigón y alcancen el acero.

### 2.1.6 La corrosión en el hormigón pretensado

De acuerdo con (Calleja, 1966), cuando se produce la corrosión en hormigones pretensados, ésta es, a la vez, más fácil, rápida, y grave que en el hormigón armado. Más fácil y rápida, ya que, por un lado, el acero sometido a tensión es más susceptible y, por otro lado, pueden combinar dicha tensión con la corrosión ordinaria, dando lugar a tipos mixtos de corrosión, de evolución más acelerada. Así mismo puede ser, a su vez, más grave, debido a la sección más pequeña de los alambres que forman un cordón de pretensado, en el que moderadas corrosiones que serían inocuas en el caso del hormigón armado con redondos gruesos, en el caso del pretensado pueden ocasionar disminuciones de sección tales, que provoquen la rotura de las armaduras. Así, pues, cualquier causa que en el hormigón armado pueda promover un efecto corrosivo tolerable, en el hormigón pretensado puede ocasionar un verdadero desastre.

Por lo tanto, las consecuencias de la corrosión del acero de pretensado son potencialmente más severas que la corrosión del refuerzo de las armaduras pasivas. Esta sensibilidad se debe principalmente a la mayor resistencia de los aceros de pretensado y al alto nivel de tensión en el acero. Los aceros de pretensado normalmente experimentan niveles de tensión en servicio del orden del 70% al 80% de su resistencia final. Este porcentaje es mucho menor en el refuerzo de las armaduras pasivas. Debido a estos niveles de tensión más bajos, la pérdida de área de la sección transversal debido a la corrosión tiene menos posibilidad que conduzca al fallo por tracción de las armaduras pasivas. Una mayor resistencia del acero de pretensado también significa que hay menos área de acero en la sección transversal del miembro. Como resultado, la pérdida de una varilla o barra de pretensado tendrá un efecto más importante sobre la capacidad del elemento que la pérdida de una barra de acero pasivo de tamaño equivalente.

Por otra parte, con arreglo a (West et al., 1999), se cree que los aceros de pretensado son más susceptibles a la corrosión que el refuerzo de acero pasivo por varias razones. En el caso de cordones de pretensado de 7 alambres, la relación superficie - volumen es mayor que para la barra de diámetro equivalente, como se ilustra en la Figura 9. Esta relación más grande significa que hay más superficie disponible para la corrosión, y se puede reducir el área de la sección transversal del cordón a un ritmo más rápido.

La configuración del cordón de pretensado de 7 alambres también hace que la hebra sea más susceptible a la corrosión por hendidura. La corrosión por hendidura es un tipo de corrosión severa que ocurre en espacios pequeños o grietas, tales como los intersticios entre los alambres. Las restricciones geométricas de la hendidura aumentan la formación de células de concentración de iones cloruro. Una vez que la corrosión se ha iniciado, avanza similar a la corrosión por picadura. Debido a la geometría de la grieta, los iones  $Fe^{2+}$  no se pueden dispersar fácilmente, y los iones cloruro son atraídos hacia la grieta por la acumulación de carga positiva. El proceso se vuelve autocatalítico ya que, la

presencia de iones cloruro conduce a la formación de ácido clorhídrico (HCl), y a mayores velocidades de corrosión.

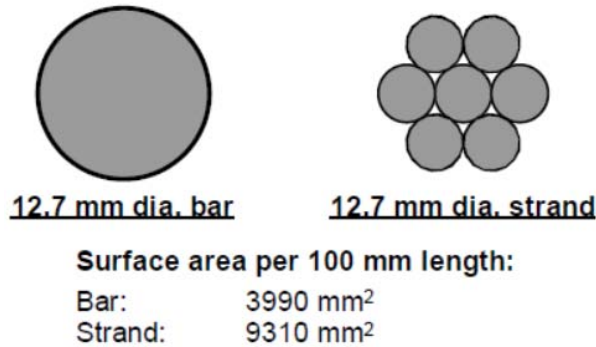


Figura 9 Área de superficie para una barra y un cordón de igual diámetro (West et al., 1999)

Además, los estudios realizados por (Darmawan & Stewart, 2007) demuestran que, un cordón de 7 alambres tiene más probabilidad de fallo y fallaría en un tiempo menor que un solo alambre, tal y como aparece en la Figura 10.

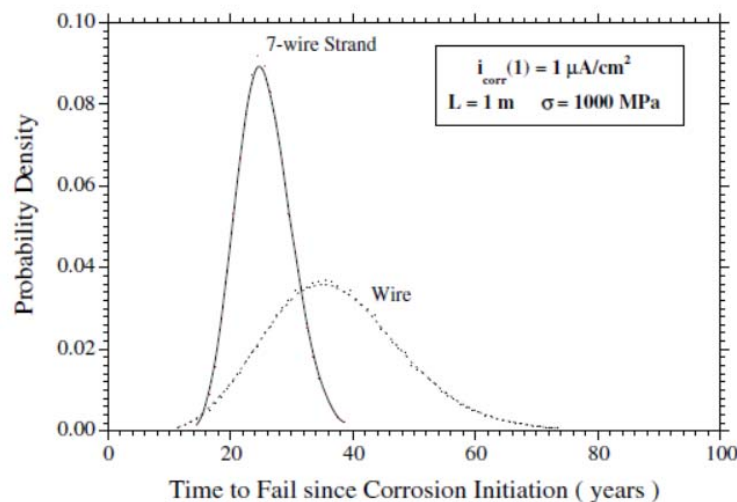


Figura 10 Tiempo de fallo desde el inicio de la corrosión (Darmawan & Stewart, 2007)

Esto es debido a que en 6 cables (los exteriores en un cordón de pretensado) hay más probabilidad de picaduras más profundas y, por lo tanto, se reduce el tiempo de fallo del primer cable. De este modo, cuando falla el primer cable se produce la primera redistribución de esfuerzos. Esto provoca a su vez que los cables restantes estén más cargados y que, tras un tiempo, se produzca el fallo del segundo cable, y así sucesivamente. Solo se considera que hay redistribución de esfuerzos cuando falla algún cable. De este modo, tal y como se ve en la Figura 11, a medida que van fallando cables,

el tiempo para que falle el siguiente es menor, llegando al colapso en el momento que fallan todos los cables.

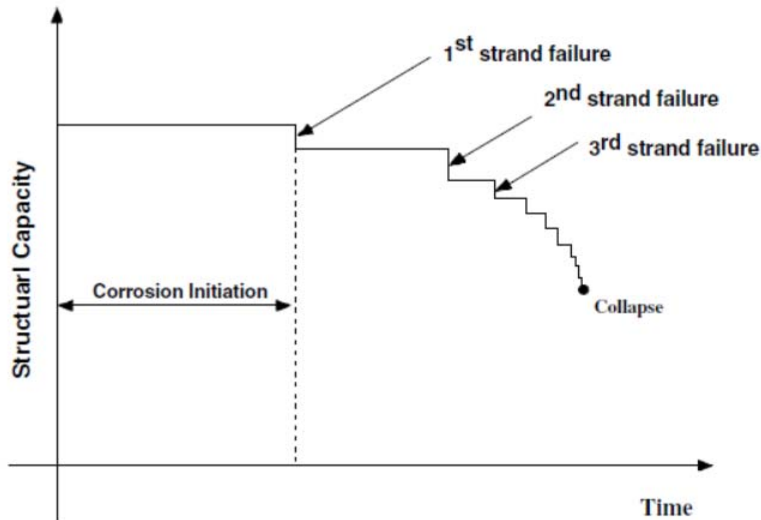


Figura 11 Esquema del proceso de deterioro de estructuras de hormigón pretensado (Darmawan & Stewart, 2007)

Además, de acuerdo con (West et al., 1999), el acero de pretensado de alta resistencia es también más propenso a otras formas de deterioro relacionadas con la corrosión, que no ocurren en el refuerzo del acero pasivo. Estas formas incluyen: agrietamiento por corrosión bajo tensión, fragilización por hidrógeno, fatiga por fricción y fatiga por corrosión. Estos tipos de mecanismos de deterioro son muy difíciles de detectar y pueden conducir a un fallo sin previo aviso.

## 2.2 CONCEPTO DE DURABILIDAD Y FACTORES INFLUYENTES.

De acuerdo con la EHE-08 (Gobierno de España, 2008), la durabilidad de una estructura de hormigón 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 sollicitaciones consideradas en el análisis estructural. Es por ello que es necesario llevar a cabo las medidas necesarias para que la estructura alcance la duración de vida útil acordada, en función de las condiciones de agresividad del ambiente.

Según la EHE-08 ((Gobierno de España, 2008), los factores que influyen en la durabilidad de la estructura de hormigón son:

- La correcta selección del tipo de ambiente en fase de proyecto.
- La selección de una forma estructural adecuada.
- La calidad del hormigón.
- El espesor del recubrimiento para la protección de las armaduras.
- El control del valor máximo de abertura de fisura.
- La adopción de medidas de protección de las armaduras frente a la corrosión.
- La posible disposición de protecciones superficiales en el caso de ambientes muy agresivos.
- La buena calidad de la ejecución de la obra, en especial del proceso de curado.

En este TFM se verá cuáles son los factores más influyentes en la durabilidad de una estructura de hormigón armado, dependiendo del agente agresivo.

### 2.2.1 Tratamiento normativo de la durabilidad. Anejo 9, EHE-08 (Gobierno de España, 2008)

En la comprobación del Estado Límite de Durabilidad, se debe satisfacer la condición:

$$t_L > t_d \quad (5)$$

donde:

$t_L$  Valor estimado de la vida útil

$t_d$  Valor de cálculo de la vida útil

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

$$t_d = \varphi_t \cdot t_g \quad (6)$$

donde:

$\varphi_t$  Coeficiente de seguridad de vida útil, para cuyo valor se adoptará  $\varphi_t=1,10$

$t_g$  Vida útil de proyecto

El método para el cálculo de la vida útil de una estructura, comprende las siguientes fases:

1. Elección de la vida útil de proyecto.
2. Elección del coeficiente de seguridad de vida útil.
3. Identificación de las clases de exposición ambiental a las que puede estar sometida la estructura. Para cada clase, identificación del proceso de degradación predominante.
4. Selección del modelo de durabilidad correspondiente a cada proceso de degradación. A continuación, se recogen algunos de los modelos aplicables para los procesos de corrosión de las armaduras.
5. Aplicación del modelo y estimación de la vida de servicio de la estructura  $t_L$ .

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

### 2.2.1.1 Modelos de durabilidad aplicables para los procesos de corrosión de las armaduras.

En el caso de la corrosión, tanto por carbonatación como por cloruros, el tiempo total  $t_L$  necesario para que el ataque o degradación sean significativos se puede expresar como:

$$t_L = t_i + t_p \quad (7)$$

donde:

$t_i$  Período de iniciación de la corrosión, entendido como el tiempo que tarda el frente de penetración del agresivo en alcanzar la armadura, provocando el inicio de la corrosión.

$t_p$  Período de propagación: tiempo de propagación de la corrosión hasta que se produzca una degradación significativa del elemento estructural.

En el caso de comprobación del Estado Límite de Durabilidad, para el caso de armaduras activas, se considerará un período de propagación,  $t_p=0$ .

#### Período de iniciación

Tal y como hemos definido anteriormente, el período de iniciación es el tiempo desde que se ejecuta la estructura hasta que el agente agresivo llega a las armaduras. Tanto la carbonatación como la penetración de cloruros son procesos de difusión en el hormigón a través de sus poros, que pueden ser modelizados de acuerdo con la siguiente expresión:

$$d = K \cdot \sqrt{t} \quad (8)$$

donde:

$d$  Profundidad de penetración del agresivo, para una edad  $t$ .

$K$  Coeficiente que depende del tipo de proceso agresivo, de las características del material y de las condiciones ambientales.

#### • Modelo de carbonatación

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 siguiente expresión:

$$t = \left(\frac{d}{K_c}\right)^2 \quad (9)$$

donde:

$d$  Profundidad, en mm.

$t$  Tiempo, en años.

$K_c$  Coeficiente de carbonatación. Puede obtenerse como:

$$K_c = c_{env} \cdot c_{air} \cdot a \cdot f_{cm}^b \quad (10)$$

donde:

$f_{cm}$  Resistencia media del hormigón a compresión, en  $N/mm^2$ , que puede estimarse a partir de la resistencia característica especificada ( $f_{ck}$ ).

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (11)$$

$c_{env}$  Coeficiente de ambiente, según tabla A.9.1.

$c_{air}$  Coeficiente de aireantes, según tabla A.9.2.

$a, b$  Parámetros función del tipo de conglomerante, según tabla A.9.3.

Tabla 1 Tabla A.9.1 Coeficiente  $C_{env}$

Ambiente	$C_{env}$
Protegido de la lluvia	1
Expuesto a la lluvia	0,5

Tabla 2 Tabla A.9.2 Coeficiente  $C_{air}$

Aire ocluido (%)	$C_{air}$
<4,5%	1
≥ 4,5%	0,7

Tabla 3 Tabla A.9.3 Coeficientes  $a$  y  $b$ , conforme a la EHE-08 (Gobierno de España, 2008)

Conglomerante	Cementos de la Instrucción RC 03	$a$	$b$
Cemento Portland	CEM I	1800	-1,7
	CEM II/A		
	CEM II/B-S		
	CEM II/B-L		
	CEM II/B-LL		
	CEM II/B-M		
	CEM/V		
Cemento Portland + 28% cenizas volantes	CEM II/B-P	360	-1,2
	CEM II/B-V		
	CEM IV/A		
	CEM IV/B		
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
---------------------------------	------------------------	-----	------

- **Modelo de penetración de cloruros**

El período de tiempo necesario para que se produzca una concentración de cloruros  $C_{th}$  a una distancia  $d$  respecto a la superficie del hormigón puede estimarse con la siguiente expresión:

$$t = \left( \frac{d}{K_{Cl}} \right)^2 \quad (12)$$

donde:

$d$  Profundidad, en mm.

$t$  Tiempo, en años.

$K_{Cl}$  Coeficiente de penetración de cloruros. Puede obtenerse como:

$$K_{Cl} = \alpha \sqrt{12D(t)} \left( 1 - \sqrt{\frac{C_{th} - C_b}{C_s - C_b}} \right) \quad (13)$$

donde:

$\alpha$  Factor de conversión de unidades que vale 56157.

$D(t)$  Coeficiente de difusión efectivo de cloruros, para la edad  $t$ , expresado en  $\text{cm}^2/\text{s}$

$C_{th}$  Concentración crítica de cloruros, expresada en % en peso de 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  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) como:

$$C_s(\% \text{ peso cemento}) = C_s(\% \text{ peso hormigón}) \cdot \left( \frac{2300}{\text{contenido cemento}} \right) \quad (14)$$

$C_b$  Contenido de cloruros aportado por las materias primas (áridos, cemento, agua, etc.), en el momento de fabricación del hormigón.

El coeficiente de difusión de cloruros varía con la edad del hormigón de acuerdo con la siguiente expresión:

$$D(t) = D(t_0) \left( \frac{t_0}{t} \right)^n \quad (15)$$

Donde:

$D(t_0)$  Coeficiente de difusión de cloruros a la edad  $t_0$ .

$D(t)$  Coeficiente de difusión de cloruros a la edad  $t$ .

$n$  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.



Para la utilización del modelo de penetración de cloruros puede emplearse el valor de  $D(t_0)$  obtenido mediante ensayos específicos de difusión (en cuyo caso  $t_0$  sería la edad del hormigón a la que se ha realizado el ensayo), o bien emplear los valores de la siguiente tabla (obtenidos para  $t_0 = 0,0767$ ).

Tabla 4 Tabla A.9.4 Coeficientes D ( $t_0$ ) ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s) conforme a la EHE-08 (Gobierno de España, 2008)

D ( $t_0$ ) ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)					
Tipo de Cemento	Relación a/c				
	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
CEM I	8,9	10	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

En cuanto a la concentración crítica de cloruros ( $C_{th}$ ), aunque puede ser establecida por el Autor del proyecto, en condiciones normales, puede adoptarse un valor del 0,6% del peso de cemento para la comprobación del Estado Límite en relación con la corrosión de las armaduras pasivas. En el caso de armaduras activas pretensas, puede adoptarse un valor límite de  $C_{th}$  de 0,3% del peso de cemento.

El valor de  $C_s$  depende de las condiciones externas, especialmente de la orografía del terreno y el régimen de vientos predominantes en la zona, en el caso de ambientes próximos a la costa. Además,  $C_s$  varía con la edad del hormigón, alcanzando su valor máximo a los 10 años. A falta de valores obtenidos a partir de ensayos en estructuras de hormigón situadas en las proximidades, el Autor del proyecto valorará la posibilidad de adoptar un valor de  $C_s$  de acuerdo con la tabla A.9.4, en función de la clase general de exposición.

Tabla 5 Tabla A.9.4 Concentración de cloruros en superficie de hormigón conforme a la EHE-08 (Gobierno de España, 2008)

C <sub>s</sub> (% en peso de hormigón)					
Clase general de exposición	IIIa		IIb	IIIc	IV
Distancia respecto a la costa	< 500 m	500m-5000m	Cualquiera		-
C <sub>s</sub> (% peso de hormigón)	0,14	0,007	0,72	0,50	0,50

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

### Periodo de propagación

La etapa de propagación se considera concluida cuando se produce una pérdida inadmisibles de sección de la armadura, 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:

$$t_p = \frac{80}{\phi} \frac{d}{v_{corr}} \quad (16)$$

donde

- $t_p$  Tiempo de propagación, en años.
- $d$  Espesor de recubrimiento, en mm.
- $\phi$  Diámetro de la armadura, en mm.
- $v_{corr}$  Velocidad de corrosión, en  $\mu\text{m/año}$ .

A falta de datos experimentales específicos para el hormigón y las condiciones ambientales concretas de la obra, la velocidad de corrosión podrá obtenerse de la tabla A.9.5.

Tabla 6 Tabla A.9.5 Velocidad de corrosión  $V_{corr}$  según la clase general de exposición conforme a la EHE-08 (Gobierno de España, 2008)

Clase 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 zona de mareas	IIIc	50
Con cloruros de origen diferente del medio marino		IV	20

#### 2.2.1.2 Estimación de la vida útil debida a la corrosión de las armaduras

Se considerará que la vida útil de la estructura será el tiempo total, suma del período de iniciación y el de propagación de la corrosión.

En el caso de la corrosión por carbonatación:

$$t_L = t_i + t_p = \left(\frac{d}{K_C}\right)^2 + \frac{80}{\phi} \frac{d}{v_{corr}} \quad (17)$$

En el caso de la corrosión por cloruros será:

$$t_L = t_i + t_p = \left(\frac{d}{K_{Cl}}\right)^2 + \frac{80}{\phi} \frac{d}{v_{corr}} \quad (18)$$

### 2.3 LA FISURACIÓN EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN

La fisuración en elementos de hormigón armado es inevitable, pues aparece cuando se sobrepasa la capacidad resistente del hormigón a tracción. Esta capacidad es baja en comparación con su resistencia a compresión, pues representa un 10 % de la misma (Figura 12), por lo que se exige la comprobación del estado límite de fisuración.

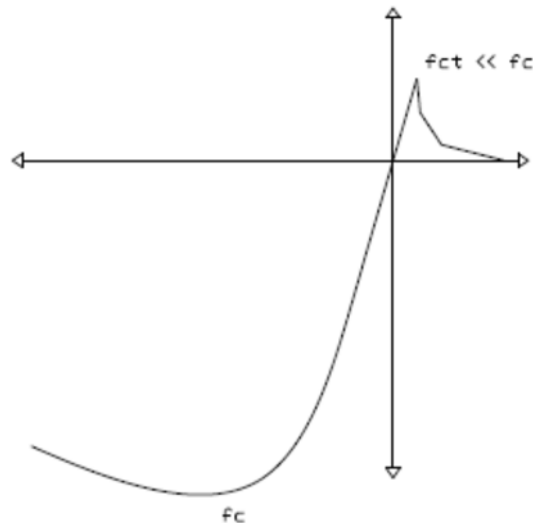


Figura 12 Relación entre la Resistencia a tracción y compresión del hormigón

Las grietas pueden producirse por diferentes efectos. Los más importantes son:

- La acción de las cargas que provocan solicitaciones de flexión o torsión de la sección.
- Los cambios de temperatura.
- La retracción del hormigón u otro tipo de deformación sobre un elemento con determinadas restricciones a los desplazamientos.

Desde siempre, los tres motivos por los cuales ha sido necesario limitar el ancho de fisura en el hormigón han sido: la estética (importante en hormigón visto), la corrosión (importante en ambientes agresivos) y la impermeabilidad (importante, dependiendo del uso).

De estos tres motivos, el directamente ligado a la durabilidad es la corrosión, y el que nos ocupa en el presente TFM.

En hormigón pretensado, el carácter de la fisuración se trata de manera diferente al hormigón armado, pues un pretensado total indica ausencia de fisuras, por lo tanto, no debe fisurar. Debido al alto coste que esto conlleva se opta por pretensados parciales, más óptimos, que permitan la aparición de fisuras menores. Aun así, los criterios de fisuración en hormigón pretensado son más restrictivos que en hormigón armado,

debido a la tensión a la que está sometida la armadura y las consecuencias de la corrosión que se han visto en el apartado 2.1.6 La corrosión en el hormigón pretensado.

### 2.3.1 Enfoque normativo de la fisuración según Eurocódigo 2 (AENOR, 2004)

Según el Eurocódigo 2 (AENOR, 2004) se debe establecer un valor límite,  $w_{m\acute{a}x}$ , para la abertura de fisura calculada,  $w_k$ , teniendo en cuenta la función prevista, la naturaleza de la estructura y los costes de limitar la fisuración.

El ancho de fisura permitido está limitado en función del ambiente en el que se encuentre la estructura. A continuación, se muestran en las siguientes tablas la clasificación de los ambientes y la limitación del ancho de fisura establecido, respectivamente.

Tabla 7 Tabla 4.1 Clases de exposición relacionadas con las condiciones ambientales conforme a la Norma EN 206-1

Designación de la clase	Descripción del ambiente	Ejemplos donde la exposición de la clase puede ocurrir
<b>1. No hay riesgo de corrosión</b>		
X0	Para hormigón sin armadura o metal embebido: todas las exposiciones salvo donde haya ataque hielo/deshielo, abrasión o ataque químico. Para hormigón con armadura o metal embebido: muy seco.	Hormigón dentro de edificios con un nivel de humedad ambiental muy bajo.
<b>2. Corrosión inducida por carbonatación</b>		
XC1	Seco o permanentemente húmedo.	Hormigón dentro de edificios con nivel de humedad ambiental muy bajo. Hormigón permanentemente sumergido en agua.
XC2	Húmedo, raramente seco.	Superficies de hormigón sometidas al contacto con agua un periodo muy largo. Muchas cimentaciones.
XC3	Humedad moderada.	Hormigón dentro de edificios con humedad ambiental moderada o elevada. Hormigón en el exterior, protegido de la lluvia.

XC4	Sequedad y humedad cíclicas.	Superficies de hormigón sometidas al contacto con agua no incluidas en la clase de exposición XC2.
3. Corrosión inducida por cloruros.		
XD1	Humedad moderada.	Superficies del hormigón expuestas a cloruros en la atmósfera.
XD2	Húmedo, raramente seco.	Piscinas. Componentes de hormigón expuestos a aguas industriales que contienen cloruros.
XD3	Sequedad y humedad cíclicas.	Partes de puentes expuestos al riego conteniendo cloruros. Pavimentos. Losas en aparcamientos de coches.
4. Corrosión inducida por cloruros de agua marina		
XS1	Exposición al aire saturado de sal peor no en contacto directo con el agua del mar.	Estructuras cerca de, o en la costa.
XS2	Permanentemente sumergida.	Partes de estructuras marinas.
XS3	Zonas de mareas, salpicaduras y aspersiones.	Partes de estructuras marinas.
5. Ataque hielo/deshielo		
XF1	Moderada saturación de agua, sin productos de deshielo.	Superficies verticales de hormigón expuestas a lluvia y hielo.
XF2	Moderada saturación de agua, con productos de deshielo.	Superficies verticales de hormigón de estructuras de carretera expuestas a congelación y al ambiente de productos de deshielo.
XF3	Alta saturación de agua, sin productos de deshielo.	Superficies horizontales de hormigón expuestas a lluvia y hielo.
XF4	Alta saturación de agua con productos de deshielo o agua de mar.	Plataformas de carretera y tableros de puente expuestos a productos de deshielo. Superficies de hormigón expuestas directamente a la aspersión conteniendo productos de deshielo.

6. Ataque químico		
XA1	Ambiente de una débil agresividad química conforme a la tabla 2 de la Norma EN 206-1	Terrenos naturales y aguas subterráneas.
XA2	Ambiente de una moderada agresividad química conforme a la tabla 2 de la Norma EN 206-1	Terrenos naturales y aguas subterráneas.
XA3	Ambiente de una alta agresividad química conforme a la tabla 2 de la Norma EN 206-1	Terrenos naturales y aguas subterráneas.

Tabla 8 Tabla 7.1 N Valores recomendados de  $w_{max}$  (mm) conforme al Eurocódigo 2 (AENOR, 2004)

Clase de exposición	Armaduras pasivas o activas no adherentes. Combinación de carga cuasipermanente	Armaduras activas adherentes. Combinación de carga frecuente
X0, XC1	0,4 <sup>(1)</sup>	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 <sup>(2)</sup>
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		Descompresión
(1) Si no hay consideraciones de apariencia, este límite puede aumentarse.		
(2) Comprobar también la descompresión en combinaciones cuasipermanentes.		

### 2.3.1.1 Comprobación del estado límite de fisuración

El Eurocódigo 2 (AENOR, 2004) establece el cálculo de la armadura mínima necesaria para controlar los fenómenos de fisuración, y la comprobación de la abertura máxima de fisura de acuerdo con la siguiente expresión:

$$w_k \leq w_{max} \quad (19)$$

siendo  $w_k$  la abertura de cálculo de fisura y  $w_{max}$  la abertura máxima de fisura según la clase de exposición de la estructura.

Según el apartado 7.3.4 Cálculo de las aberturas de fisura del EC2 (AENOR, 2004) la abertura de fisura,  $w_k$  se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$w_k = s_{r,máx.} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (20)$$

Donde:

$s_{r,m\acute{a}x}$ . Separación máxima entre fisuras.

$\varepsilon_{sm}$  Alargamiento unitario medio en la armadura bajo la combinación relevante de cargas, incluido el efecto de deformaciones impuestas y teniendo en cuenta los efectos de la rigidización por la colaboración del hormigón entre fisuras. Sólo se considera el alargamiento por tracción adicional más allá del estado de deformación cero del hormigón al mismo nivel.

$\varepsilon_{cm}$  Deformación unitaria media en el hormigón entre fisuras.

$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$  se puede calcular a partir de la ecuación:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (21)$$

Donde:

$\sigma_s$  Tensión en la armadura de tracción considerando la sección fisurada. Para elementos con armadura pretesa, se puede reemplazar  $\sigma_s$  por  $\Delta\sigma_p$ , la variación de tensiones en las armaduras activas a partir del estado de tensión cero del hormigón al mismo nivel.

$\alpha_e$  Relación  $E_s/E_{cm}$ .

$\rho_{p,eff}$   $(A_s + \xi_1 A_p') / A_{c,eff}$

$k_t$  Coeficiente dependiente de la duración de la carga:

$k_t = 0,6$  para carga a corto plazo

$k_t = 0,4$  para carga a largo plazo

En situaciones donde la armadura adherente se dispone a una distancia menor que  $5(c+\phi/2)$ , se puede calcular la distancia máxima final entre fisuras a partir de la siguiente ecuación:

$$s_{r,m\acute{a}x} = k_3 c + \frac{k_1 k_2 k_4 \phi}{\rho_{p,eff}} \quad (22)$$

Donde:

$\phi$  Diámetro de la barra. Cuando en una sección se utilizan varios diámetros, se debería usar un diámetro equivalente,  $\phi_{eq}$ . Para una sección con  $n_1$  barras de  $\phi_1$  de diámetro y barras  $n_2$  de diámetro  $\phi_2$  se debería usar la siguiente ecuación:

$$\phi_{eq} = \frac{n_1 \phi_1^2 + n_2 \phi_2^2}{n_1 \phi_1 + n_2 \phi_2} \quad (23)$$

$c$  Recubrimiento de la armadura longitudinal;

$k_1$  Coeficiente que considera las propiedades de adherencia de la armadura adherente:

$k_1 = 0,8$  para barras de alta adherencia

$k_1 = 1,6$  para barras con una superficie lisa (por ejemplo, armaduras activas)  
 $k_2$  coeficiente que considera la distribución de las deformaciones unitarias:  
 $k_2 = 0,5$  para flexión  
 $k_2 = 1,0$  para tensión pura.  
 $k_3 = 3,4$   
 $k_4 = 0,425$

Si las distancias entre las barras de la armadura adherente supera  $5(c+\phi/2)$ , o si no hay armadura adherente dentro de la zona de tracción, se puede obtener un límite superior de la abertura de fisuras suponiendo una separación entre fisuras máxima de:

$$s_{r,m\acute{a}x} = 1,3(h - x) \quad (24)$$

## 2.4 EFECTO DE LA FISURACIÓN EN LA CORROSIÓN

De acuerdo con el apartado “3.3 *Influencia de las grietas en la corrosión de las armaduras de refuerzo*” del Código Modelo (International Federation for Structural Concrete Task Group 5.6, 2006), la velocidad de corrosión en la zona de fisuras que atraviesan la armadura de refuerzo son extremadamente dependientes de las condiciones micro climáticas en la superficie del hormigón, así como de la orientación de dicha superficie. En el caso de superficies horizontales de hormigón con grietas y ataque de cloruros desde la parte superior del mismo, nos encontramos ante unas condiciones muy severas. Sin embargo, en el caso de superficies verticales u horizontales, en el que el cloruro viniera desde la parte de debajo, con una calidad alta del hormigón y un ancho de fisura menor que 0,3 mm se asegura una vida de servicio de más de 50 años, sin ninguna protección extra.

Por otro lado, en caso de corrosión inducida por carbonatación, una calidad adecuada del hormigón y la limitación del ancho de fisura ordinario garantizan una vida útil suficientemente larga ( $\geq 50$  años) sin protección adicional.

Según (Hartt, 2009), en la actualidad hay una creencia general de que las fisuras del hormigón, cuando superan un cierto ancho, facilitan el ingreso de cloruros y el inicio de la corrosión. Esto ha llevado a establecer condiciones de diseño en el que la fisura no puede superar un cierto valor máximo marcado por las normativas. Sin embargo, la correlación entre ancho de fisura y extensión de la corrosión no es particularmente alta, sobre todo para anchos de fisura tan finos como los que marca la norma.

Por otra parte, en el debate “*Ancho de fisura, recubrimiento y corrosión*” (ACI, 1984) ya se citaban dos teorías sobre el rol de la fisura en la corrosión de las armaduras, ya mencionadas anteriormente. La teoría número 1 afirmaba que las fisuras reducían



significativamente la vida en servicio de las estructuras por permitir el acceso de iones cloruro, humedad y oxígeno a las armaduras, no sólo acelerando el inicio de la corrosión sino además proporcionando espacio para el depósito de los productos de corrosión. El argumento opuesto, la teoría número 2, argumentaba que mientras las fisuras pueden acelerar el inicio de la corrosión, tal corrosión está localizada y confinada en las barras de refuerzo intersectadas. Dado que los iones de cloruro acaban penetrando finalmente en el hormigón no agrietado e inician una corrosión más generalizada, después de unos cuantos años de servicio hay poca diferencia entre la cantidad de corrosión en hormigón fisurado y hormigón no fisurado. (Figura 7).

Así mismo, también se señalaron factores que tenían una influencia en el efecto de las fisuras en la corrosión. Estos efectos podían ser agrupados en dos categorías:

- En primer lugar, aquellos que eran relativos a la fisura misma: anchura, profundidad, orientación de las fisuras con respecto a la armadura, intensidad de las fisuras y origen de las mismas.
- En segundo lugar, el grupo de factores que giran alrededor del tipo de estructuras y la calidad del hormigón. Se incluye el tipo de ambiente, el tipo de estructura en sí, los medios por los que se pierden la pasividad de las armaduras, la resistividad del hormigón, si la estructura tiene una protección catódica y si es intencionada o no.

Por otro lado, en la investigación llevada a cabo por (Audenaert, Katrien; De Schutter, Geert; Marsavina, Liviu; Boel, 2009) se afirma que la penetración de cloruros y la corrosión resultante es el mayor problema de durabilidad para estructuras de hormigón en ambientes marinos. Si el hormigón tiene fisuras causadas por retracción, secado, efectos térmicos o sobrecargas por encima de las previstas, la penetración de cloruros es mucho más rápida que en hormigones no fisurados. En este sentido, el proceso de corrosión se inicia muy pronto y, por consiguiente, la vida útil de servicio decrece drásticamente. De sus ensayos obtuvieron que, para anchos de fisura mayores, se incrementaba la profundidad máxima de penetración de los cloruros. Por otro lado, la extensión de la zona de influencia de la fisura dependía de la anchura de la misma. Así, para fisuras de hasta 0,08 mm el área de influencia llegaba a los 15 mm de la fisura, mientras que para anchuras mayores, dicha área de influencia podía llegar a los 30 mm.

Así mismo, en la investigación realizada por (Smilauer et al., 2016), éste afirma que usando métodos para calcular la profundidad de carbonatación y penetración de cloruros en el que se introduce el ancho de fisura en la formulación (fórmulas ( 25) y ( 26)) se observa que para una fisura de 0.3 mm el tiempo de inducción decrece aproximadamente 6 veces en ambos fenómenos.

Del mismo modo, en otras investigaciones llevadas a cabo por (Otieno et al., 2012b) se asegura que la práctica de adoptar un ancho de fisura universal para un rango extenso

de condiciones de servicio, recubrimiento y calidad del hormigón no es válido, puesto que existe una clara influencia del recubrimiento en la corrosión del acero:

- Para una calidad de hormigón y recubrimientos dados, habrá mayor corrosión si hay un ancho de fisura mayor.
- Para un ancho de fisura y un recubrimiento dados, habrá mayor corrosión si la calidad del hormigón es menor.

En este sentido, hay una clara relación entre ancho de fisura, recubrimiento y calidad del hormigón, con la velocidad de corrosión por cloruros. Asimismo, la velocidad de corrosión que se produce con un ancho de fisura dado varía, dependiendo de la calidad del hormigón y del recubrimiento.

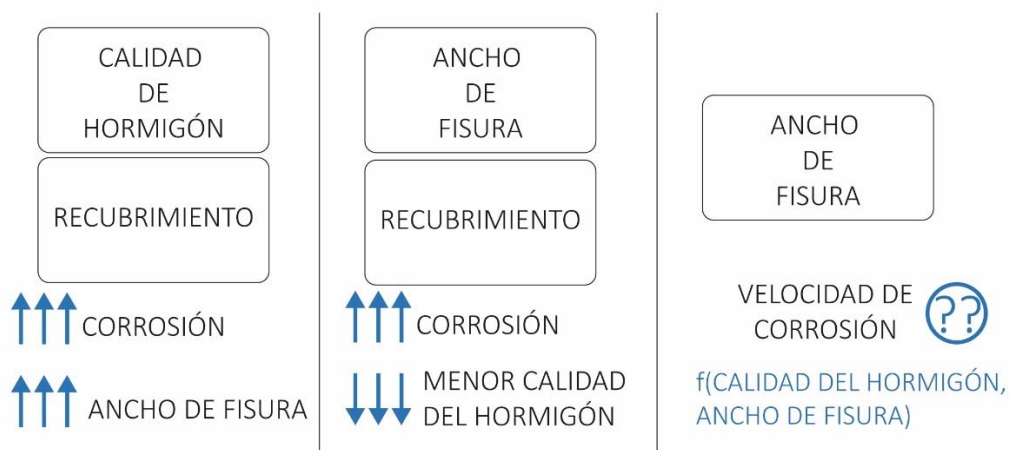


Figura 13 Esquema sobre la influencia del recubrimiento en la corrosión

Por último, según (Otieno et al., 2012b), limitar el ancho de fisura transversal en la superficie para controlar la corrosión del acero no significa evitar el ataque, pues la corrosión de las armaduras en caso de ataques por cloruros en superficies horizontales de hormigón puede ser debidas a encharcamientos de los cloruros en la superficie del hormigón. En este caso, la ausencia de fisura no evitaría, por tanto, el ingreso rápido de los cloruros en el mismo. Por otro lado, en presencia de fisuras en el recubrimiento, el impacto de incrementar dicho recubrimiento, podría sustancialmente reducir sus beneficios. Además, añade que anchos de fisura diferentes, por ejemplo 0.4 y 0.7, deben ser tratados de manera separada, pues no tienen el mismo efecto.

### 2.4.1 Carbonatación

Según (Kwon, Na, Park, & Jung, 2009), la presencia de fisuras en los elementos de hormigón armado acelera el ingreso de carbonatación. Para simular esta aceleración y conocer la profundidad del frente de carbonatación, proponen la siguiente fórmula:

$$x_c(t) = (2.816\sqrt{w} + 1)A_t\sqrt{t} \quad (25)$$

Donde:

$x_c(t)$  Profundidad de carbonatación

$w$  Ancho de fisura en mm

$A_t$  Coeficiente de carbonatación

Si comparamos esta fórmula con la fórmula ( 2) y la fórmula ( 9) vemos que  $A_t$  equivale a  $K_c$ , el coeficiente de carbonatación. El coeficiente de carbonatación, en la fórmula ( 25) está afectado por un factor que depende del ancho de fisura. Si el ancho de fisura fuera 0, la fórmula sería equivalente a la fórmula ( 9) que propone el Anejo 9 de la EHE-08 (Gobierno de España, 2008), una prueba más de que el Anejo 9 no tiene en cuenta el efecto de la fisura en el cálculo de la durabilidad.

Por lo tanto, el coeficiente de carbonatación estará multiplicado por un factor mayor que 1, dependiente del ancho de fisura, que hará que la carbonatación llegue a más profundidad que con ausencia de fisuras. Nótese que con una fisura de ancho 0,3 mm, la profundidad de carbonatación se incrementa 2,54 veces. Esto a su vez, significa que el tiempo de inducción es 6,46 veces menor que un hormigón sin fisurar, con lo que la normativa nos conduciría a un estudio de la vida útil mayor que la que realmente tienen las estructuras sometidas a este agente agresor.

### 2.4.2 Penetración de cloruros.

La penetración de cloruros está directamente ligada al coeficiente de difusión de cloruros. (Poulsen, 1993) hizo un estudio sobre la penetración de cloruros en el hormigón a partir de un coeficiente de difusión dependiente del tiempo. En su estudio, (Poulsen, 1993) hace una comparativa entre la evolución en el tiempo de la fuerza de compresión del hormigón y la difusión de cloruros. Afirma que el desarrollo de la fuerza de compresión del hormigón tiene la misma tendencia que el desarrollo de la resistencia a la difusión de cloruros: el hormigón desarrolla fuerza de compresión con el tiempo y algunas características de este desarrollo se encontrarán en el desarrollo del coeficiente de difusión del hormigón. Por lo tanto, del mismo modo que el cemento Portland, el humo de sílice, las cenizas volantes y las escorias contribuyen en la fuerza de compresión,

también lo harán en el coeficiente de difusión en diferentes formas. Por ejemplo, el efecto de las cenizas volantes en la fuerza de compresión se muestra principalmente después de los 28 días de maduración. Así mismo los test de difusión, cuando hay cenizas volantes en el hormigón, muestran la misma tendencia.

Además (Poulsen, 1993) afirma que asumir que el coeficiente de difusión es constante en el tiempo es la más simple de las asunciones y por lo tanto no es válida para la difusión de iones cloruro en el hormigón. Según este investigador, es posible mencionar varios fenómenos que no obedecen esta simple relación:

- El hormigón es heterogéneo en su estructura. Consiste en agregados y una matriz de cemento que tienen defectos. Por lo tanto, la difusión de cloruros debería variar punto a punto.
- La porosidad capilar del hormigón varía con la madurez del mismo. Por lo tanto, el coeficiente de difusión también depende de la madurez. Así, para temperaturas constantes de hormigón, el coeficiente de difusión depende del tiempo desde que el hormigón fue vertido.
- El proceso de difusión, donde los movimientos térmicos aleatorios de los iones cloruro tienden a reducir la diferencia en la concentración de cloruro, dependen de la temperatura.
- En algunos casos, el coeficiente de difusión depende de la concentración de las sustancias de difusión.
- La difusión de los iones cloruro solo tienen lugar en el líquido de los poros capilares del hormigón, si están llenos o casi llenos. El rango del tamaño de los poros es aproximadamente desde 2 mm a 5  $\mu\text{m}$  de diámetro. Si los poros de capilaridad contienen exceso de agua de la mezcla o del exterior, el proceso de difusión puede tener lugar. Sin embargo, si el hormigón se seca, los poros gruesos estarán vacíos antes que los poros más finos. Así, la cantidad de poros de capilaridad disponibles para la difusión dependerá de la humedad del hormigón y por lo tanto, el coeficiente de difusión de cloruros depende de la humedad del mismo.

Esta variedad y complejidad de variables en que el coeficiente de difusión de cloruros depende de muchas variables hace complicado usar la primera ley de difusión de Fick.

Así mismo, (Poulsen, 1993) también afirma que si la segunda ley de Fick es aplicada para un largo período, por ejemplo para el cálculo de la vida útil de una estructura de hormigón armado, se tiene que tener en cuenta que la difusión de cloruros depende de la madurez del hormigón y varía con el tiempo.

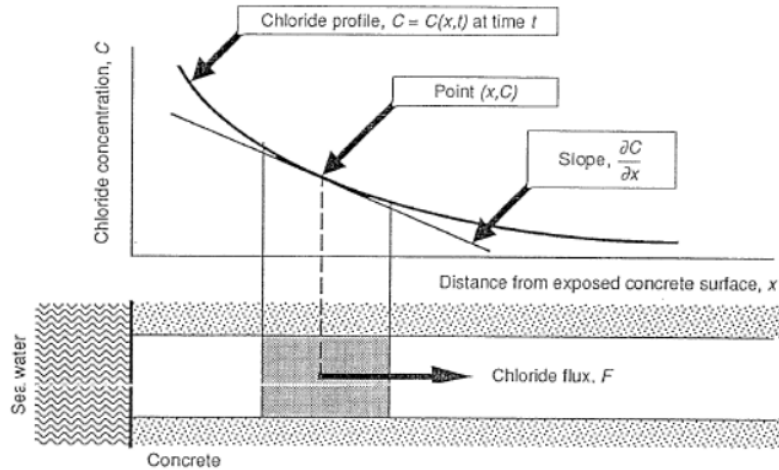


Figura 14 La primera ley de difusión de Fick expresa que el flujo de iones cloruro en el hormigón es proporcional al gradiente de concentración de cloruros normal a la sección (Poulsen, 1993)

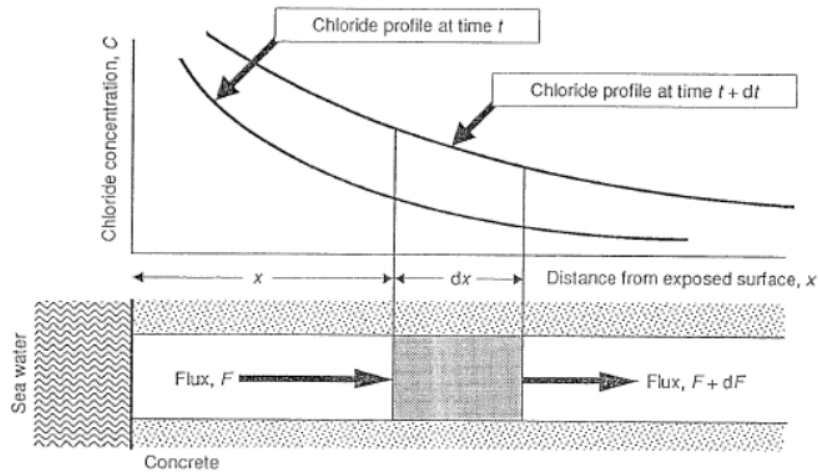


Figura 15 La primera ley de difusión de Fick expresa el cambio en el flujo por unidad en el eje x (Poulsen, 1993)

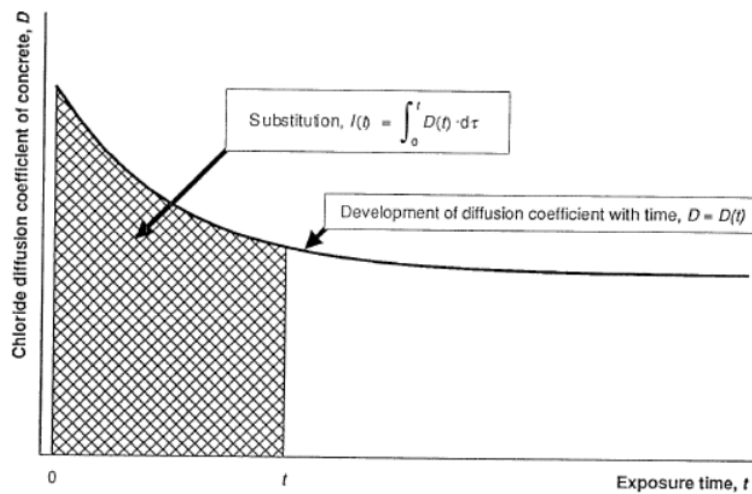


Figura 16 El coeficiente de difusión de cloruros D del hormigón decrece con la madurez del mismo (Poulsen, 1993)

Por otro lado, de acuerdo con (Kwon et al., 2009) es difícil evaluar el efecto de las fisuras cuando se trata de difusión de cloruros. En su estudio, realiza un enfoque probabilístico y afirma que la probabilidad de fallo llega a ser muy alta cuando se incrementa el ancho de fisura, y en consecuencia la vida útil decrece rápidamente.

Considerando un contenido inicial libre de cloruros, propone el siguiente modelo para el ingreso de cloruros:

$$C(x, t) = C_s \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_m(t)f(w)t}} \right) \right] \quad (26)$$

Donde:

$C_s$  Contenido de cloruro en la superficie del hormigón ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$D_m$  Coeficiente de difusión media en el tiempo  $t$  ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )

$$D_m = \frac{D_{ref}}{1-m} \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad \text{para } t < t_R \quad (27)$$

$$D_m = D_{ref} \left[ 1 + \frac{t_R}{t} \left( \frac{m}{1-m} \right) \right] \left( \frac{t_{ref}}{t_R} \right)^m \quad \text{para } t \geq t_R \quad (28)$$

Donde:

$D_{ref}$  Coeficiente de difusión en el tiempo de referencia  $t_{ref}$ .

$t_{ref}$  Tiempo de referencia. Tomado como  $t_{ref}=28$  días.

$t_R$  Tiempo en el cual el coeficiente de difusión se asume constante. Tomado como  $t_R=30$  años.

$t$  Tiempo para el cual quieres encontrar el coeficiente de difusión media.

$m$  Coeficiente dependiendo de las proporciones de la mezcla, y de valor, según (Kim, Lee, & Kwon, 2014):

$$m = 0,2 + 0,4 \left( \frac{FA}{50} + \frac{SG}{70} \right) \quad (29)$$

Donde FA es el ratio de cenizas volantes y SG el ratio de escorias.

$x$  Posición de los cloruros en mm

$f(w)$  Aceleración debido a la fisura, para  $w \geq 0,1$  mm. Para hormigones no fisurados,  $f(w)$  es igual a 1.

$$f(w) = 31.61w^2 + 4.73w + 1 \quad (30)$$

En los siguientes gráficos se puede ver el diferente comportamiento en el modelo de ingreso de cloruros, dependiendo del momento en el que los cloruros lleguen a la armadura, si es anterior o posterior a 30 años. Para estimar cómo se comporta cada una de las fórmulas ( 27) y ( 28), se han realizado dos gráficos que muestran cómo variaría el período de iniciación en cada uno de ellos.

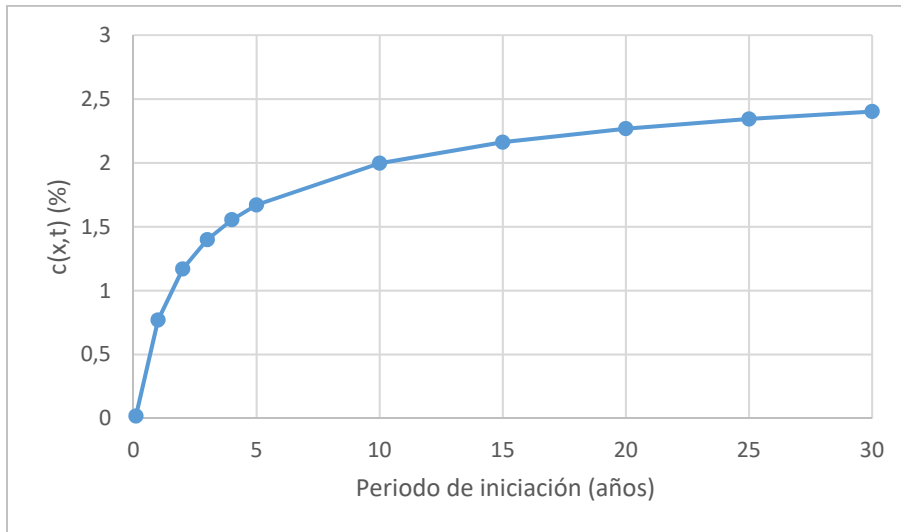


Figura 17 Modelo de ingreso de cloruros para  $t < 30$  años

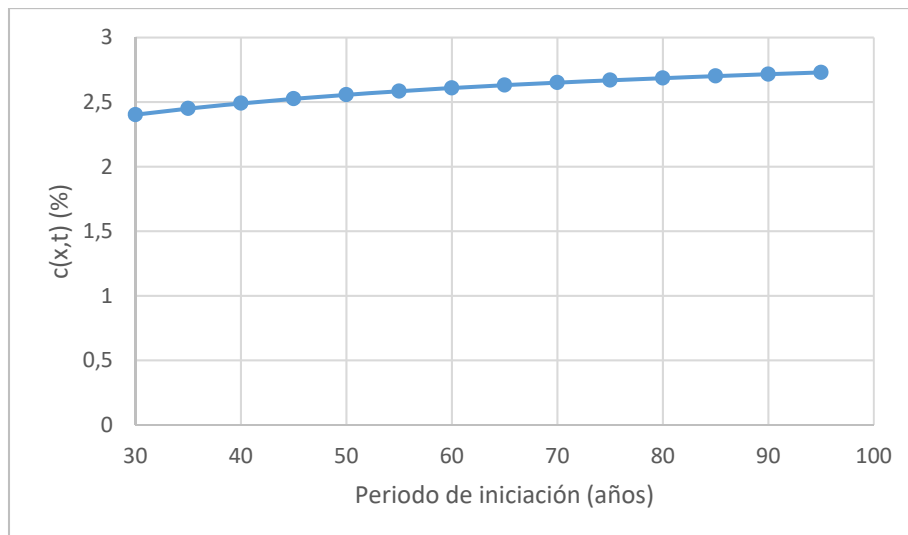


Figura 18 Modelo de ingreso de cloruros para  $t \geq 30$  años

De este modo, podemos ver que la concentración de cloruros varía mucho con el tiempo en los primeros 30 años. Sin embargo, posterior a los 30 años, vemos que esa concentración tiene una tendencia más constante.

Según (Kwon et al., 2009), aunque los métodos normativos suelen ser más conservadores, en el caso de los cloruros se puede llegar a sobreestimar la vida en servicio cuando son aplicados valores altos de anchos de fisura. Esto es debido a la subestimación del coeficiente de difusión en el hormigón fisurado. En este TFM veremos la diferencia entre el cálculo incluyendo el ancho de fisura y el cálculo con el Anejo 9, el cual no tiene en cuenta la fisura.

Por último, en el diseño por durabilidad, para la difusión de cloruros, se tiene en cuenta que el contenido de cloruros inducido durante la vida útil no debería exceder el contenido de cloruros crítico localizado en la barra de acero embebida. El inicio de la corrosión es definido como el tiempo en que el contenido de cloruros en la superficie del acero alcanza su valor crítico (Kwon et al., 2009). En este TFM se toma como concentración crítica de cloruros, tal y como recomienda la EHE-08 (Gobierno de España, 2008), de 0.6‰ para hormigón armado y 0.3‰ para hormigón pretensado. Se considera que el fallo por durabilidad ocurre cuando se alcanza el contenido crítico de cloruros al nivel de la barra.



## CAPÍTULO 3: ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE AMBIENTE Y DURABILIDAD EN LA CUANTÍA DE ARMADURA NECESARIA

### 3.1 ARMADURA NECESARIA PARA EL CUMPLIMIENTO DE ESTADO LÍMITE ÚLTIMO Y ESTADO LÍMITE DE DURABILIDAD

Tal y como se ha comentado anteriormente en el apartado 1.3 Metodología, se ha realizado un estudio comparativo para diferentes vidas útiles, casos de carga, diámetros y clases de exposición, con el objetivo de comparar la armadura necesaria para cumplir con ELU y ELD y ver cómo afecta cada uno de los parámetros.

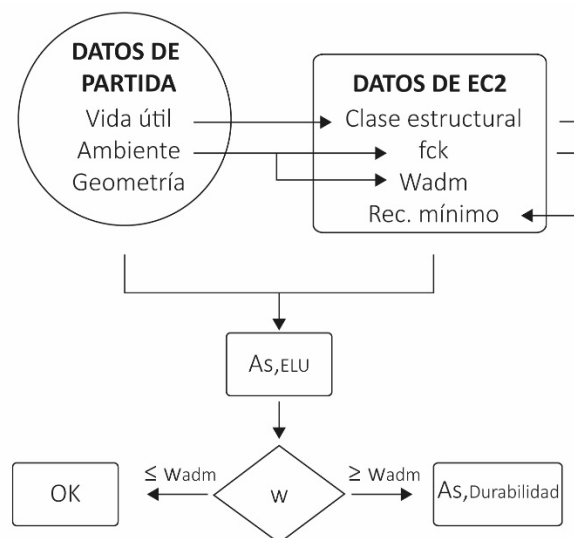


Figura 19 Diagrama de flujo de la obtención de la armadura necesaria para ELU y ELD

De este modo, se ha calculado la armadura necesaria para ELU y el ancho de fisura obtenido con dicha armadura. En los casos en los que el ancho de fisura es mayor que el fijado por la norma para el tipo de ambiente considerado, se ha calculado cuánta armadura es necesaria para cumplir con el requisito normativo.

La geometría elegida para la comparación ha sido una viga de hormigón armado sometida a flexión, de sección 0,3x0,5 metros y 5 metros de luz.

Para el estudio, se han elegido 4 casos de carga, con relaciones carga última/carga de servicio de 2.57, 2.37, 1.96 y 1.86. Uno de los objetivos es ver cómo afecta dicha relación en la armadura final que se habría de colocar en una viga, calculado con el método normativo.

Las relaciones entre las cargas se han obtenido de la siguiente forma:

$$\frac{Q_d}{Q_{cuasi}} = \frac{1,35G + 1,5Q}{G + \Psi Q} \quad (31)$$

Siendo G la carga permanente y Q la carga variable.

De este modo, el resumen de los casos estudiados sería el siguiente:

Tabla 9 Casos estudiados para diámetros 16 y 25 mm

Proceso de degradación predominante	Ambientes EC2	Ambientes EHE-08	Hormigón Armado		Hormigón pretensado	
			W <sub>max</sub> EC,2	W <sub>max</sub> , EHE-08	W <sub>max</sub> EC,2	W <sub>max</sub> , EHE-08
Carbonatación	XC1	I	0,4	0,4	0,2	0,2
	XC4	IIb	0,3	0,3	0,2	0,2
Penetración de Cloruros	XS2	IIIb	0,2	0,2	Descomp.	Descomp.
	XD3	IV	No definido	0,2	Descomp.	Descomp.
	XS3	IIIc	0,3	0,1	Descomp.	Descomp.

Los resultados obtenidos, han sido los siguientes:

Tabla 10 Resultados obtenidos de la comparación de armadura necesaria final, con la armadura necesaria para ELU, para diámetro 16 mm.

t <sub>g</sub> =30 AÑOS → t <sub>d</sub> =33 años										
Amb.	f <sub>ck</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>min</sub> [mm]	Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 2,57 (Q <sub>d</sub> =62,81 kN)		Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 2,37 (Q <sub>d</sub> =47,81 kN)		Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 1,96 (Q <sub>d</sub> =40,31 kN)		Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 1,86 (Q <sub>d</sub> =55,31 kN)	
			W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> /A <sub>s,ELU</sub>	W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> /A <sub>s,ELU</sub>	W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> /A <sub>s,ELU</sub>	W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> /A <sub>s,ELU</sub>
XC1	20	16	0,11	1,00	0,14	1,00	0,19	1,00	0,17	1,00
XC4	30	25	0,14	1,00	0,17	1,00	0,22	1,00	0,21	1,00
XS2	35	35	0,16	1,00	0,19	1,00	0,25	1,92	0,25	1,72
XD3	35	40	0,17	1,00	0,20	1,00	0,26	2,33	0,26	2,10
XS3	35	40	0,17	5,02	0,20	7,66	0,26	13,14	0,26	10,94
t <sub>g</sub> =50 AÑOS → t <sub>d</sub> =55 años										
Amb.	f <sub>ck</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>min</sub> [mm]	Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 2,57 (Q <sub>d</sub> =62,81 kN)		Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 2,37 (Q <sub>d</sub> =47,81 kN)		Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 1,96 (Q <sub>d</sub> =40,31 kN)		Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 1,86 (Q <sub>d</sub> =55,31 kN)	
			W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> /A <sub>s,ELU</sub>	W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> /A <sub>s,ELU</sub>	W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> /A <sub>s,ELU</sub>	W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> /A <sub>s,ELU</sub>
XC1	20	16	0,11	1,00	0,14	1,00	0,19	1,00	0,17	1,00
XC4	30	30	0,15	1,00	0,18	1,00	0,24	1,00	0,23	1,00
XS2	35	40	0,17	1,00	0,20	1,00	0,26	2,33	0,26	2,10
XD3	35	45	0,19	1,00	0,21	1,29	0,27	2,45	0,28	2,57
XS3	35	45	0,19	6,08	0,21	9,21	0,27	15,49	0,28	12,79

t <sub>g</sub> =100 AÑOS → t <sub>d</sub> =110 años										
Amb.	f <sub>ck</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>min</sub> [mm]	Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 2,57 (Q <sub>d</sub> =62,81 kN)		Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 2,37 (Q <sub>d</sub> =47,81 kN)		Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 1,96 (Q <sub>d</sub> =40,31 kN)		Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 1,86 (Q <sub>d</sub> =55,31 kN)	
			W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> / A <sub>s,ELU</sub>	W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> / A <sub>s,ELU</sub>	W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> / A <sub>s,ELU</sub>	W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> / A <sub>s,ELU</sub>
XC1	20	25	0,14	1,00	0,17	1,00	0,23	1,00	0,21	1,00
XC4	30	40	0,18	1,00	0,21	1,00	0,27	1,00	0,26	1,00
XS2	35	50	0,20	1,00	0,22	1,62	0,29	3,48	0,29	3,12
XD3	35	55	0,21	1,18	0,23	2,00	0,30	4,20	0,31	3,75
XS3	35	55	0,21	8,26	0,23	12,36	0,30	20,08	0,31	16,36

Tabla 11 Resultados obtenidos de la comparación de armadura necesaria final, con la armadura necesaria para ELU, para diámetro 25 mm

t <sub>g</sub> =30 AÑOS → t <sub>d</sub> =33 años										
Amb.	f <sub>ck</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>min</sub> [mm]	Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 2,57 (Q <sub>d</sub> =62,81 kN)		Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 2,37 (Q <sub>d</sub> =47,81 kN)		Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 1,96 (Q <sub>d</sub> =40,31 kN)		Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 1,86 (Q <sub>d</sub> =55,31 kN)	
			W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> / A <sub>s,ELU</sub>	W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> / A <sub>s,ELU</sub>	W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> / A <sub>s,ELU</sub>	W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> / A <sub>s,ELU</sub>
XC1	20	25	0,17	1,00	0,22	1,00	0,31	1,00	0,27	1,00
XC4	30	25	0,18	1,00	0,22	1,00	0,29	1,00	0,27	1,00
XS2	35	35	0,20	1,00	0,24	1,52	0,32	2,69	0,30	2,27
XD3	35	40	0,21	1,11	0,25	1,73	0,33	3,11	0,32	2,64
XS3	35	40	0,21	5,39	0,25	8,11	0,33	13,50	0,32	11,14
t <sub>g</sub> =50 AÑOS → t <sub>d</sub> =55 años										
Amb.	f <sub>ck</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>min</sub> [mm]	Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 2,57 (Q <sub>d</sub> =62,81 kN)		Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 2,37 (Q <sub>d</sub> =47,81 kN)		Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 1,96 (Q <sub>d</sub> =40,31 kN)		Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 1,86 (Q <sub>d</sub> =55,31 kN)	
			W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> / A <sub>s,ELU</sub>	W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> / A <sub>s,ELU</sub>	W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> / A <sub>s,ELU</sub>	W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> / A <sub>s,ELU</sub>
XC1	20	25	0,17	1,00	0,22	1,00	0,31	1,00	0,27	1,00
XC4	30	30	0,19	1,00	0,23	1,00	0,31	1,11	0,29	1,00
XS2	35	40	0,21	1,11	0,25	1,73	0,33	3,11	0,32	2,64
XD3	35	45	0,22	1,27	0,26	1,98	0,49	3,60	0,33	3,08
XS3	35	45	0,22	6,36	0,26	9,54	0,34	15,71	0,33	12,89
t <sub>g</sub> =100 AÑOS → t <sub>d</sub> =110 años										
Amb.	f <sub>ck</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>min</sub> [mm]	Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 2,57 (Q <sub>d</sub> =62,81 kN)		Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 2,37 (Q <sub>d</sub> =47,81 kN)		Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 1,96 (Q <sub>d</sub> =40,31 kN)		Q <sub>d</sub> /Q <sub>cuasi</sub> = 1,86 (Q <sub>d</sub> =55,31 kN)	
			W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> / A <sub>s,ELU</sub>	W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> / A <sub>s,ELU</sub>	W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> / A <sub>s,ELU</sub>	W <sub>ELU</sub>	A <sub>s</sub> / A <sub>s,ELU</sub>
XC1	20	25	0,17	1,00	0,22	1,00	0,31	1,00	0,27	1,00
XC4	30	40	0,21	1,00	0,26	1,00	0,34	1,33	0,32	1,13
XS2	35	50	0,23	1,46	0,27	2,28	0,36	4,18	0,35	3,59
XD3	35	55	0,24	1,68	0,28	2,63	0,37	4,84	0,36	4,16
XS3	35	55	0,24	8,38	0,28	12,48	0,37	20,07	0,36	16,28

Como podemos ver de las tablas anteriores, no hay una relación clara entre la relación de la carga de diseño - carga cuasipermanente, con la relación entre área de armadura final - área de armadura para ELU. En principio, a menor relación de cargas, mayor es, por un lado, la relación entre áreas de armadura y, por otro, las fisuras obtenidas con la armadura necesaria para ELU. Este aumento es más significativo cuando el ambiente es muy agresivo y disminuye la abertura de fisura admisible. Sin embargo, vemos que para el caso de la relación  $Q_d/Q_{cuasi}=1.86$ , esto no es así, pues la cantidad de armadura final y el ancho de fisura es menor que para la relación de cargas de 1,96.

Los valores que tenemos para cada relación de carga en cuanto a carga permanente, carga variable y factor de combinación son:

Tabla 12 Valores de carga y factores de combinación utilizados

Qd/Qcuasi	G [kN]	Q [kN]	$\psi$	G/Q $\psi$	Md/Ms [kN/m]
2,57	15	25	0,3	7,5	2,39
2,37	15	15	0,2	3	2,19
1,96	15	10	0,3	3	1,85
1,86	15	20	0,6	12	1,79

Por lo tanto, a la vista de las combinaciones posibles, no vemos una relación clara de por qué para la relación de 1,86, la relación entre áreas de armadura es menor que para cargas de 1,96.

Por otro lado, de la Tabla 10 y Tabla 11 podemos observar algunas diferencias entre los diámetros analizados. Lo primero que cabe recalcar es que las resistencias de hormigón y recubrimientos utilizados son los mismos, excepto para el caso de ambiente XC1 y vidas útiles 30 y 50 años. La normativa indica que el recubrimiento debe ser el mayor entre el que marca la norma y el área de armadura. Por lo tanto, como el que marca la norma para este tipo de ambiente y vidas útiles son 10 mm, tenemos un recubrimiento distinto para cada diámetro, coincidiendo con el mismo.

Además, podemos observar que a mayor diámetro obtenemos anchos de fisuras mayores. Esto es lógico pues, con un diámetro mayor se obtiene un recubrimiento mecánico más grande. Al mismo tiempo, la separación máxima de fisuras es directamente proporcional al diámetro de armadura, por lo que, a mayor diámetro, mayor separación máxima de fisuras. Por lo tanto, generalmente se obtendrá una relación entre área de armadura final y área por ELU mayor, cuanto mayor sea el diámetro de la armadura.

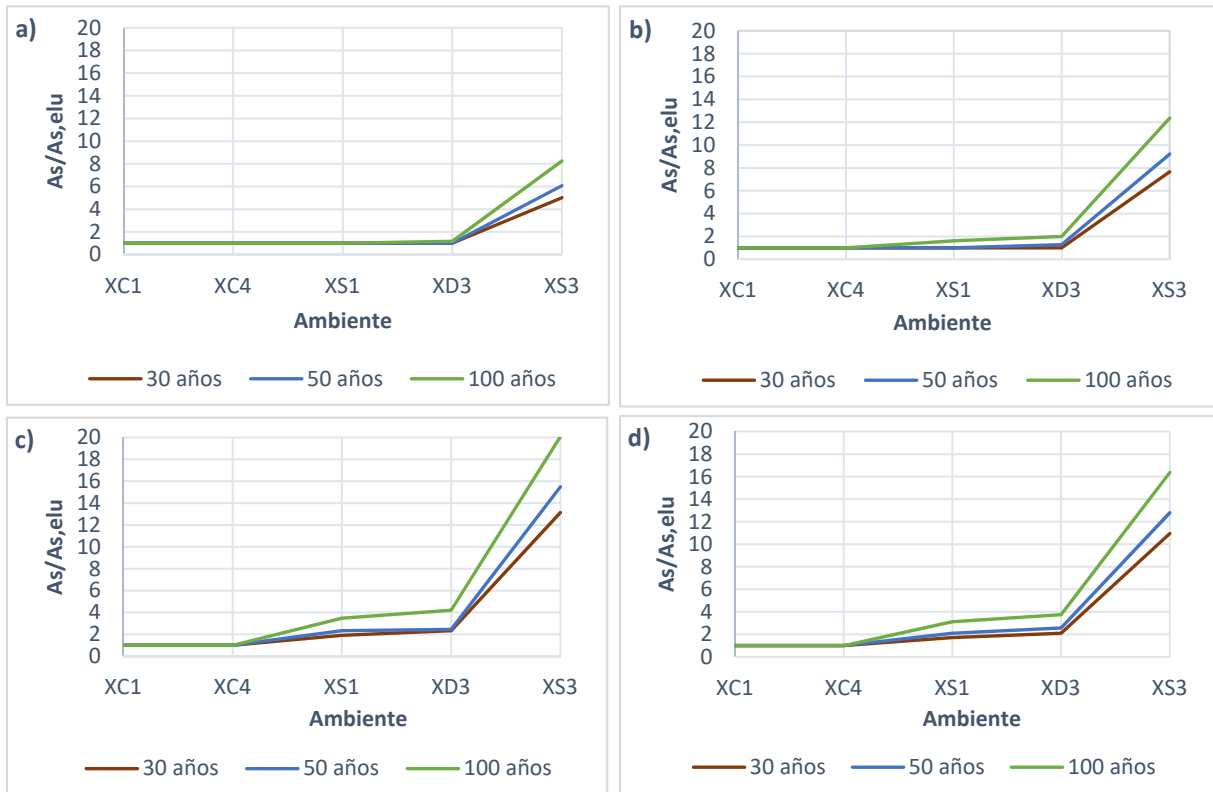


Figura 20 Relación de área de armadura final-área de armadura para ELU para diferentes ambientes y casos de carga, para un diámetro de armadura 16 mm: a)2,57, b)2,37; c)1,96; d)1,86

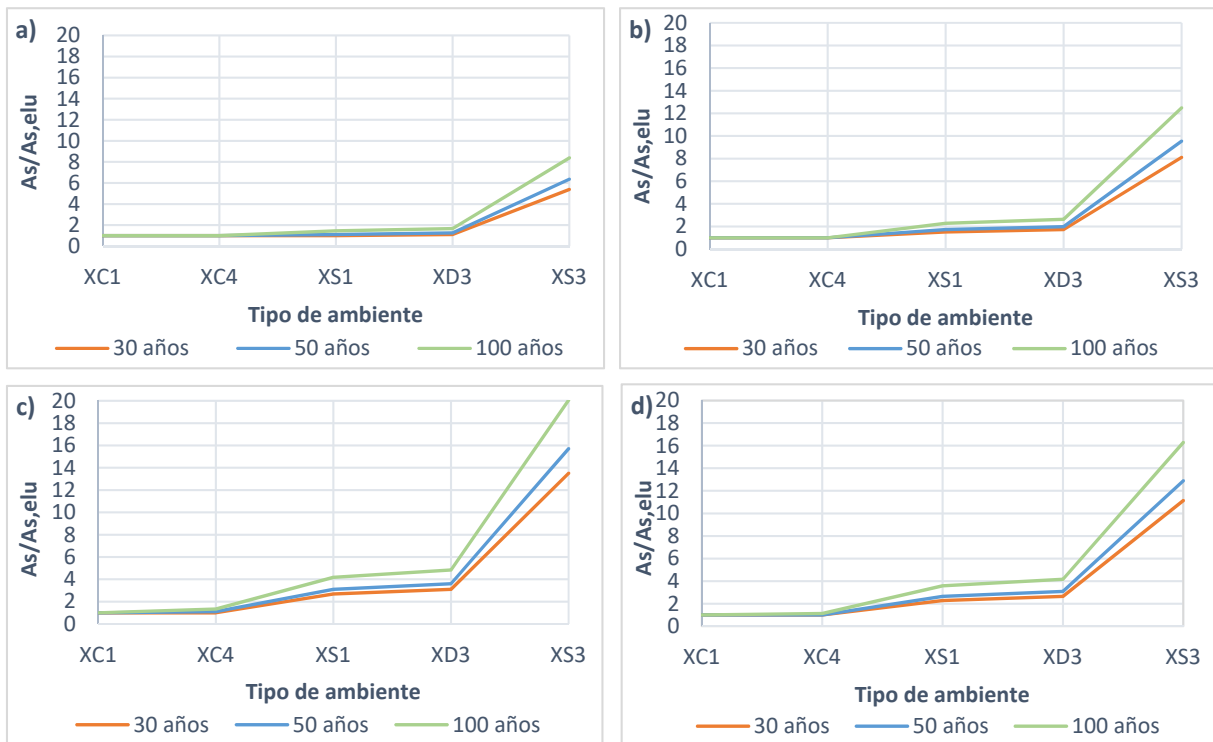


Figura 21 Relación de área de armadura final-área de armadura para ELU para diferentes ambientes y casos de carga, para un diámetro de armadura 25 mm: a)2,57, b)2,37; c)1,96; d)1,86

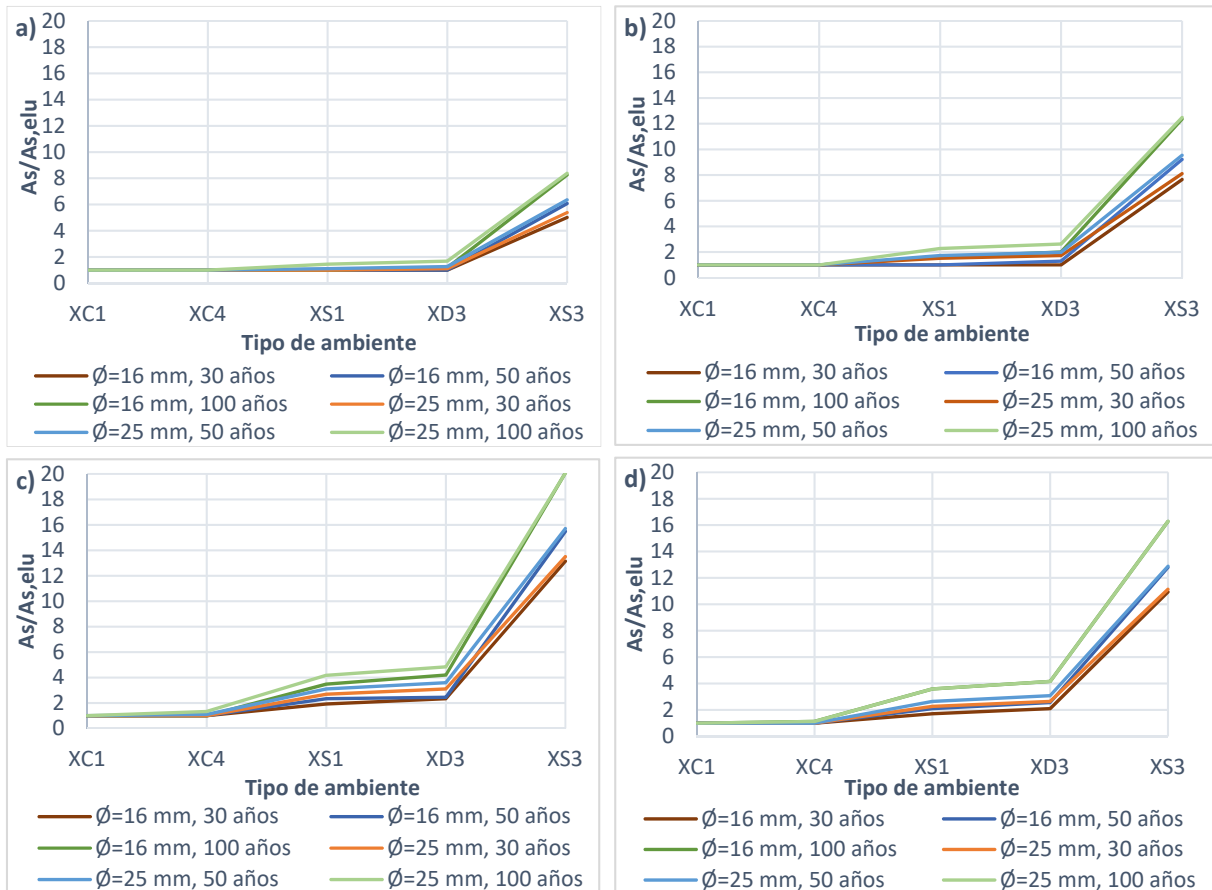


Figura 22 Comparación de la relación de área de armadura final-área de armadura para ELU para diferentes ambientes y casos de carga, para diámetro de armadura 16 y 25 mm: a)2,57, b)2,37; c)1,96; d)1,86

A la vista de los gráficos se puede ver que, a pesar de existir una diferencia entre la armadura final que se colocaría para cada uno de los diámetros de armadura, no es una diferencia muy notoria.

Tras el estudio de la influencia del tipo de ambiente y durabilidad en la cuantía de armadura necesaria, se extraen diversas conclusiones:

- Por una parte, no hay una relación clara entre la relación entre carga de servicio y carga en Estado Límite Último y el área de armadura obtenida, ya que no hay una influencia lineal para todos los casos de carga.
- Por otra parte, para vidas útiles mayores y ambientes más agresivos se necesita una cantidad mayor de armadura, necesaria para cumplir con la fisuración, que no es necesaria por resistencia.
- Además, la diferencia entre las relaciones de carga hace necesaria diferentes áreas de armadura. Como consecuencia de esto, tenemos diferentes anchos de fisura. Por lo tanto, no significa que a mayor carga vayamos a tener mayores anchos de fisura.
- Por último, por lo general, un mayor diámetro de armadura nos dará anchos de fisura mayores, debido a que el recubrimiento mecánico será mayor. Debido a esto, la relación

final entre área de armadura que se debería colocar y la necesaria para cumplir con el Estado Límite Último tenderá a ser mayor.

### 3.2 AFECTACIÓN DEL ANCHO DE FISURA EN EL CÁLCULO DE LA DURABILIDAD

Como ya se ha explicado anteriormente, en el Anejo 9 de la EHE-08 (Gobierno de España, 2008) no se tiene en cuenta el ancho de fisura para el cálculo de la durabilidad, pues se aproxima más a la teoría de que el ancho de fisura no tiene una influencia tan negativa en el cálculo de la durabilidad. Esto entra directamente en contradicción con el Artículo 49º del mismo, pues hace necesario el cumplimiento de un ancho de fisura máximo admisible que, en muchos casos, como hemos visto en el apartado anterior, produce unos incrementos de armadura muy importantes. Es por eso que, para hacer el cálculo de la durabilidad de los casos anteriores con el Anejo 9, da igual en qué caso de carga nos encontremos. En este caso depende del ambiente en el que se encuentre la estructura, el material, el diámetro de la armadura y el recubrimiento.

Los resultados obtenidos para la durabilidad de las vigas estudiadas son los siguientes.

Tabla 13 Resultados del cálculo de la durabilidad con el Anejo 9 de la EHE-08 (Gobierno de España, 2008) para diámetro 16 mm.

Proceso de degradación	Tipo de ambiente	30 AÑOS → $t_d=33$ años				
		$f_{ck}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$r_{min}$ [mm]	a/c	cem [kg/m <sup>3</sup> ]	$t_l$ [años]
Carbonatación	XC1	20	16	0,65	250	86,6
	XC4	30	25	0,55	300	107,9
Penetración de cloruros	XS2	35	35	0,5	325	48,0
	XD3	35	40	0,5	325	19,2
	XS3	35	40	0,45	350	20,6
Proceso de degradación	Tipo de ambiente	50 AÑOS → $t_d=55$ años				
		$f_{ck}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$r_{min}$ [mm]	a/c	cem [kg/m <sup>3</sup> ]	$t_l$ [años]
Carbonatación	XC1	20	16	0,65	250	86,6
	XC4	30	30	0,55	300	140,3
Penetración de cloruros	XS2	35	40	0,5	325	57,3
	XD3	35	45	0,5	325	26,0
	XS3	35	45	0,45	350	31,1
Proceso de degradación	Tipo de ambiente	100 AÑOS → $t_d=110$ años				
		$f_{ck}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$r_{min}$ [mm]	a/c	cem [kg/m <sup>3</sup> ]	$t_l$ [años]
Carbonatación	XC1	20	25	0,65	250	141,1
	XC4	30	40	0,55	300	182,8
Penetración de cloruros	XS2	35	50	0,5	325	80,2
	XD3	35	55	0,5	325	46,7
	XS3	35	55	0,45	350	64,9

Tabla 14 Resultados del cálculo de la durabilidad con el Anejo 9 de la EHE-08 (Gobierno de España, 2008) para diámetro 25 mm.

Proceso de degradación	Tipo de ambiente	30 AÑOS → $t_d=33$ años				
		$f_{ck}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$r_{min}$ [mm]	a/c	cem [kg/m <sup>3</sup> ]	$t_l$ [años]
Carbonatación	XC1	20	25	0,65	250	96,1
	XC4	30	25	0,55	300	85,4
Penetración de cloruros	XS2	35	35	0,5	325	32,3
	XD3	35	40	0,5	325	15,3
	XS3	35	40	0,45	350	19,2
Proceso de degradación	Tipo de ambiente	50 AÑOS → $t_d=55$ años				
		$f_{ck}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$r_{min}$ [mm]	a/c	cem [kg/m <sup>3</sup> ]	$t_l$ [años]
Carbonatación	XC1	20	25	0,65	250	96,1
	XC4	30	30	0,55	300	113,3
Penetración de cloruros	XS2	35	40	0,5	325	39,3
	XD3	35	45	0,5	325	22,0
	XS3	35	45	0,45	350	29,5
Proceso de degradación	Tipo de ambiente	100 AÑOS → $t_d=110$ años				
		$f_{ck}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$r_{min}$ [mm]	a/c	cem [kg/m <sup>3</sup> ]	$t_l$ [años]
Carbonatación	XC1	20	25	0,65	250	96,1
	XC4	30	40	0,55	300	158,8
Penetración de cloruros	XS2	35	50	0,5	325	57,7
	XD3	35	55	0,5	325	41,7
	XS3	35	55	0,45	350	62,9

De los valores mostrados, se observa que, siguiendo las indicaciones de durabilidad que nos marca el Eurocódigo2 (AENOR, 2004) y la normativa española, no se asegura el cumplimiento del Anejo 9 de durabilidad de la EHE-08 (Gobierno de España, 2008). Por otro lado se puede ver que los valores recomendados que marca el Eurocódigo2 (AENOR, 2004) para resistencia de hormigón, y la EHE-08 (Gobierno de España, 2008) para la relación a/c y cantidad de cemento, sólo depende del tipo de ambiente y no de la vida útil necesaria. Esto no ocurre con el recubrimiento, ya que depende tanto del tipo de ambiente como de la clase estructural (ésta última dependiente, a su vez, de la vida útil), nunca siendo menor que el diámetro de la barra para transmitir las fuerzas de adherencia con seguridad y asegurar la adecuada compactación del hormigón, según la Tabla 4.2 del Eurocódigo 2.

Por otro lado, cuando se trata del proceso de carbonatación, los valores recomendados nos ofrecen unos resultados de durabilidad mucho mayor de los necesarios, cuando se trata de un diámetro de armadura de 16 mm. Para el diámetro 25 mm se obtienen durabilidades muy por encima cuando se estudian las vidas útiles de 30 y 50 años. Sin embargo, en el caso de 100 años y XC1, no llega a la durabilidad deseada. Esto es debido al recubrimiento que la normativa marca para este tipo de ambiente. Así mismo, como se puede ver en el gráfico de la Figura 23, para el ambiente XC4 obtenemos una durabilidad mucho mayor, gracias a la resistencia del



hormigón que recomienda el EC-2 (AENOR, 2004) para este tipo de ambiente de exposición y recubrimiento. Sin embargo, cuando se trata de penetración de cloruros, en la mayoría de casos, se queda muy por debajo del valor deseado, siendo mucho peor el caso de diámetro 25 mm. En las siguientes figuras se muestra cuán distante es la durabilidad deseada del valor obtenido.

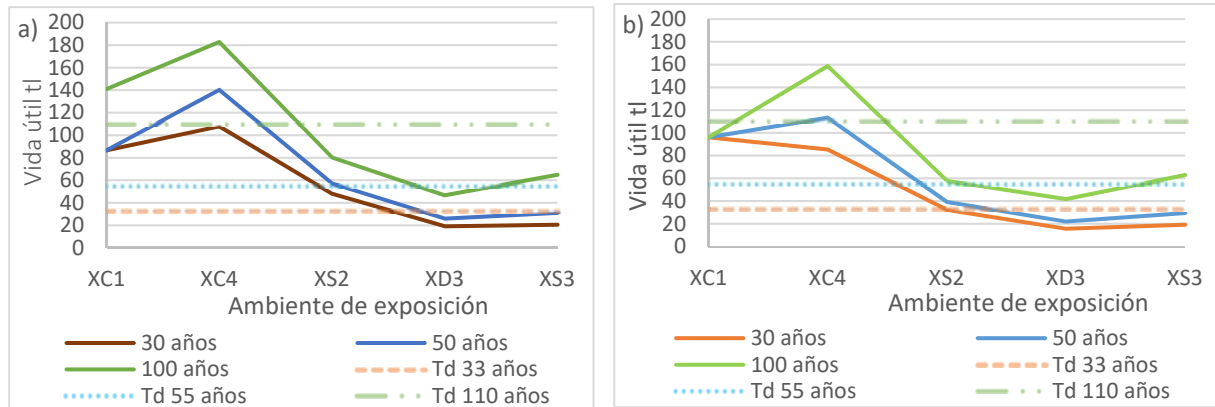


Figura 23 Durabilidad en función del ambiente y la vida útil necesaria para: a) diámetro 16 mm, b) diámetro 25 mm

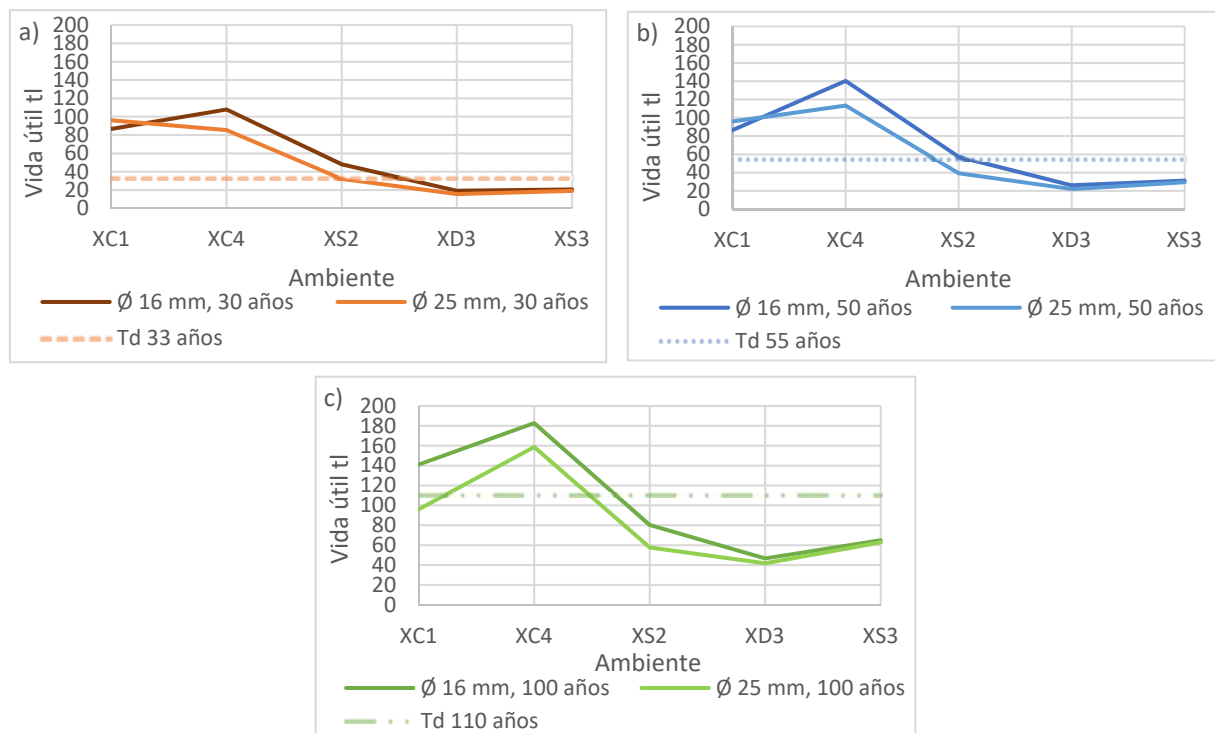


Figura 24 Durabilidad en función del ambiente y diámetro de la armadura para las vidas útiles de: a) 30 años, b) 50 años; c) 100 años.

Vemos que para el ambiente XC1 y vidas útiles de 30 y 50 años tenemos una mayor durabilidad con un diámetro 25 mm que con diámetro 16 mm debido al mayor recubrimiento. Por tanto,

el recubrimiento influye más que el diámetro, ya que, para una misma viga, con un recubrimiento y diámetro mayores, se obtiene una mayor vida útil. En todos los demás casos, teniendo el mismo recubrimiento, vemos que el diámetro 25 mm queda muy por debajo que el diámetro 16 mm. Esto es así, principalmente, porque el tiempo de propagación será menor, cuanto mayor sea el diámetro.

En definitiva, para los casos de carbonatación, en general, hay mucha posibilidad de optimización, mientras que para los casos de penetración de cloruros se necesita una clara mejora de las condiciones.

### 3.2.1 Cálculo de la durabilidad mediante la introducción del ancho de fisura.

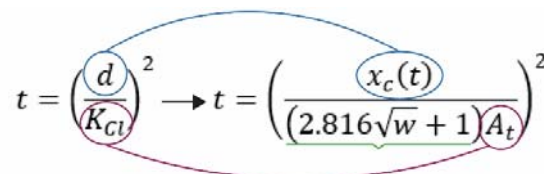
Como se ha comentado con anterioridad, el Anejo 9 de la EHE-08 (Gobierno de España, 2008) no tiene en cuenta la fisuración que se produce en la viga para el cálculo de la durabilidad. Por ello, introducimos el ancho de fisura, para ver cómo afectaría a la durabilidad de los casos estudiados. Basándonos en el Anejo 9, en la hoja de cálculo utilizada se insertan las fórmulas que relacionan el ancho de fisura con la durabilidad, dependiendo del agente agresivo.

- Carbonatación

Despejando  $t$  de la fórmula ( 25) obtenemos:

$$t = \left( \frac{x_c(t)}{(2.816\sqrt{w} + 1)A_t} \right)^2 \quad (32)$$

Si comparamos la fórmula ( 9) con la fórmula ( 32), tenemos que  $x_c(t)$  equivale a la profundidad (en mm) a la que llega la carbonatación para un periodo  $t$ , que a su vez equivaldrá al recubrimiento de la armadura para saber el período de iniciación. Por otro lado,  $A_t$  sería el coeficiente de carbonatación  $K_c$  que iría multiplicado por un coeficiente que depende del ancho de fisura.



$$t = \left( \frac{d}{K_{Ci}} \right)^2 \rightarrow t = \left( \frac{x_c(t)}{(2.816\sqrt{w} + 1)A_t} \right)^2$$

Figura 25 Relación entre la fórmula ( 9) y la fórmula ( 39)

- Penetración de cloruros

En el caso de penetración de cloruros, tras estudiar los valores obtenidos de la difusión media propuesta por (Poulsen, 1993) (fórmulas ( 27) y ( 28)), observamos que,

prácticamente, equivale a multiplicar el coeficiente de difusión de cloruros a la edad  $t_0$ ,  $D(t_0)$  por el coeficiente  $f(w)$  (fórmula ( 30)) (ver Figura 26), quedando:

$$D(t)_w = D(t_0)f(w) \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \quad (33)$$

Lo hacemos de esta manera, y no con las fórmulas propuestas por (Poulsen, 1993) para poder hacer una comparación más fidedigna con el Anejo 9 de la EHE-08 (Gobierno de España, 2008).

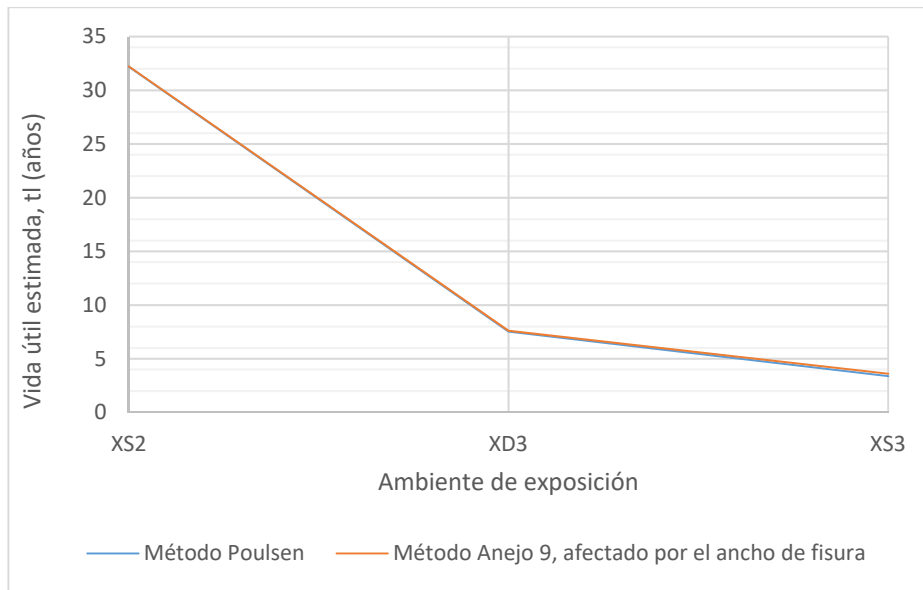


Figura 26 Comparativa entre la vida útil estimada obtenida mediante la difusión media, propuesta por (Poulsen, 1993) (fórmula ( 27)) y la obtenida mediante la difusión  $D(t)_w$  (fórmula ( 33)), para una vida útil de 30 años, relación de cargas 1,86 y diámetro de armadura 25 mm.

De este modo, introduciéndole los cambios necesarios en la hoja de cálculo, para los casos anteriores, obtenemos los siguientes resultados. La comprobación se realiza con el ancho de fisura obtenida con la armadura necesaria para ELU.

Tabla 15 Resultados obtenidos del cálculo de la durabilidad introduciendo el ancho de fisura, a partir de la fisura obtenida con la armadura necesaria para cumplir ELU, para diámetro 16 mm

Relación $Q_d/Q_{cuasi} = 2,57$						
Ambiente	30 AÑOS $\rightarrow t_d=33$ años		50 AÑOS $\rightarrow t_d=55$ años		100 AÑOS $\rightarrow t_d=110$ años	
	$w_{ELU}$	$t_i$ [años]	$w_{ELU}$	$t_i$ [años]	$w_{ELU}$	$t_i$ [años]
XC1	0,11	81,7	0,11	81,7	0,14	128,8
XC4	0,14	73,2	0,15	89,7	0,18	124,3
XS2	0,16	44,1	0,17	50,9	0,20	64,3
XD3	0,17	11,2	0,19	12,9	0,21	16,7
XS3	0,17	6,1	0,19	7,5	0,21	10,8

Relación $Q_d/Q_{cuasi} = 2,37$						
Ambiente	30 AÑOS $\rightarrow t_d=33$ años		50 AÑOS $\rightarrow t_d=55$ años		100 AÑOS $\rightarrow t_d=110$ años	
	$W_{ELU}$	$t_i$ [años]	$W_{ELU}$	$t_i$ [años]	$W_{ELU}$	$t_i$ [años]
XC1	0,14	81,3	0,14	81,3	0,17	127,9
XC4	0,17	70,9	0,18	86,6	0,21	119,1
XS2	0,19	44,1	0,20	50,7	0,22	63,8
XD3	0,20	10,9	0,21	12,5	0,23	16,0
XS3	0,20	5,6	0,21	6,8	0,23	9,5
Relación $Q_d/Q_{cuasi} = 1,96$						
Ambiente	30 AÑOS $\rightarrow t_d=33$ años		50 AÑOS $\rightarrow t_d=55$ años		100 AÑOS $\rightarrow t_d=110$ años	
	$W_{ELU}$	$t_i$ [años]	$W_{ELU}$	$t_i$ [años]	$W_{ELU}$	$t_i$ [años]
XC1	0,19	81,3	0,19	81,3	0,23	127,9
XC4	0,22	70,9	0,24	86,6	0,27	119,1
XS2	0,25	44,0	0,26	50,4	0,29	63,2
XD3	0,26	10,5	0,27	11,9	0,30	14,9
XS3	0,26	4,9	0,27	5,7	0,30	7,6
Relación $Q_d/Q_{cuasi} = 1,86$						
Ambiente	30 AÑOS $\rightarrow t_d=33$ años		50 AÑOS $\rightarrow t_d=55$ años		100 AÑOS $\rightarrow t_d=110$ años	
	$W_{ELU}$	$t_i$ [años]	$W_{ELU}$	$t_i$ [años]	$W_{ELU}$	$t_i$ [años]
XC1	0,17	81,4	0,17	81,4	0,21	127,6
XC4	0,21	71,1	0,23	86,8	0,26	119,4
XS2	0,25	44,0	0,26	50,4	0,29	63,2
XD3	0,26	10,5	0,28	11,9	0,31	14,9
XS3	0,26	4,9	0,28	5,7	0,31	7,5

Tabla 16 Resultados obtenidos del cálculo de la durabilidad introduciendo el ancho de fisura, a partir de la fisura obtenida con la armadura necesaria para cumplir ELU para diámetro 25 mm

Relación $Q_d/Q_{cuasi} = 2,57$						
Ambiente	30 AÑOS $\rightarrow t_d=33$ años		50 AÑOS $\rightarrow t_d=55$ años		100 AÑOS $\rightarrow t_d=110$ años	
	$W_{ELU}$	$t_i$ [años]	$W_{ELU}$	$t_i$ [años]	$W_{ELU}$	$t_i$ [años]
XC1	0,17	83,4	0,17	83,4	0,17	83,4
XC4	0,18	49,5	0,19	61,2	0,21	86,1
XS2	0,20	28,4	0,21	32,6	0,23	41,3
XD3	0,21	7,2	0,22	8,4	0,24	10,9
XS3	0,21	4,0	0,22	5,0	0,24	7,3
Relación $Q_d/Q_{cuasi} = 2,37$						
Ambiente	30 AÑOS $\rightarrow t_d=33$ años		50 AÑOS $\rightarrow t_d=55$ años		100 AÑOS $\rightarrow t_d=110$ años	
	$W_{ELU}$	$t_i$ [años]	$W_{ELU}$	$t_i$ [años]	$W_{ELU}$	$t_i$ [años]
XC1	0,22	82,9	0,22	82,9	0,22	82,9
XC4	0,22	48,5	0,23	59,7	0,26	83,8
XS2	0,24	28,3	0,25	32,4	0,27	40,8

XD3	0,25	6,9	0,26	8,0	0,28	10,2
XS3	0,25	3,5	0,26	4,3	0,28	6,1
Relación $Q_d/Q_{cuasi} = 1,96$						
Ambiente	30 AÑOS $\rightarrow t_d=33$ años		50 AÑOS $\rightarrow t_d=55$ años		100 AÑOS $\rightarrow t_d=110$ años	
	$w_{ELU}$	$t_i$ [años]	$w_{ELU}$	$t_i$ [años]	$w_{ELU}$	$t_i$ [años]
XC1	0,31	82,5	0,31	82,5	0,31	82,5
XC4	0,29	47,1	0,31	57,8	0,34	80,6
XS2	0,32	28,1	0,33	32,2	0,36	40,4
XD3	0,33	6,7	0,49	7,3	0,37	9,3
XS3	0,33	3,0	0,34	3,5	0,37	4,5
Relación $Q_d/Q_{cuasi} = 1,86$						
Ambiente	30 AÑOS $\rightarrow t_d=33$ años		50 AÑOS $\rightarrow t_d=55$ años		100 AÑOS $\rightarrow t_d=110$ años	
	$w_{ELU}$	$t_i$ [años]	$w_{ELU}$	$t_i$ [años]	$w_{ELU}$	$t_i$ [años]
XC1	0,27	82,7	0,27	82,7	0,27	82,7
XC4	0,27	47,5	0,29	58,3	0,32	81,3
XS2	0,30	28,2	0,32	32,2	0,35	40,4
XD3	0,32	6,7	0,33	7,6	0,36	9,5
XS3	0,32	3,1	0,33	3,6	0,36	4,8

Como se puede ver de las tablas de resultados, al introducir el ancho de fisura nos encontramos con resultados bastante diferentes a los obtenidos por el Anejo 9 de la EHE-08 (Gobierno de España, 2008). Por un lado, se observa que para los casos de carbonatación y diámetro 16 mm se logran durabilidades por encima de las necesitadas, llegando a ser muy superiores para la vida útil de 30 años. Sin embargo, para el diámetro 25 mm, seguimos teniendo altas durabilidades para las vidas útiles de 30 y 50 años, pero 100 años no lo satisface.

Por otro lado, cuando el agente agresor es la penetración de cloruros, la durabilidad está muy por debajo de la necesaria. Introduciendo el ancho de fisura para el caso de penetración de cloruros sólo cumple para la vida útil de 30 años, ambiente XS2 y diámetro 16 mm, independientemente de las relaciones entre cargas. Por otro lado, cabe resaltar que para algunos de los casos (contornos rojos de la Tabla 15 y

Tabla 16), aun cumpliendo con la limitación de fisura permitido por la normativa, no se obtiene la durabilidad exigida. En otro de los casos (contornos verdes de la Tabla 15 y

Tabla 16), sin cumplir con el ancho de fisura, se podría llegar a una durabilidad hasta un 33% mayor de la necesaria.

Los gráficos siguientes muestran que el cálculo mediante el Anejo 9 nos conduce a durabilidades mayores de las que obtendríamos introduciendo el ancho de fisura en el cálculo. Sin embargo, es cierto que, generalmente, cuando no cumple mediante el método que introduce el ancho de fisura, tampoco lo hace para el Anejo 9.

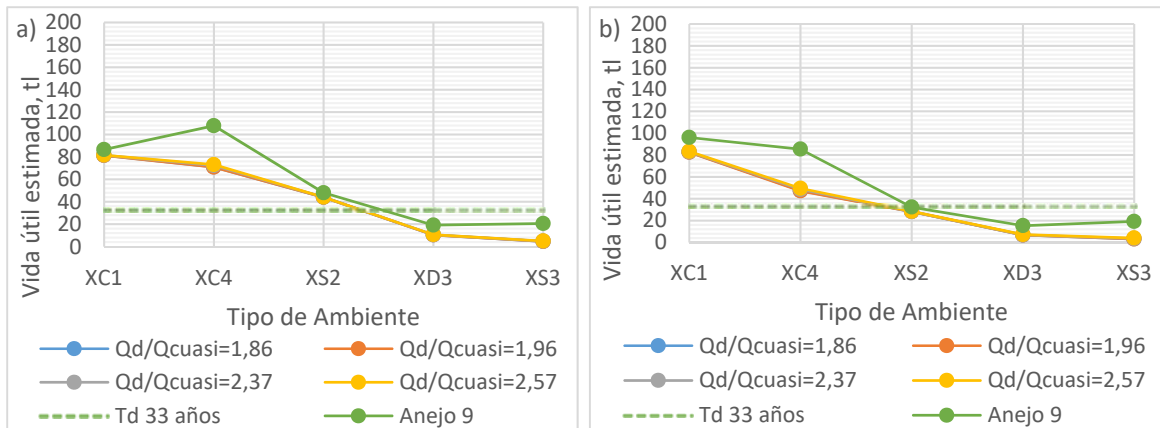


Figura 27 Comparativa de vidas útiles obtenidas mediante la introducción del ancho de fisura con el Anejo 9, por relaciones de carga, para 30 años y diámetros: a) 16 mm; b) 25 mm.

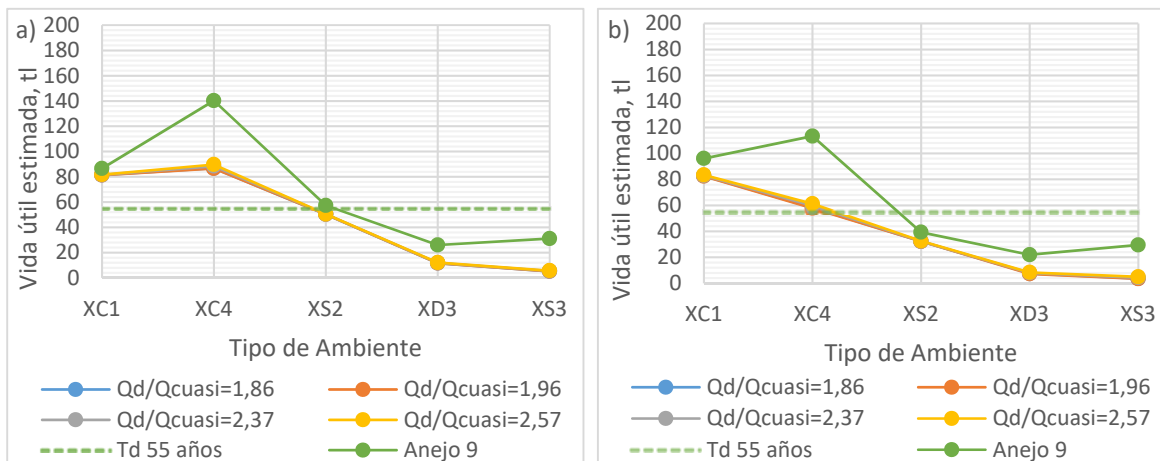


Figura 28 Comparativa de vidas útiles obtenidas mediante la introducción del ancho de fisura con el Anejo 9, por relaciones de carga, para 50 años y diámetros: a) 16 mm; b) 25 mm.

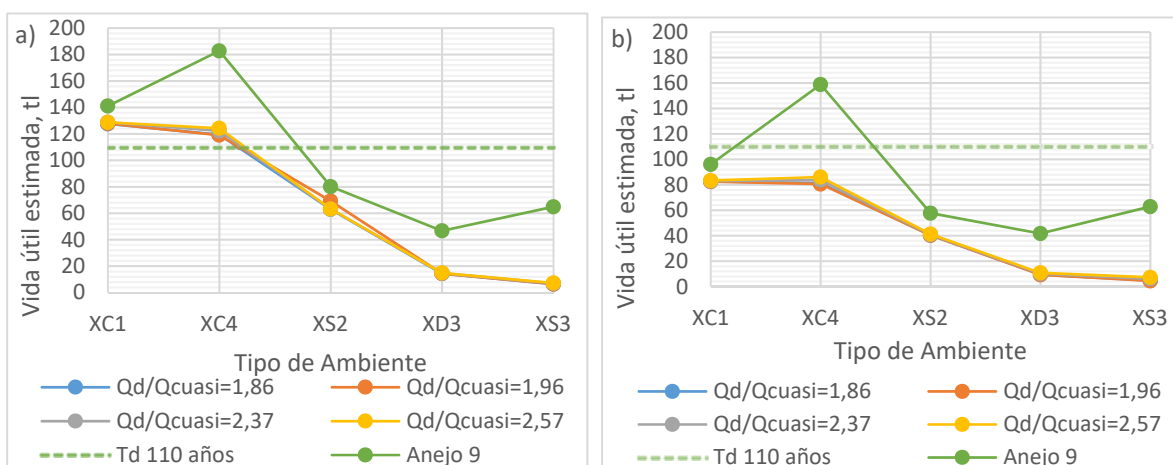


Figura 29 Comparativa de vidas útiles obtenidas mediante la introducción del ancho de fisura con el Anejo 9, por relaciones de carga, para 100 años y diámetros: a) 16 mm; b) 25 mm.

Por otro lado, las diferentes relaciones de cargas no proporcionan resultados de durabilidades muy diferentes entre sí. Esto se ve más claramente en los gráficos siguientes, así como las diferencias entre los distintos ambientes para los diferentes diámetros:

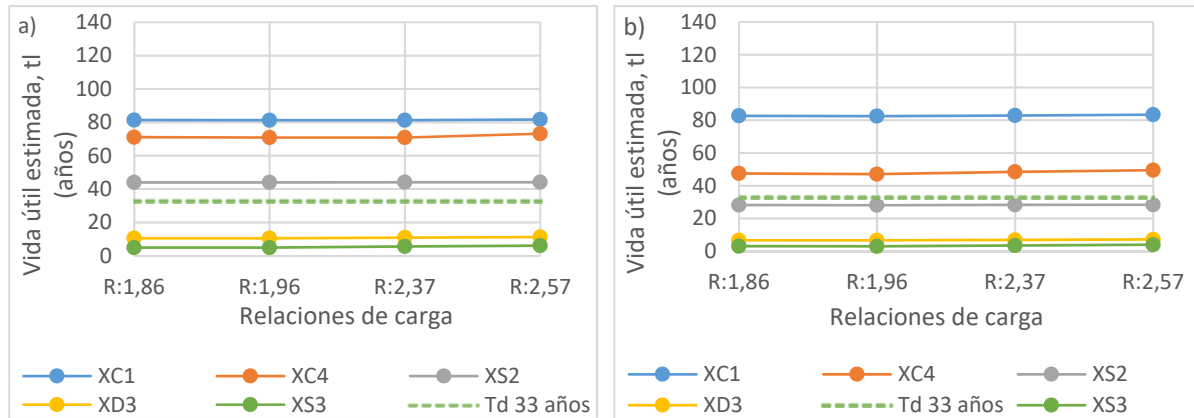


Figura 30 Vida útil por relación de carga y ambiente de exposición para 30 años y diámetros:

a) 16 mm, b) 25 mm

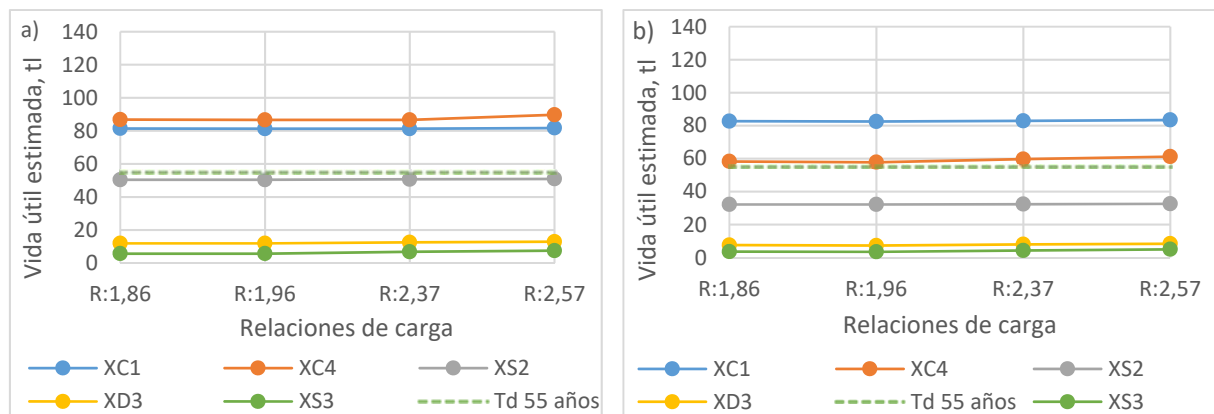


Figura 31 Vida útil por relación de carga y ambiente de exposición para 50 años y diámetros:

a) 16 mm, b) 25 mm

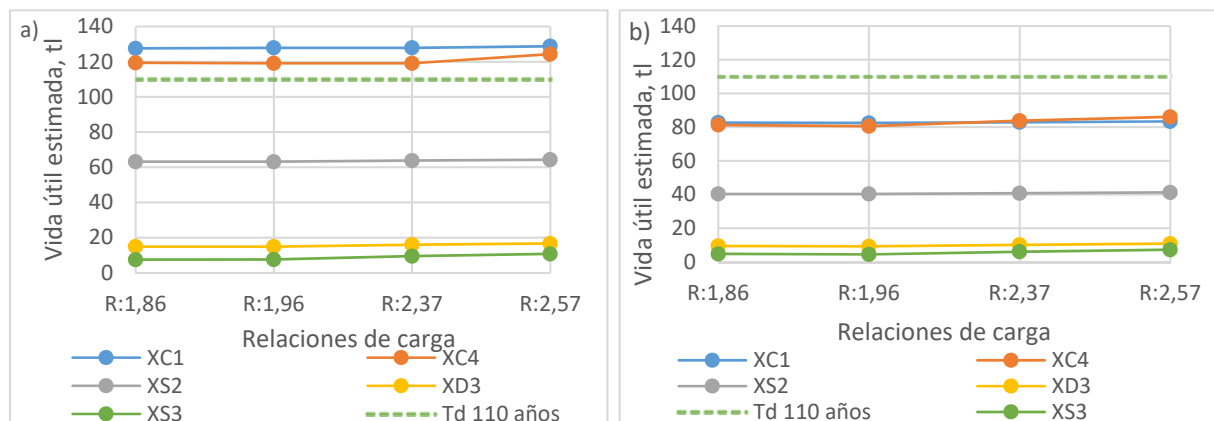


Figura 32 Vida útil por relación de carga y ambiente de exposición para 100 años y diámetros:

a) 16 mm, b) 25 mm

### 3.3 CONCLUSIONES SOBRE LA AFECTACIÓN DEL ANCHO DE FISURA EN EL CÁLCULO DE LA DURABILIDAD

Como se ha podido ver a lo largo de este capítulo, el ancho de fisura sí tiene una influencia en el cálculo de la durabilidad, mayor influencia a mayor vida útil. Además, la diferencia de tenerla en cuenta o no también depende del ambiente, pues los diferentes tipos de ambientes hará que pongamos diferentes recubrimientos y resistencias de hormigón, factores muy importantes para la durabilidad.

Sin embargo, como se ha comentado, la fisura es importante. Para el caso de carbonatación, tal y como podemos ver en la Figura 33, la variación entre ancho de fisura 0 y 0,2 es muy importante, pues hay un descenso muy notorio de la durabilidad. Sin embargo, de 0,2 en adelante la pendiente es muy suave.

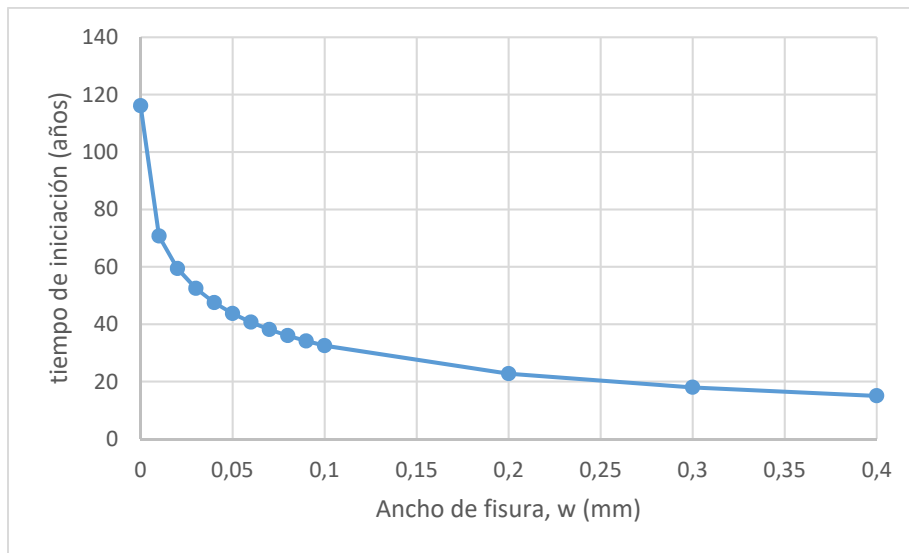


Figura 33 Relación ancho de fisura y tiempo de iniciación para el caso de carbonatación del ambiente XC4, y recubrimiento 40 mm.

Por otro lado, se ha analizado, para el caso de penetración de cloruros, por ser el ambiente más agresivo en cuanto a los dos agentes estudiados, cómo afecta el ancho de fisura en los diferentes tipos de ambientes (los diferentes ambientes, en este caso, se traduce en recubrimientos, relación a/c y cantidades de cemento diferentes), para diámetro 16 mm.

A pesar de que la EHE-08 (Gobierno de España, 2008) marca una diferencia entre los ambientes XD3 y XS3, permitiendo en el primero un ancho de fisura de 0,2 y en el segundo un ancho de fisura de 0,1 vemos que, en cuanto a la durabilidad del elemento, prescribiendo las características del hormigón recomendadas por la normativa, no hay una gran diferencia entre ellos. Sin embargo, entre los ambientes de exposición XS2 y XD3 sí se aprecia esta diferencia, aunque ambos estén limitados por un ancho de fisura de 0,2 (Ver Figura 34).



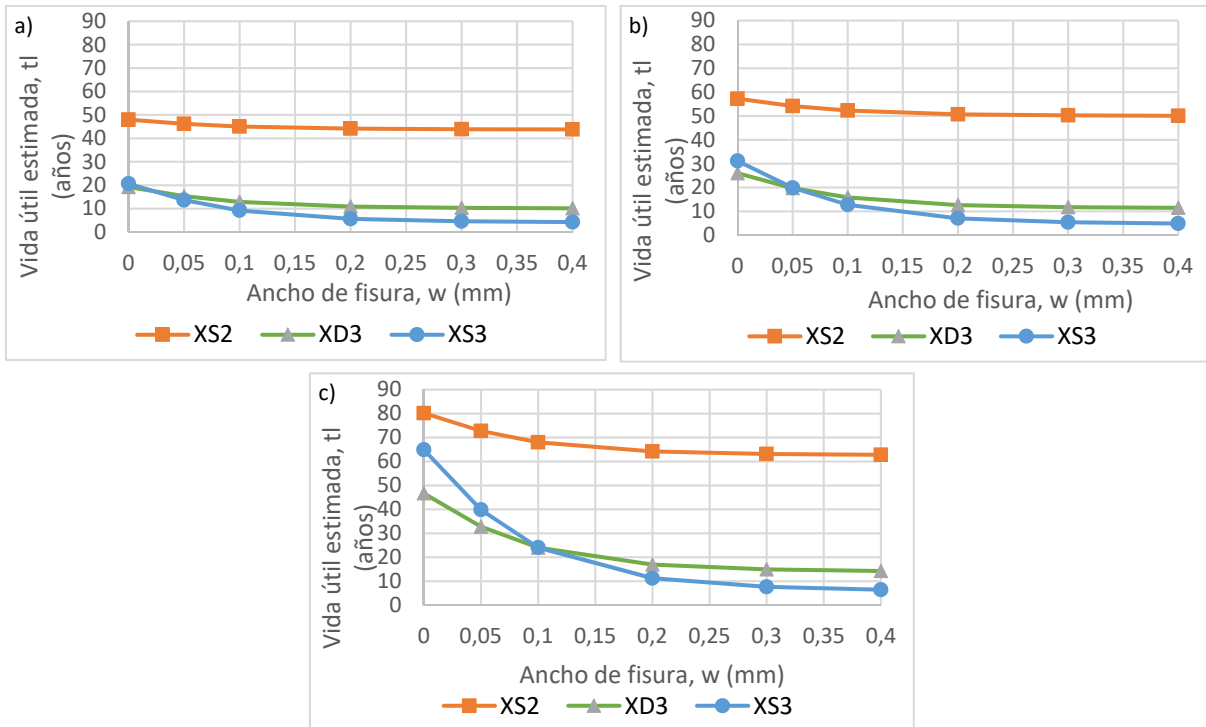


Figura 34 Afectación de la fisuración en la durabilidad, dependiendo de la vida útil: a) 30 años; b) 50 años; c) 100 años

Además, en la Figura 34 se observa que las curvas siguen el mismo patrón para las diferentes vidas útiles. Para los ambientes de exposición XD3 y XS3, a partir de cierto ancho de fisura se invierte la durabilidad. Un elemento es más durable cuando se encuentra en un ambiente XS3 y tiene pequeños anchos de fisura. A partir de fisuras por encima de cierto valor dependiente de la vida útil, es más durable si se encuentra en un ambiente XD3. Esto, de nuevo, es debido a las características del hormigón. Para un ambiente XD3, la norma aconseja una relación a/c de 0,5 y una cantidad de cemento de 325 kg/m<sup>3</sup>, mientras que para el ambiente XS3 aconseja una relación a/c de 0,45 y una cantidad de cemento de 350 kg/m<sup>3</sup>. Las características mejoradas del hormigón, cuando se trata de un ambiente XS3, se traduce en un coeficiente de difusión menor que hace que, en menores anchos de fisura, la penetración de cloruros disminuya.

Por otro lado, el contenido de cloruros en superficie depende del tipo de ambiente y del contenido de cemento. De nuevo, como el contenido de cemento del XS3 es mayor, tenemos un contenido de cloruros en superficie menor. Sin embargo, vemos que el ambiente XS3 es más sensible a los aumentos de fisura. Por lo tanto, a mayor coeficiente de difusión y contenido de cloruros en superficie, mayor coeficiente de penetración de cloruros y menor durabilidad.



Figura 35 Influencia de la difusión media y cloruros en superficie en la durabilidad

A continuación, se hace una comparativa entre el tiempo de inicio y la vida útil estimada, por tipologías de ambiente, para una vida útil de proyecto de 100 años.

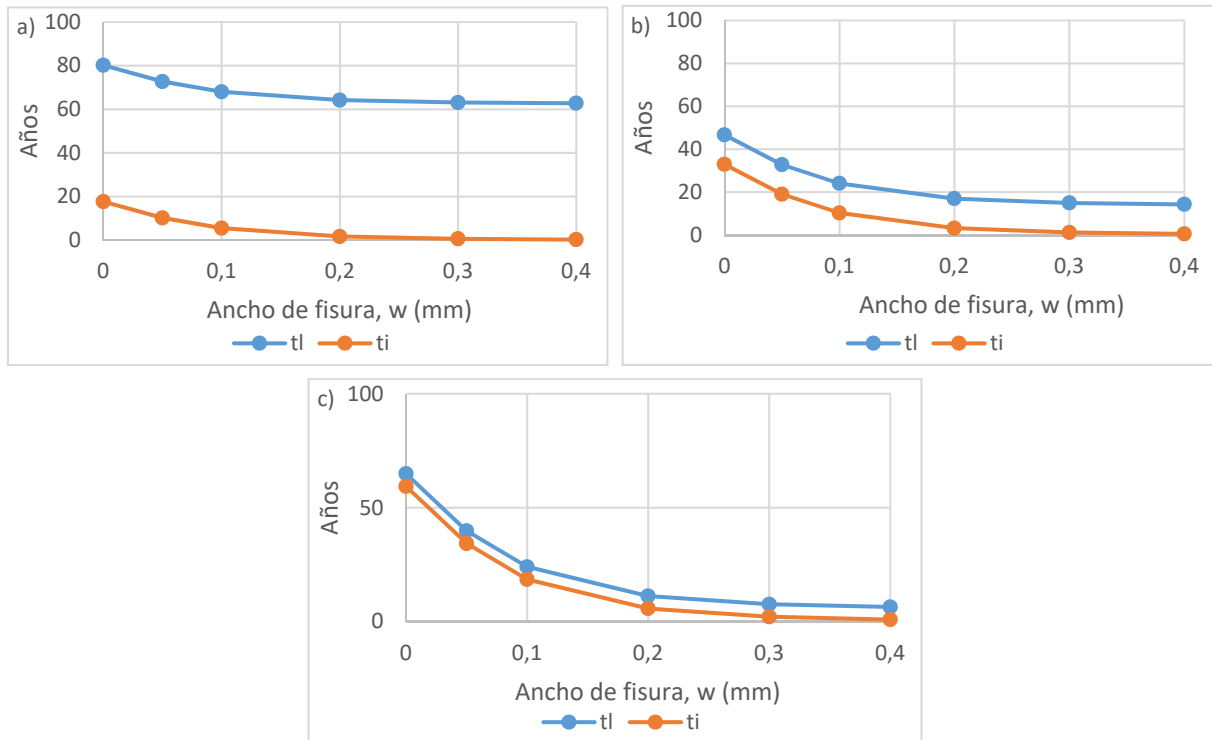


Figura 36 Relación del tiempo de inicio con la vida útil aproximada para los ambientes: a) XS2; b) XD3; c) XS3 para una vida útil de 100 años

Cuanto más agresivo es el ambiente, más cercano es el tiempo de inicio de la corrosión a la vida útil del elemento, es decir, a mayor agresividad del ambiente, el tiempo de propagación es menor. Además, ambas curvas siguen líneas paralelas, pues el tiempo de propagación, tal y como está planteado por el Anejo 9 de la EHE-08 (Gobierno de España, 2008), no depende del ancho de fisura.

A través de las fórmulas utilizadas por (Kwon et al., 2009) y propuestas por (Poulsen, 1993) se ha hecho un estudio sobre cómo afecta cada uno de los parámetros a la durabilidad de un elemento.

Partimos de una situación inicial en el que una viga, que se quiere diseñar para una vida útil de 100 años, está afectada por un ambiente de exposición XS2. En esta hipótesis tenemos un 5,1% de cloruros en superficie en % de cemento. Con la armadura necesaria para cumplir con ELU, se produce una fisura de 0,287 mm. Para la situación inicial (ver Figura 37) se calcula la durabilidad a partir de las características del hormigón que el Eurocódigo 2 (AENOR, 2004) y la EHE-08 (Gobierno de España, 2008) recomiendan: resistencia 35 MPa, relación a/c de 0,5 y 325 kg/m<sup>3</sup> de contenido de cemento. Se ha optado por un cemento CEM II. A partir de ahí, se han modificado los parámetros más influyentes para ver cómo afecta cada uno de ellos en relación con el recubrimiento.

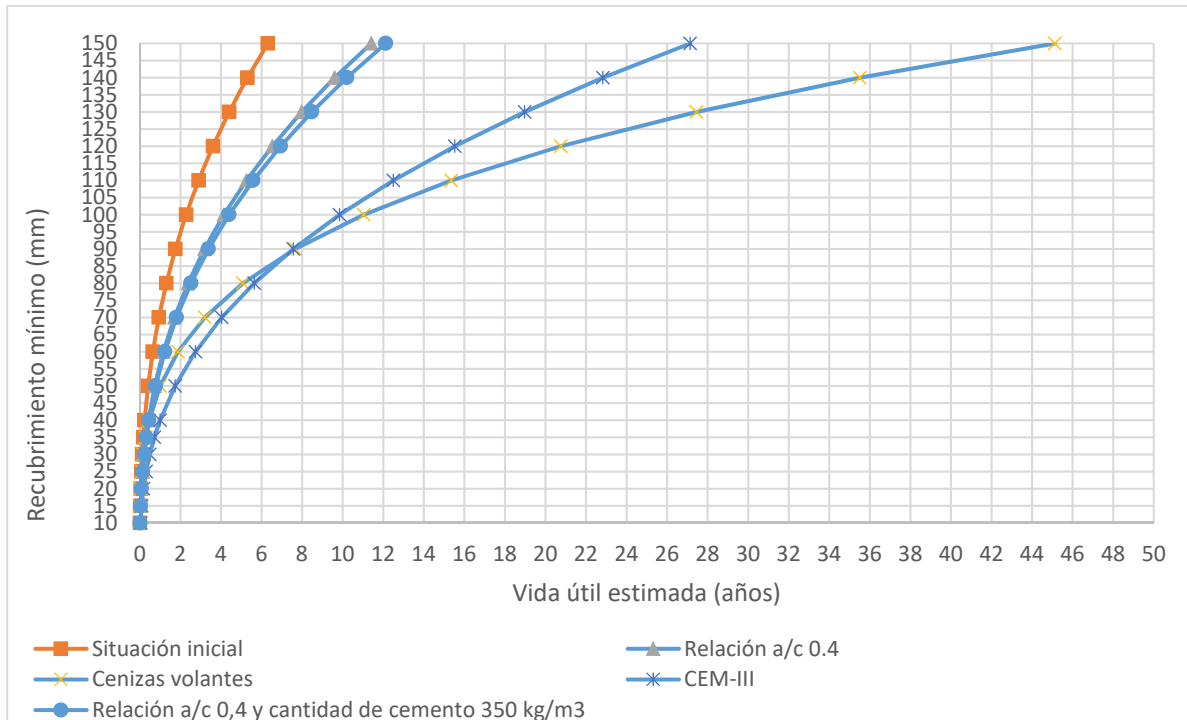


Figura 37 Vida útil en función de los parámetros influyentes y el recubrimiento mínimo

Se observa que lo más efectivo para el aumento de la durabilidad es la adición de cenizas volantes o escorias. Esto es debido, como apunta (Poulsen, 1993), a que contribuye a que el coeficiente de difusión sea menor. Por otro lado, vemos que cambiar el CEM II/A-V por un CEM III también tiene una repercusión muy importante, incrementando la vida útil hasta 6 veces, para un recubrimiento de 100 mm. Posiblemente es porque este tipo de cementos contienen adiciones de escorias de alto horno, y como vimos anteriormente, favorece a la durabilidad cuando el agente agresivo es la penetración de cloruros. Del mismo modo, bajar la relación de a/c a 0,4 también es una buena elección a la hora de mejorar la durabilidad. Sin embargo, elevar la cantidad de cemento de 325 kg/m<sup>3</sup> a 350 kg/m<sup>3</sup>, aunque mejora, no tiene una repercusión muy significativa.

Además, un aumento de recubrimiento hace que los beneficios que produce el cambio de los parámetros antes estudiados se multipliquen. De este modo, para recubrimientos menores de aproximadamente, 40 mm no hay apenas cambio. Sin embargo, a partir de 40 mm la durabilidad empieza a mejorar. El cambio de CEMII/A-V a CEM III es el que más sensible al recubrimiento, pues es la curva que más cambia con el mismo desde, aproximadamente, los 20 mm.

Por último, se ha observado que no todos los parámetros influyen del mismo modo en la carbonatación y penetración de cloruros. De este modo se han analizado cuáles son los parámetros que afectan positiva o negativamente a cada uno de los agentes agresivos, según el Anejo 9.

Tabla 17 Parámetros favorables, desfavorables e indiferentes para cada uno de los ambientes agresivos, en el cálculo de la durabilidad

CARBONATACIÓN		
Favorable	Desfavorable	Indiferente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento de recubrimiento</li> <li>- Aumento de la resistencia característica del hormigón</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hormigones con adiciones de cenizas volantes, humo de sílice o escorias.</li> <li>- Aumento diámetro de armadura</li> <li>- Aumento de la permeabilidad del hormigón: aumento del aire ocluido en el hormigón</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Distancia respecto a costa.</li> <li>- Tipo de cemento.</li> <li>- Relación a/c y cantidad de cemento</li> </ul>
PENETRACIÓN DE CLORUROS		
Favorable	Desfavorable	Indiferente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento de recubrimiento.</li> <li>- Aumento de la resistencia característica del hormigón.</li> <li>- Hormigones con adiciones de cenizas volantes, humo de sílice o escorias.</li> <li>- Tipo de cemento: Cemento tipo III</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento diámetro de armadura.</li> <li>- Disminución de la relación a/c y menor cantidad de cemento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento del aire ocluido en el hormigón.</li> <li>- Resistencia característica del hormigón.</li> </ul>

A partir de estas conclusiones y de los casos del apartado 3.2.1 *Cálculo de la durabilidad mediante la introducción del ancho de fisura.*, se siguen los siguientes criterios para conseguir la durabilidad deseada (ver Figura 38):

1. Condición inicial (recubrimiento, resistencia de hormigón, relación a/c y contenido de cemento propuesto por la normativa. Cemento tipo CEM II).
2. Aumento del recubrimiento hasta un máximo de 100 mm
3. Cambio a cemento tipo CEM III.
4. Disminución de la relación a/c y aumento del contenido de cemento.

A partir de estos criterios, se ha vuelto a calcular la durabilidad de los casos estudiados para diámetro 16 mm, obteniendo los siguientes resultados por vidas útiles y tipos de ambientes.

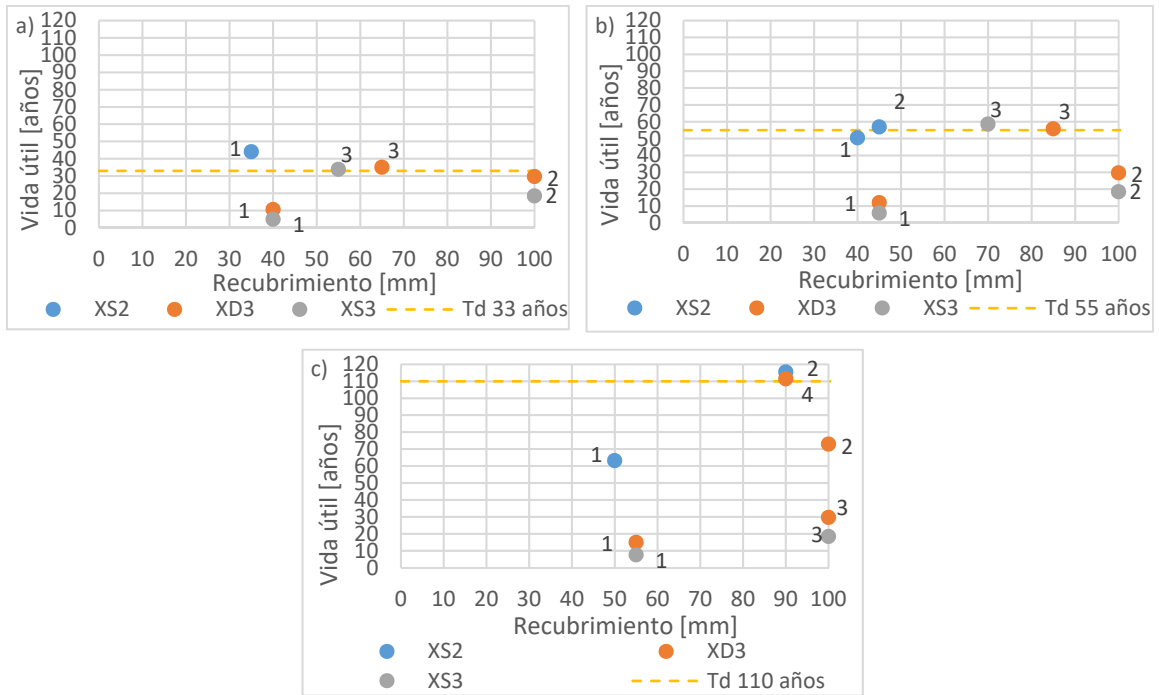


Figura 38 Vida útil en función de diferentes parámetros y tipos de ambiente, con diámetro 16 mm para las vidas útiles de proyecto de: a)30 años; b)50 años; c)100 años

## CAPÍTULO 4: MÉTODO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO Y HORMIGÓN PRETENSADO

### 4.1 ARMADURA NECESARIA PARA EL CUMPLIMIENTO DE ELU Y ELS.

En el capítulo anterior se ha visto que cuando se introduce en la formulación el ancho de fisura obtenido, la vida útil de la estructura es más desfavorable que la calculada a través del Anejo 9 de la EHE-08 (Gobierno de España, 2008).

Llegados a este punto, se plantea cuál sería el recubrimiento mínimo, la armadura y, en consecuencia, el ancho de fisura óptimos para el diseño de una viga tanto de hormigón armado como pretensado parcial, para una vida útil, un caso de carga y un ambiente de exposición determinado.

Para ello, se generan gráficos formados por dos curvas. Una, con la armadura necesaria para cumplir con el Estado Límite Último y otra para cumplir con el Estado Límite de Durabilidad, en función del recubrimiento. El punto donde se cruzan ambas curvas, será el punto óptimo de diseño. En algunos casos las curvas no se cruzan y es necesario cambiar el tipo de cemento o reducir la relación de a/c.

Para la curva de durabilidad, se parte del ancho de fisura necesario para tener un tiempo de iniciación dado. De este modo, sabiendo que la vida útil de la estructura es la suma del período de iniciación y el período de propagación (fórmula ( 7)), el tiempo de iniciación deseado será la diferencia entre la vida útil estimada y el tiempo de propagación.

$$t_i = t_L - t_p \quad (34)$$

Para hacer un diseño óptimo, se pretende que la vida útil estimada sea igual a la vida útil de diseño:

$$t_L = t_d = \varphi_t \cdot t_g \quad (35)$$

La obtención del ancho de fisura es diferente para cada uno de los agentes agresivos. Cuando se trata de carbonatación, se obtendría de despejar de la fórmula ( 25):

$$w_{c,max} = \left( \frac{\frac{x_c(t)}{\sqrt{t} - A_t} - 1}{2,816} \right)^2 \quad (36)$$

Donde:

$x_c(t)$  Recubrimiento mínimo considerado

t Período de iniciación para conseguir la vida útil necesaria, según fórmula ( 34).

$A_t$  Coeficiente de carbonatación

Cuando se trata de penetración de cloruros, el ancho de fisura necesario proviene de la fórmula ( 30):

$$w_{pcl,max} = \frac{-4,73 + \sqrt{4,73^2 - 4 \cdot 31,61 \cdot (1 - f(w))}}{2 \cdot 31,61} \quad (37)$$

Donde:

$f(w)$  Aceleración debido a la fisura.

No obstante, para la obtención de las curvas de durabilidad, se han seguido las siguientes hipótesis:

- En los casos en los que se obtienen tiempos de iniciación “negativos” debido a que el tiempo de propagación es mayor que la vida útil necesaria, obtenemos el ancho de fisura para un período de iniciación de 0,1 años. En general, esta hipótesis conlleva unos anchos de fisura muy grandes que se terminarán por descartar, pero nos permite dibujar cómo sería la curva.
- En el caso de proceso de degradación de carbonatación, se descartarán aquellos recubrimientos en los que dentro del paréntesis de la fórmula ( 32) de un valor menor que 0, ya que hace que esos valores sean inconexos con el resto.
- En el caso de proceso de degradación por penetración de cloruros se considera que la fisura tiene que tender a 0 cuando:
  - El coeficiente  $f(w)$  es menor que 1.
  - En la fórmula ( 37) da error por contener un valor negativo dentro del paréntesis.
  - $W_{pl,max}$  da un valor negativo, por ser menor lo obtenido dentro del paréntesis de la fórmula ( 37) que 4,73.

El proceso que se ha llevado a cabo para la obtención de los gráficos de optimización queda reflejado en los diferentes diagramas de flujo que se muestran en los apartados siguientes. (Figura 39 y Figura 49).

#### 4.1.1 Optimización en vigas de hormigón armado.

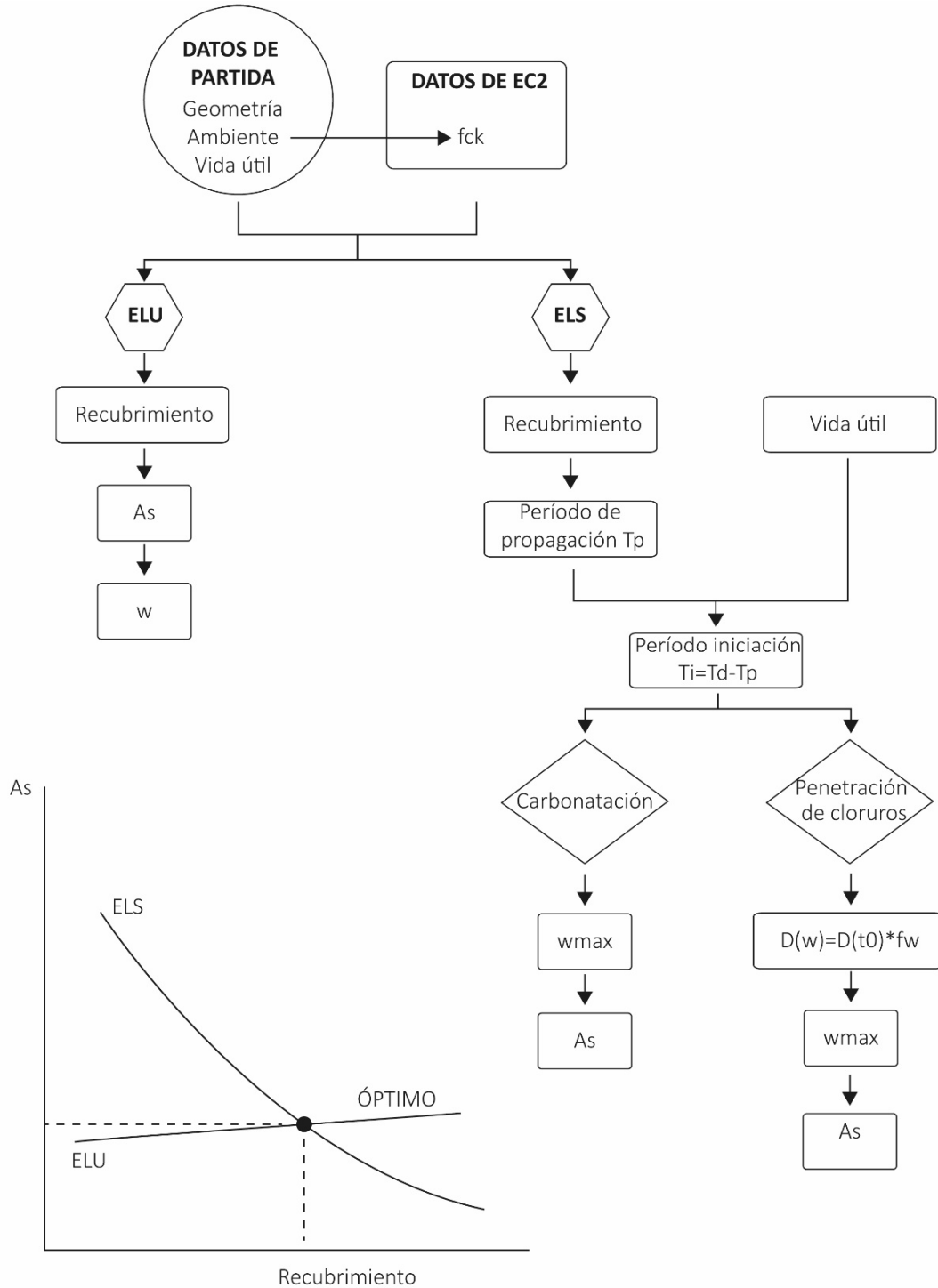


Figura 39 Diagrama de flujo para el caso de vigas de hormigón armado



A continuació, se exposaran les característiques més rellevants dels resultats obtinguts. Com es ha explicat anteriorment, els casos estudiats per als diferents casos de càrrega no han donat resultats amb diferències rellevants entre ells, en quant a durabilitat, com es mostra en la Figura 40, Figura 41 i Figura 42. Per això, a continuació, se exposaran els relatius a la relació de càrrega de 1,86 i diàmetre d'armadura 16 mm. En el Anejo I se troben el rest dels casos.

Per un altre costat, en la llista de dades que apareixen en els gràfics apareixerà, en primer lloc, el recobriment, en segon lloc, l'armadura i, en tercer lloc, l'amplada de fissura que es produiria per a la situació òptima.

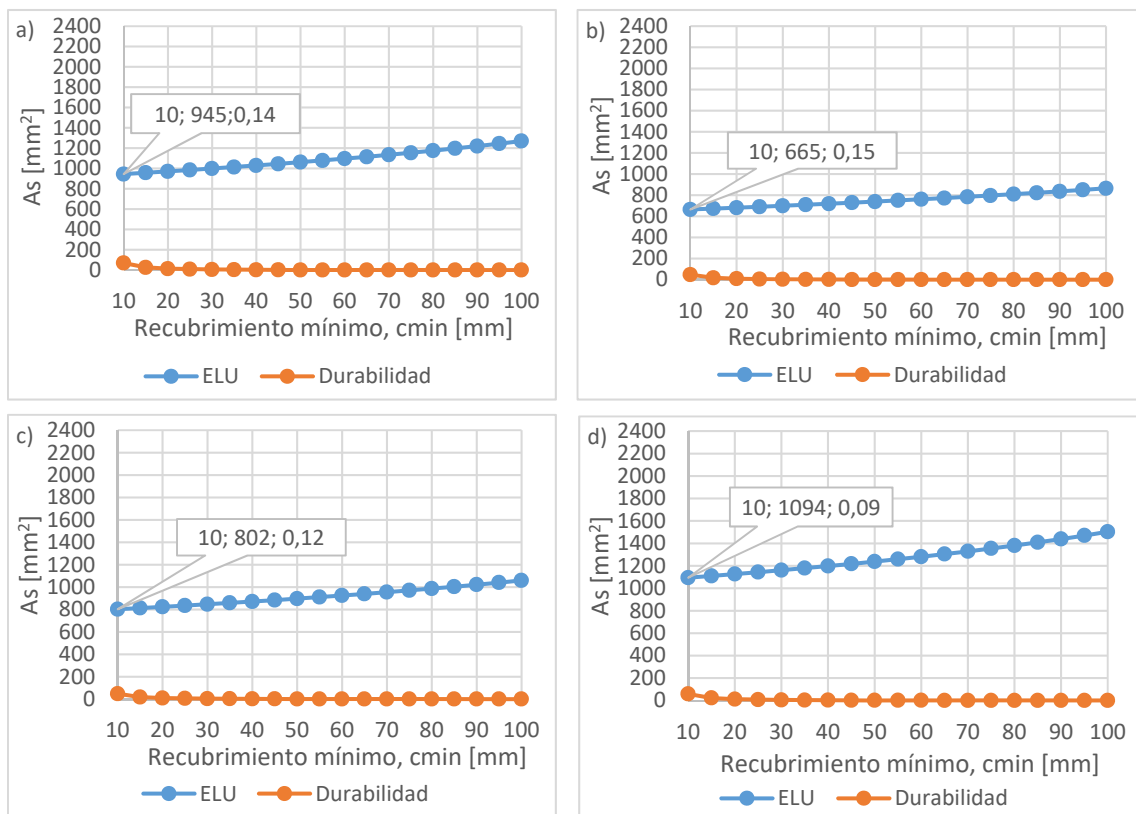
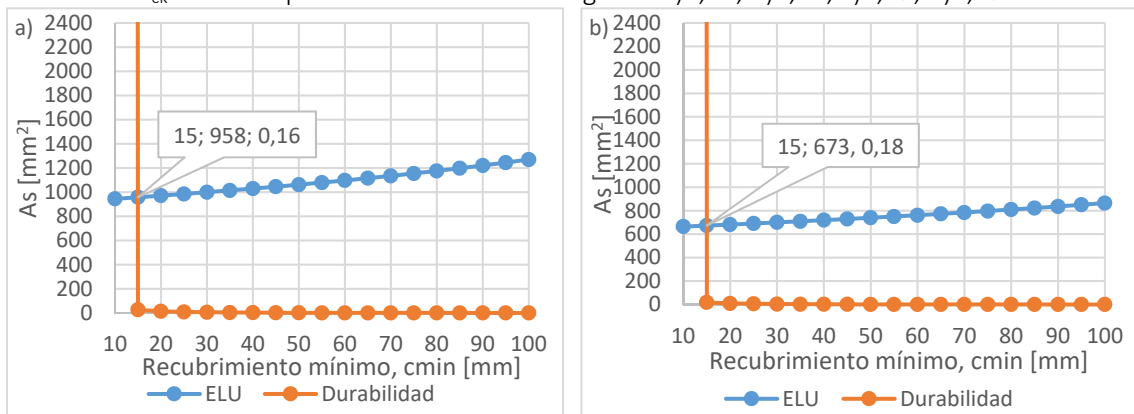


Figura 40 Curva de optimització per a una vida útil de 30 anys, Ambiente XC1 i resistència  $f_{ck} = 20$  MPa per a les relacions de càrrega de: a) 1,86; b) 1,96; c) 2,37; d) 2,57



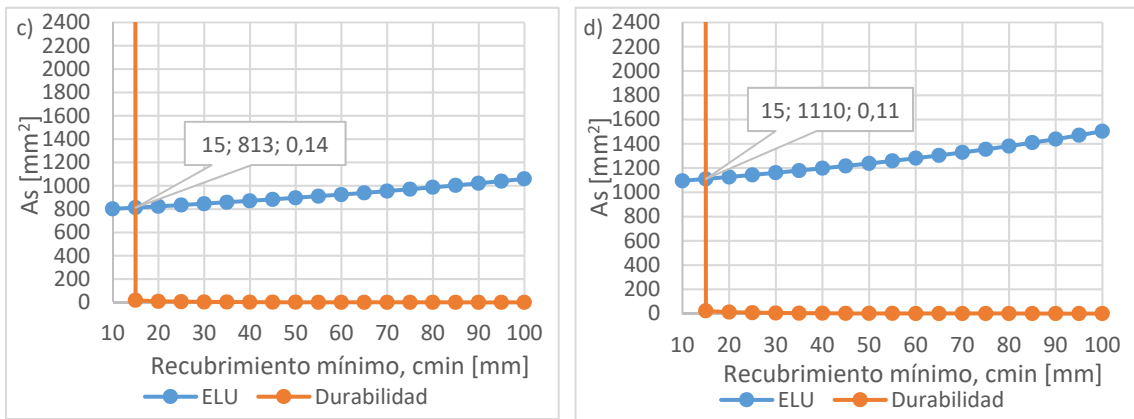


Figura 41 Curva de optimización para una vida útil de 50 años, Ambiente XC1 y resistencia  $f_{ck} = 20$  MPa para las relaciones de carga de: a)1,86; b)1,96; c)2,37; d)2,57

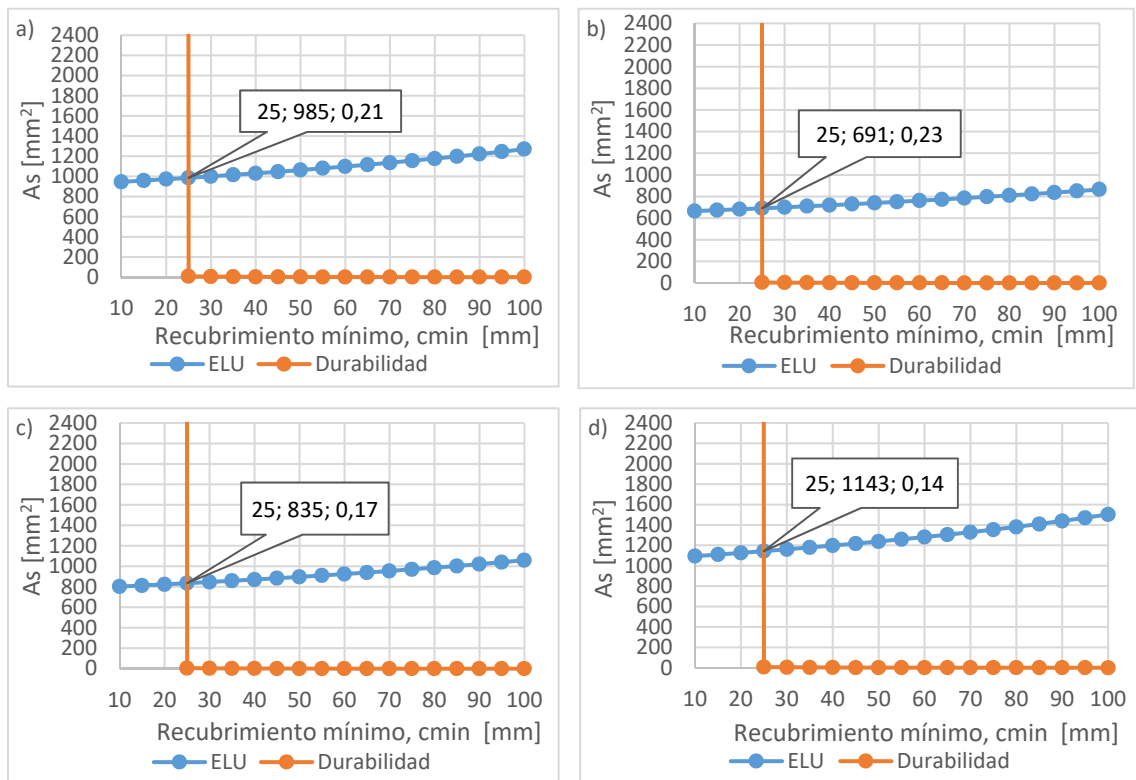


Figura 42 Curva de optimización para vida útil 100 años, Ambiente XC1, resistencia  $f_{ck} = 20$  MPa: a)1,86; b)1,96; c)2,37; d)2,57

Como se observa, para los diferentes casos de carga, las curvas son parecidas, tan sólo cambiaría el ancho de fisura y la armadura necesaria.

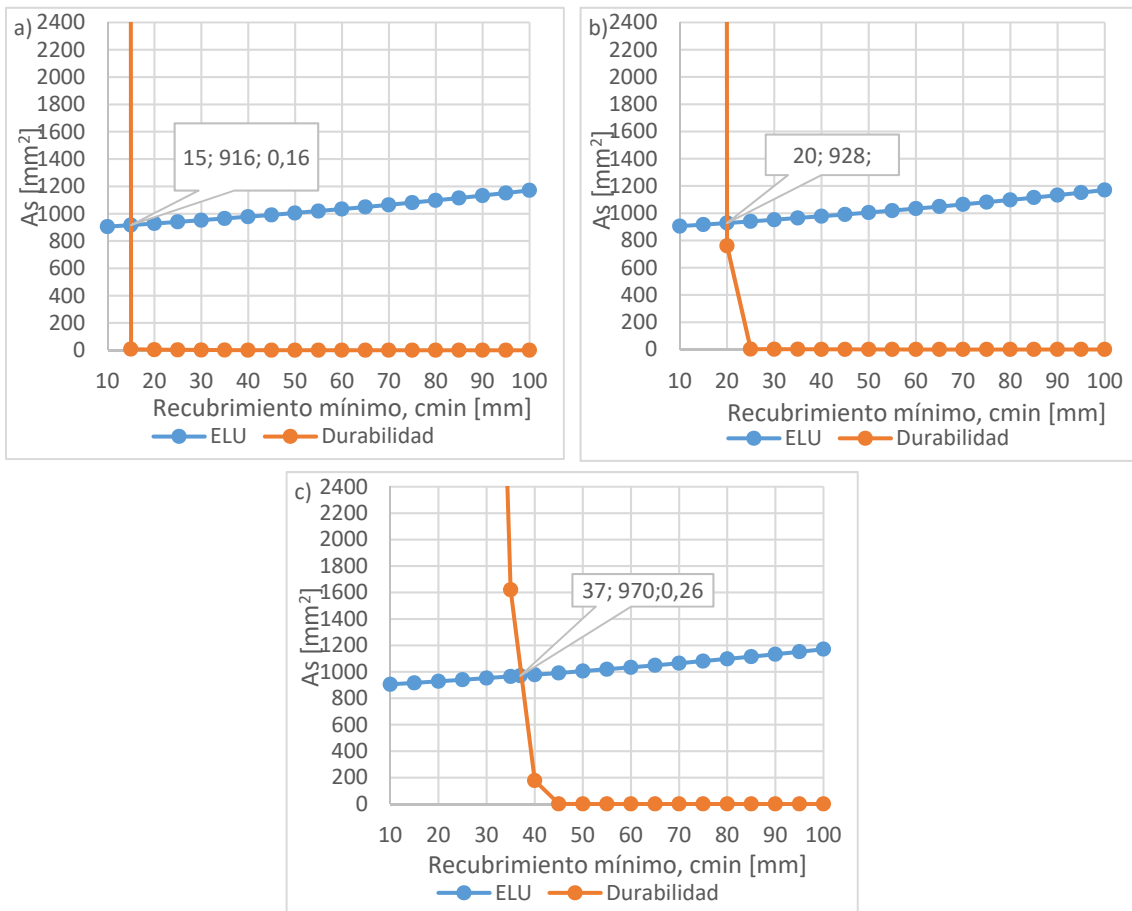


Figura 43 Curva de optimización para la relación de carga de 1,86; Ambiente XC4; resistencia  $f_{ck}=30$  MPa para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.

Para el primer conjunto de gráficos (Figura 40, Figura 41, Figura 42 y Figura 43), cuyo ambiente agresivo es la carbonatación, un aumento del recubrimiento es suficiente para satisfacer la durabilidad. Para el caso de vida útil de 30 años y tipo de ambiente XC1, no se produce el cruce de líneas. Esto es lógico, pues es el ambiente menos agresivo que hay y la curva más restrictiva es la de ELU. Por otro lado, el caso más restrictivo lo tenemos en el ambiente XC4 para una vida útil de 100 años en el que serían necesarios 37 mm de recubrimiento.

Por otro lado, en la Figura 44, Figura 45 y Figura 46 se estudian los casos de penetración de cloruros. En estos gráficos se observa claramente que este agente es más agresivo que la carbonatación.

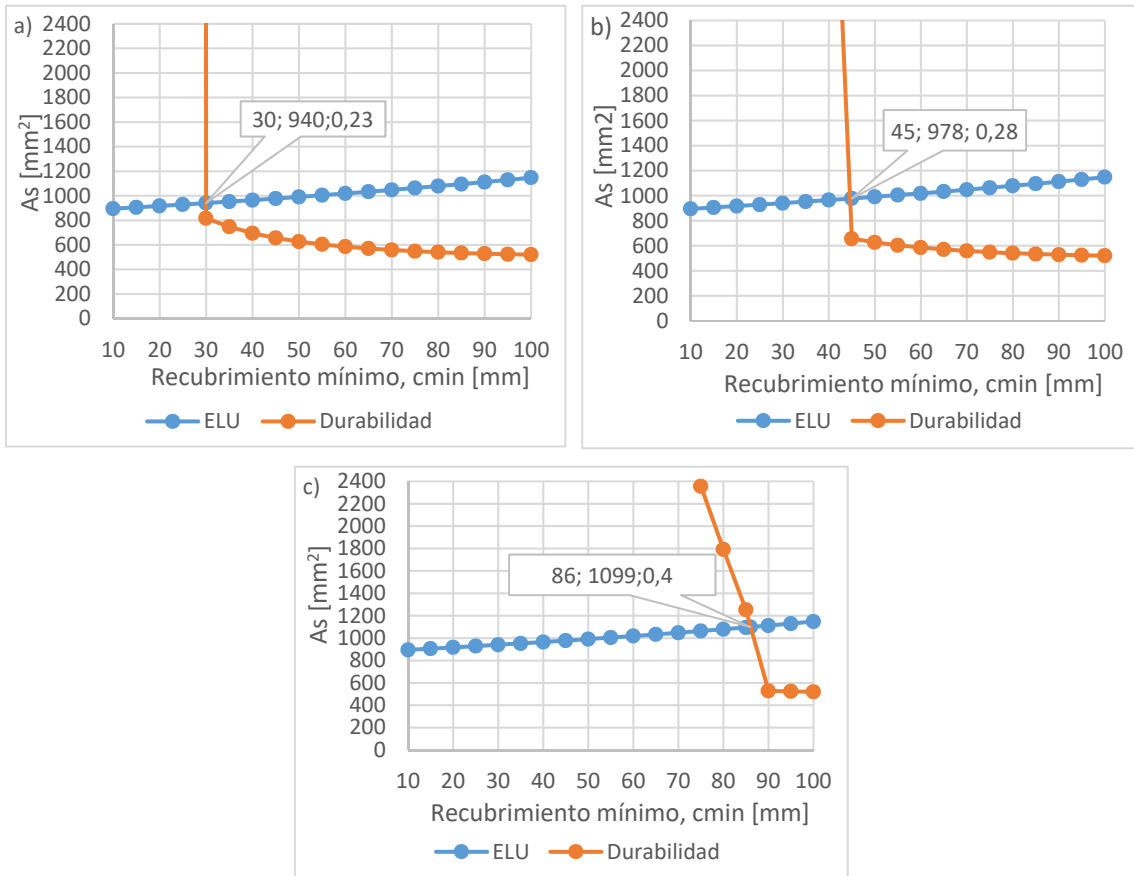
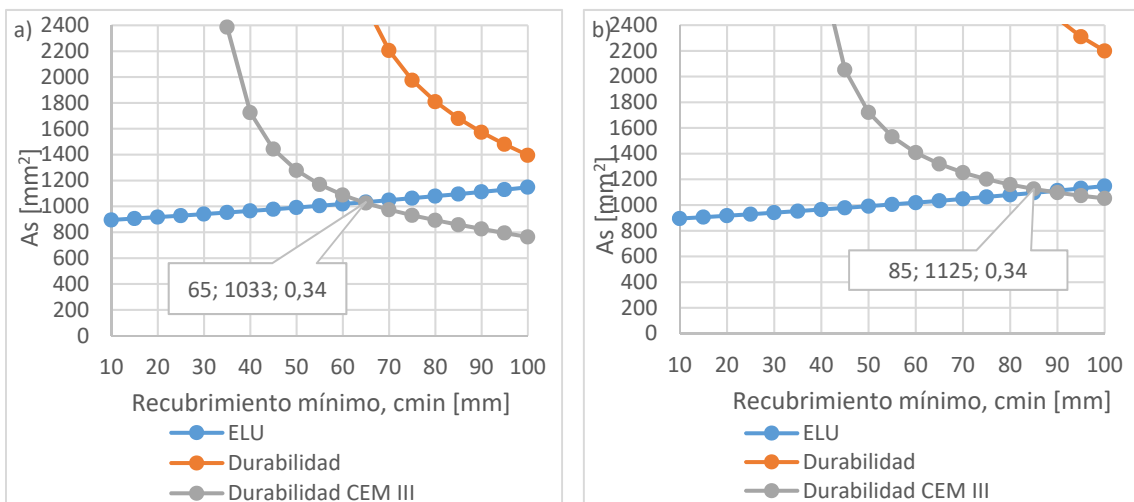


Figura 44 Curva de optimización para la relación de carga de 1,86; Ambiente XS2; resistencia  $f_{\text{ck}}=35$  MPa para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.



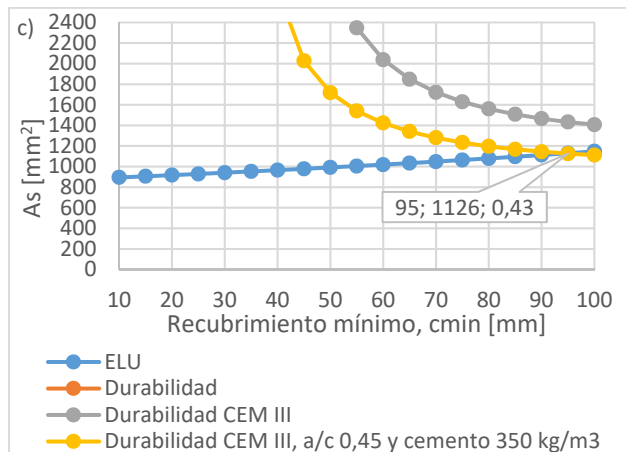


Figura 45 Curva de optimización para la relación de carga de 1,86; Ambiente XD3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.

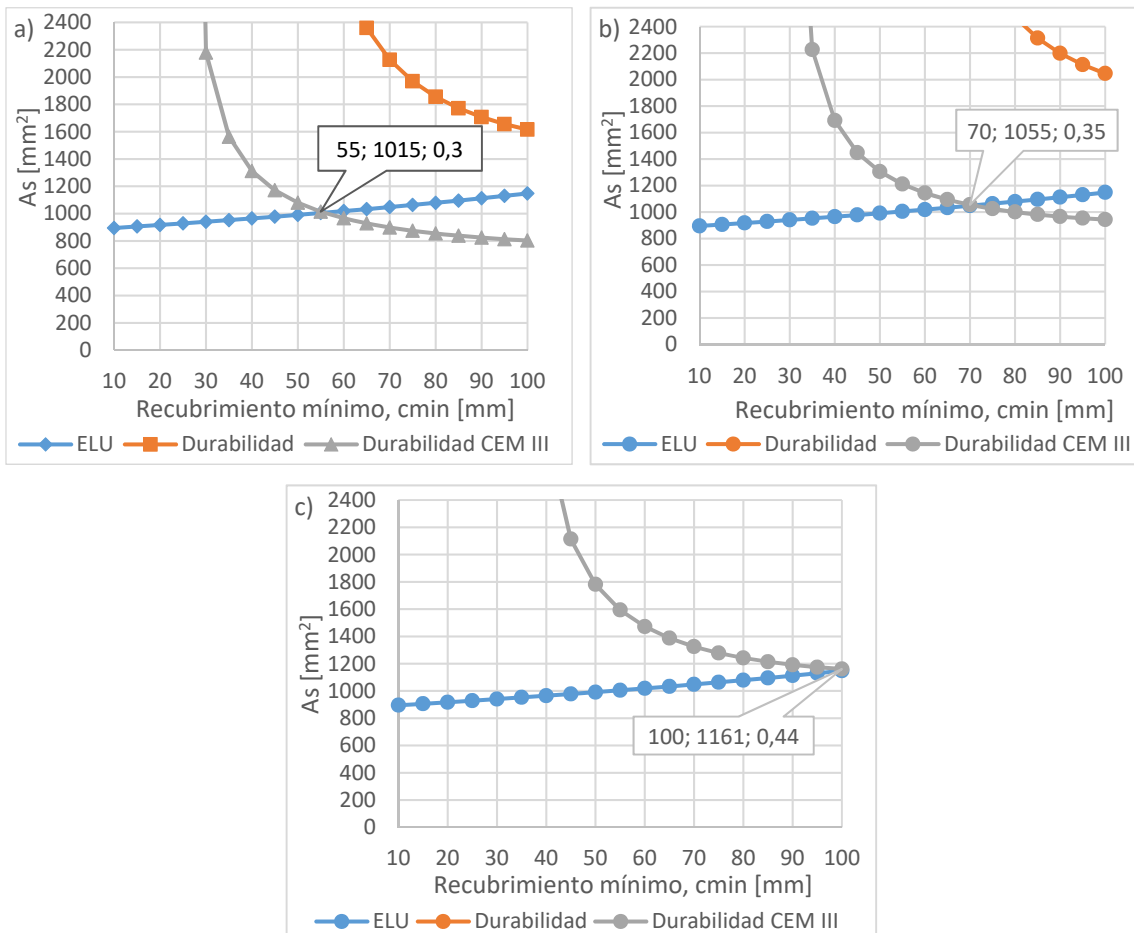


Figura 46 Curva de optimización para la relación de carga de 1,86; Ambiente XS3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.

Por ejemplo, para 100 años y ambiente XS2 (el ambiente menos agresivo de los cloruros por origen marino estudiado) con un recubrimiento de 86 mm, una armadura de 1099 mm<sup>2</sup> y un ancho de fisura de 0,4 se obtendría la durabilidad deseada. Por otro lado, para los ambientes XS3 (el más agresivo de los cloruros de origen marino) y el XD3 (el más agresivo de los cloruros con otros orígenes), con las recomendaciones en cuanto al hormigón dadas por las diversas normativas, las curvas no se cruzan, por lo que es necesario aportarles algunos cambios. En el caso del ambiente XS3, debido a las características iniciales del hormigón, con un cambio de CEM II a CEM III sería suficiente para las tres vidas útiles. Sin embargo, para el tipo de ambiente XD3 y durabilidad 100 años no es posible tan solo con un cambio del tipo de cemento, si no que se hace necesario la reducción de la relación de a/c de 0,5 a 0,45 y el aumento de la cantidad de cemento de 325 a 350 kg/m<sup>3</sup>.

Se hace notar que, en todos los casos de penetración de cloruros, con la armadura y recubrimientos óptimos se genera una fisura mayor que el propuesto por la normativa.

De este modo se podrían crear curvas de diseño para diferentes casos de carga y vidas útiles. Los gráficos de la Figura 47 y Figura 48 han sido obtenidos a partir de las características del hormigón que han hecho posible llegar a una solución optimizada.

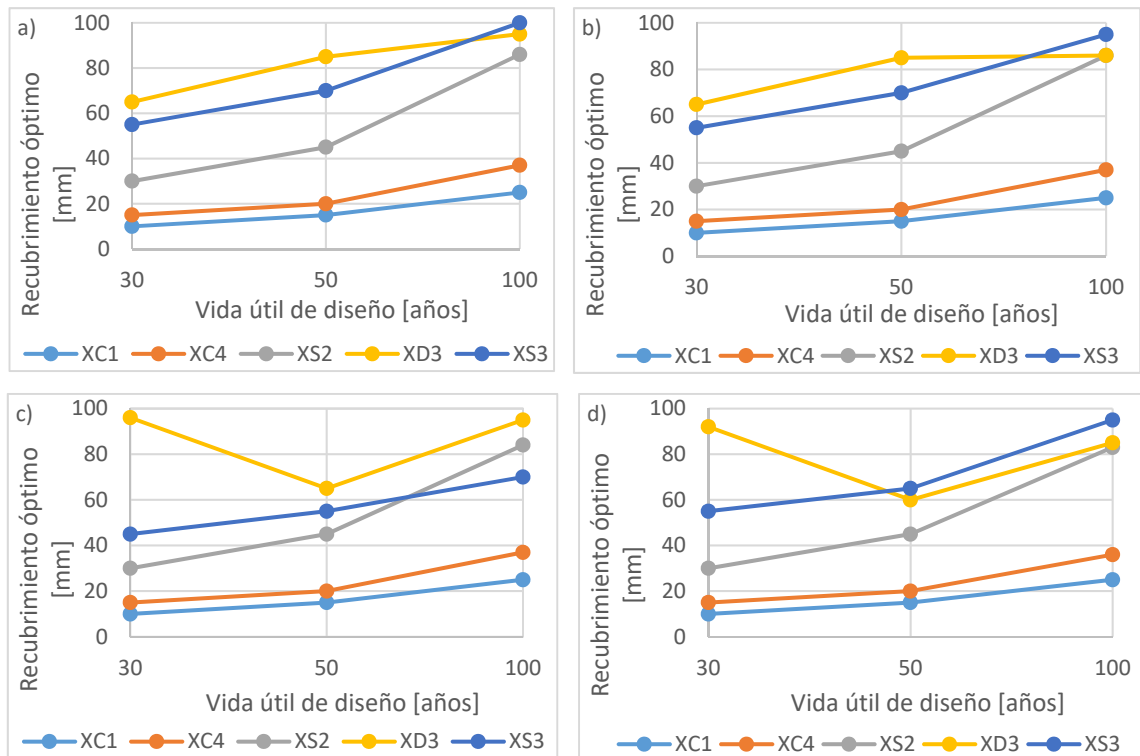


Figura 47 Curvas de diseño de recubrimiento óptimo para diferentes ambientes dependiendo del caso de carga: a)  $Q_d/Q_{cuasi}=1,86$ ; b)  $Q_d/Q_{cuasi}=1,96$ ; c)  $Q_d/Q_{cuasi}=2,37$ ; d)  $Q_d/Q_{cuasi}=2,57$ .

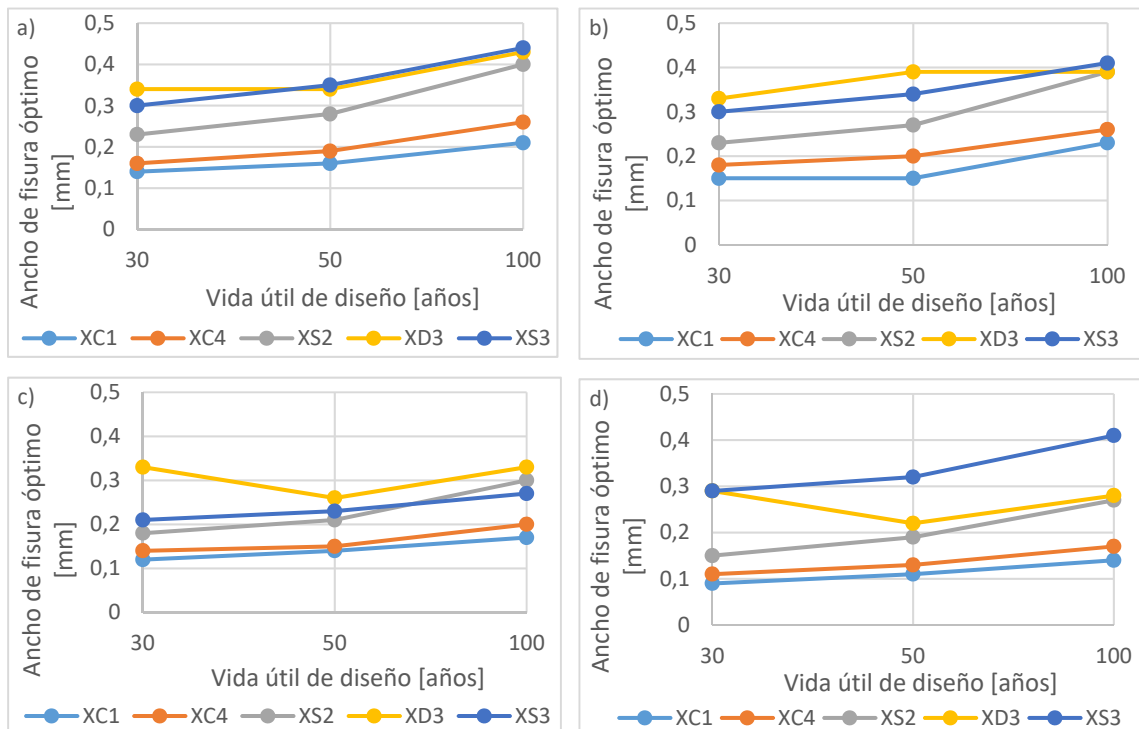


Figura 48 Curvas de diseño de ancho de fisura óptimo para diferentes ambientes dependiendo del caso de carga: a)  $Q_d/Q_{cuasi}=1,86$ ; b)  $Q_d/Q_{cuasi}=1,96$ ; c)  $Q_d/Q_{cuasi}=2,37$ ; d)  $Q_d/Q_{cuasi}=2,57$ .

#### 4.1.2 Optimización en vigas de hormigón pretensado.

Para el diseño de las vigas de hormigón pretensado, se ha realizado el mismo procedimiento que en el caso de vigas de hormigón armado. Para este caso, se ha optado por una viga de 300x650 mm. Se dispone, además, una armadura pasiva de 175 mm<sup>2</sup>, correspondiente a la cuantía mínima geométrica.

Para el caso de hormigón pretensado, la normativa no ofrece la resistencia de hormigón y la relación a/c y cantidad de cemento por tipos de ambiente. Debido a esto, se ha optado por una resistencia de 35 MPa para todos los casos, puesto que por ser pretensado deben ser de alta resistencia. Las relaciones de a/c y cantidad de cemento se han fijado en 0,5 y 325 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, excepto para el ambiente de XS3, el ambiente más agresivo, que se ha optado por 0,45 y 350 kg/m<sup>3</sup>.

El método seguido para el cálculo de las curvas de ELU y ELD se muestra en la Figura 49.

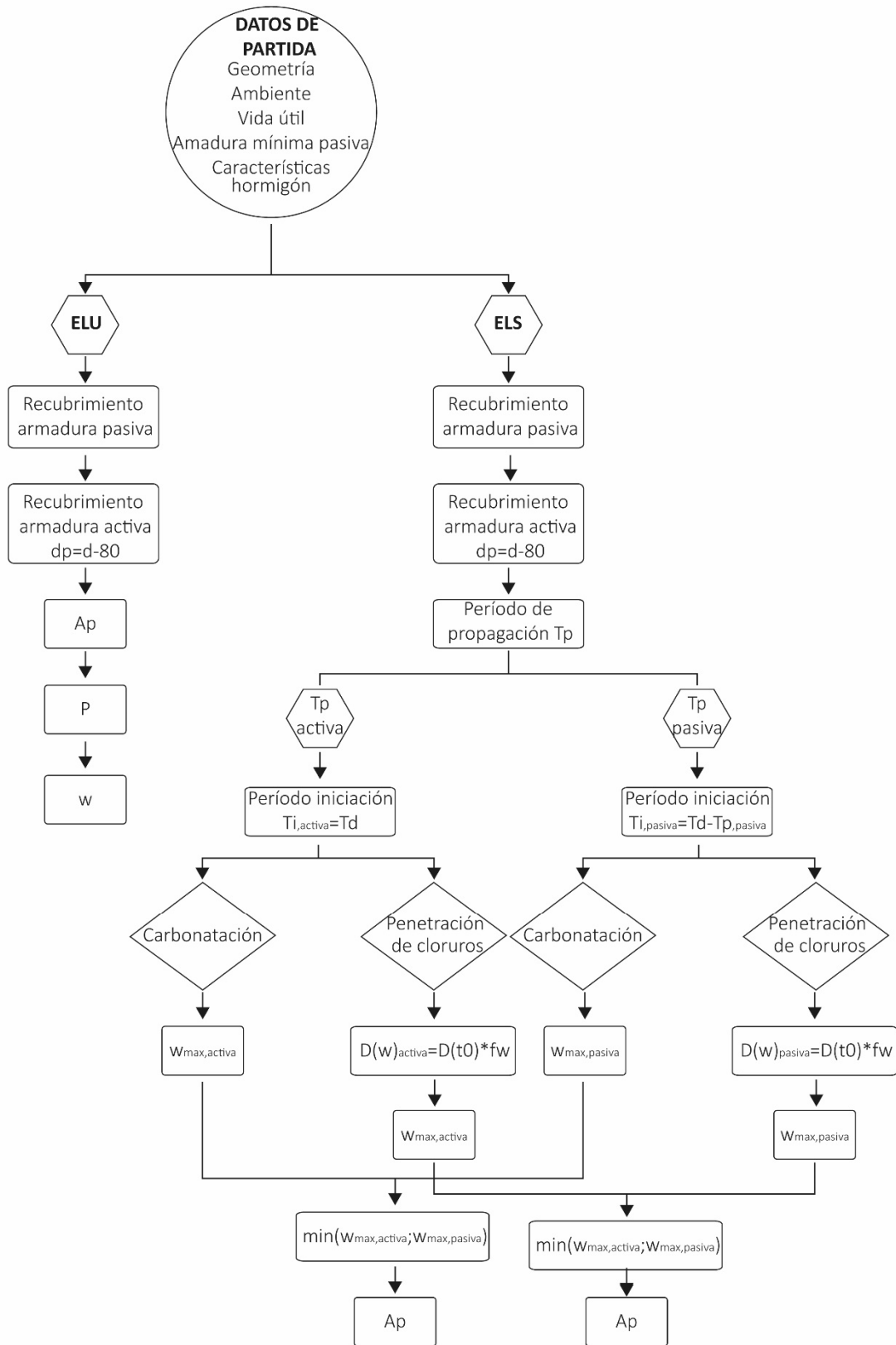


Figura 49 Diagrama de flujo para el caso de vigas de hormigón pretensado



Como ya se ha comentado anteriormente, para hormigón pretensado, la normativa fija el tiempo de propagación a 0. Sin embargo, para la obtención de la curva de durabilidad, se ha calculado qué ancho de fisura sería el más restrictivo:

- Ancho de fisura a partir del período de iniciación resultante del período de propagación,  $t_p$  y el recubrimiento correspondiente a la armadura pasiva.
- Ancho de fisura a partir del período de iniciación resultante del tiempo de propagación de la armadura activa con  $t_p=0$  y el recubrimiento correspondiente a dicha armadura.

La tendencia general es que domine el ancho de fisura de la armadura pasiva. Sin embargo, para el ambiente de penetración de cloruros XS2 y para la vida útil de 30 años del ambiente XD3, se observa que, para grandes recubrimientos, domina el ancho de fisura de la armadura activa.

### Método de cálculo

A continuación, se explicará brevemente cómo se ha obtenido la armadura de pretensado de cada una de las curvas.

- Estado Límite Último:

El proceso para obtener la armadura necesaria de pretensado para el caso de ELU es el siguiente:

Se calcula el momento límite a través de la siguiente fórmula:

$$M_{lim} = 0,369f_{cd}bd_p^2 \quad (38)$$

Donde:

- $f_{cd}$  Resistencia de diseño del hormigón
- $b$  Ancho de la sección
- $d_p$  Recubrimiento mecánico de la armadura activa

- Si  $M_d \leq M_{lim}$ , no será necesaria armadura de compresión, y la armadura activa se calculará como sigue a continuación:

$$y = d_p \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2[M_d - A_s f_{yd}(d - d_p)]}{\eta f_{cd} b d_p}} \right] \leq y_{lim} = 0,8 d_p \xi_{lim} \quad (39)$$

Siendo:

$$\xi_{lim} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \left( \frac{f_{ydp} - \sigma_{\infty}}{E_p} \right)} \approx 0,65 \quad (40)$$

Donde:

$M_d$  Momento de diseño

$A_s$  Armadura pasiva

$f_{yd}$  Resistencia de diseño del acero de la armadura pasiva

$d$  Recubrimiento mecánico de la armadura pasiva

$\eta$  Coeficiente eta, parámetro del diagrama de bloque rectangular, de valor 1 para hormigones de resistencia característica  $\leq 50$  N/mm<sup>2</sup>.

$f_{cd}$  Resistencia de diseño del hormigón

El área de pretensado:

$$A_p = \eta \frac{f_{cd}}{f_{pyd}} by - A_s \frac{f_{yd}}{f_{pyd}} \quad (41)$$

Donde:

$f_{pyd}$  Resistencia de diseño del acero de la armadura activa

- Si  $M_d > M_{lim}$ , necesitará armadura pasiva de compresión. Por lo tanto:

$$A'_s = \frac{M_d - M_{lim} - A_s f_{yd} (d - d_p)}{f_{yd} (d_p - d')} \quad (42)$$

Donde los parámetros son los definidos anteriormente.

A continuación, se obtiene el área de pretensado:

$$A_p = \eta \lambda \xi_{lim} \frac{f_{cd}}{f_{pyd}} b d_p + A'_s \frac{f_{yd}}{f_{pyd}} - A_s \frac{f_{yd}}{f_{pyd}} \quad (43)$$

Siendo  $\xi_{lim}$

$$\xi_{lim} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yd}} \approx 0,61 \quad (44)$$

Donde:

$\lambda$  Coeficiente eta, parámetro del diagrama de bloque rectangular, de valor 0,8 para hormigones de resistencia característica  $\leq 50$  N/mm<sup>2</sup>.

Para el cálculo del ancho de fisura se obtendrá la fibra neutra, despejando de la siguiente igualdad:

$$\frac{P_N}{M_s} = \frac{x^2 b - 2A_s n(d - x) - 2A_p n_p(d_p - x)}{x^2 b \left(\hat{z} - \frac{x}{3}\right) + 2A_s n(d - x)(d - \hat{z}) + 2A_p n_p(d_p - x)(d_p - \hat{z})} \quad (45)$$

Donde:

P	Fuerza de pretensado de neutralización
M <sub>s</sub>	Momento en situación frecuente
n	Es/Ec
n <sub>p</sub>	Ep/Ec
$\hat{z}$	Centro de gravedad de la sección
x	Posición de la fibra neutra
A <sub>p</sub>	Área de pretensado

Con la fibra neutra, se procede a calcular el ancho de fisura tal y como se ha explicado en el apartado de 2.3.1.1 Comprobación del estado límite de fisuración.

- Estado Límite Durabilidad:

En este caso se parte de un ancho de fisura que pretendemos cumplir. Debido a que la fibra neutra se debe calcular sin conocer la armadura activa ni la fuerza de pretensado, no se puede utilizar la fórmula (45). Por este motivo, el cálculo se realiza iterando, como se explica a continuación.

Se parte de la siguiente fórmula:

$$f_x = \frac{d - x^2 b \left(d_p - \frac{x}{3}\right) \sigma_s}{2n(M_s - \sigma_s A_s(d - d_p))} \geq 0 \quad (46)$$

Para valores donde f<sub>x</sub> sea menor que 0, se define una nueva función:

$$f_x = tol_x = 0,01 d \quad (47)$$

Donde:

σ <sub>s</sub>	Tensión en la armadura
----------------	------------------------

Se parte de:

$$x = d \quad (48)$$

En cada iteración, se vuelve a calcular  $f_x$ , para un nuevo valor de  $x$ :

$$x_i = 0,5(x + f_x) \quad (49)$$

Donde convergen  $f_x$  y  $x_i$  se encuentra la fibra neutra.

Una vez calculada la fibra neutra, se puede obtener área de armadura, siendo:

$$A_p = \frac{\sigma_{p,k} + \Delta\sigma_p}{2n\sigma_{p,k}} A'_c \left[ 1 - \sqrt{1 + 4 \frac{P_{cr}}{A'_c} \frac{n\sigma_{p,k}}{(\sigma_{p,k} + \Delta\sigma_p)^2}} \right] \quad (50)$$

Donde:

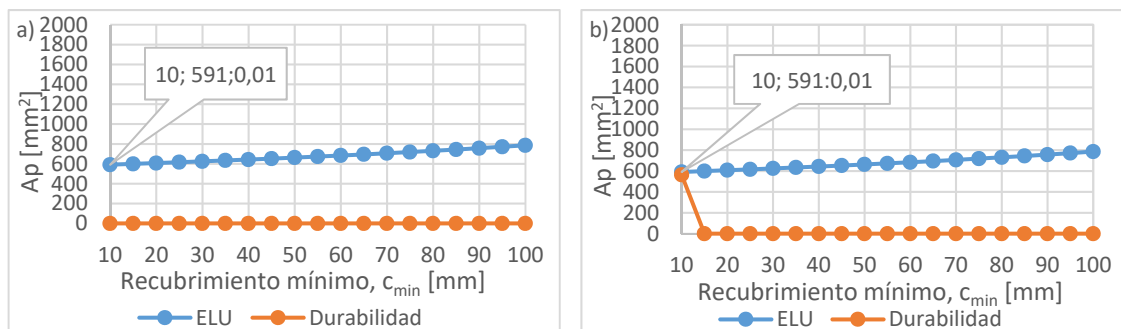
$\sigma_{p,k}$  Tensión en la armadura activa en el infinito

$\Delta\sigma_p$  Variación de tensiones en las armaduras activas a partir del estado de tensión cero del hormigón al mismo nivel.

### Resultados obtenidos

De nuevo, debido a la similitud entre los diferentes casos de carga que se han estudiado, sólo se mostrará, el caso de relación de cargas de 1,86. En el Anejo II se encuentran el resto de casos.

Para la obtención de la curva de durabilidad se ha limitado el ancho de fisura a 0,4 ya que, para fisuras muy grandes se generan altas tensiones en la armadura y la fibra neutra no converge. Para el agente agresivo de la carbonatación, tan solo en los recubrimientos más pequeños y vidas útiles mayores, es necesario un valor menor que 0,4 mm para obtener el tiempo de iniciación necesario para el diseño óptimo.



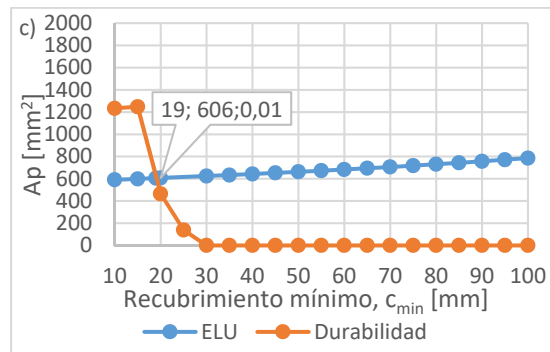


Figura 50 Curva de optimización para la relación de carga de 1,86; Ambiente XC1; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.

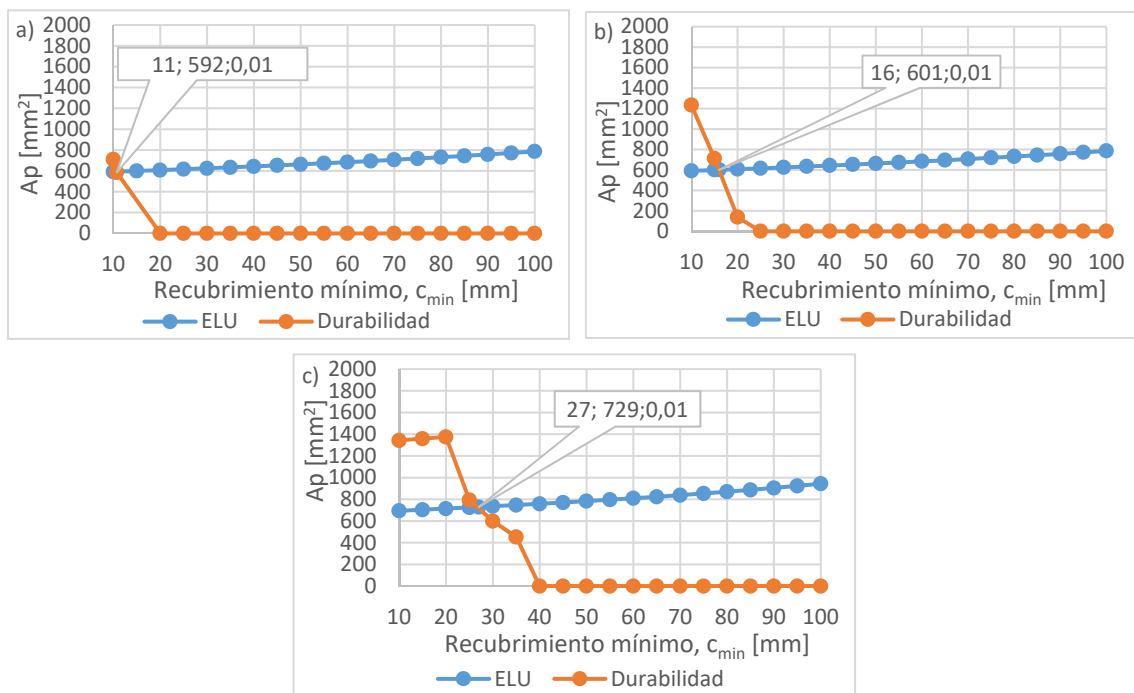


Figura 51 Curva de optimización para la relación de carga de 1,86; Ambiente XC4; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.

En la Figura 50 y Figura 51 se observa que para el ambiente XC1 (ambiente menos agresivo) y vidas útiles 30 y 50 años, no se cruzan las líneas. Esto indica que en estos casos dominaría el Estado Límite Último y que un recubrimiento mínimo de 10 mm sería suficiente para asegurar la durabilidad. En los gráficos, el recubrimiento mínimo representado es el correspondiente a la armadura pasiva, colocando la vaina 80 mm por encima de ésta.

En la Figura 52, Figura 53 y Figura 54 vemos qué ocurre para el caso de penetración de cloruros.

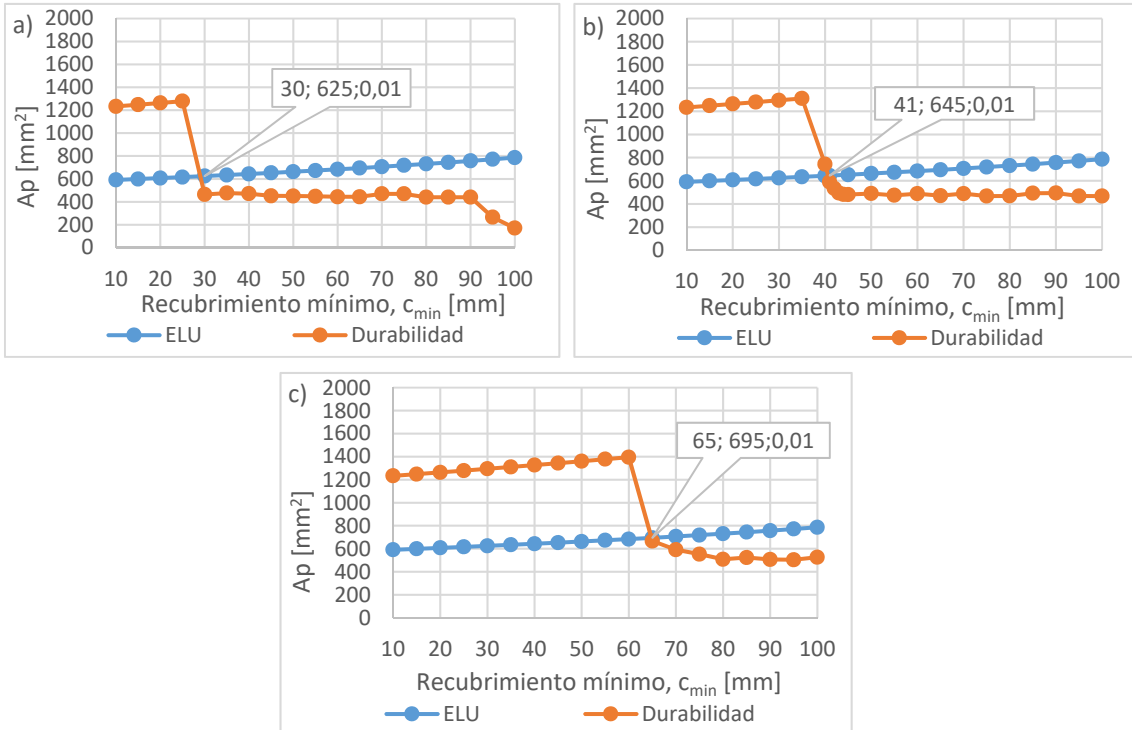


Figura 52 Curva de optimización para la relación de carga de 1,86; Ambiente XS2; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa para una vida útil de: a) 30 años; b) 50 años; c) 100 años.

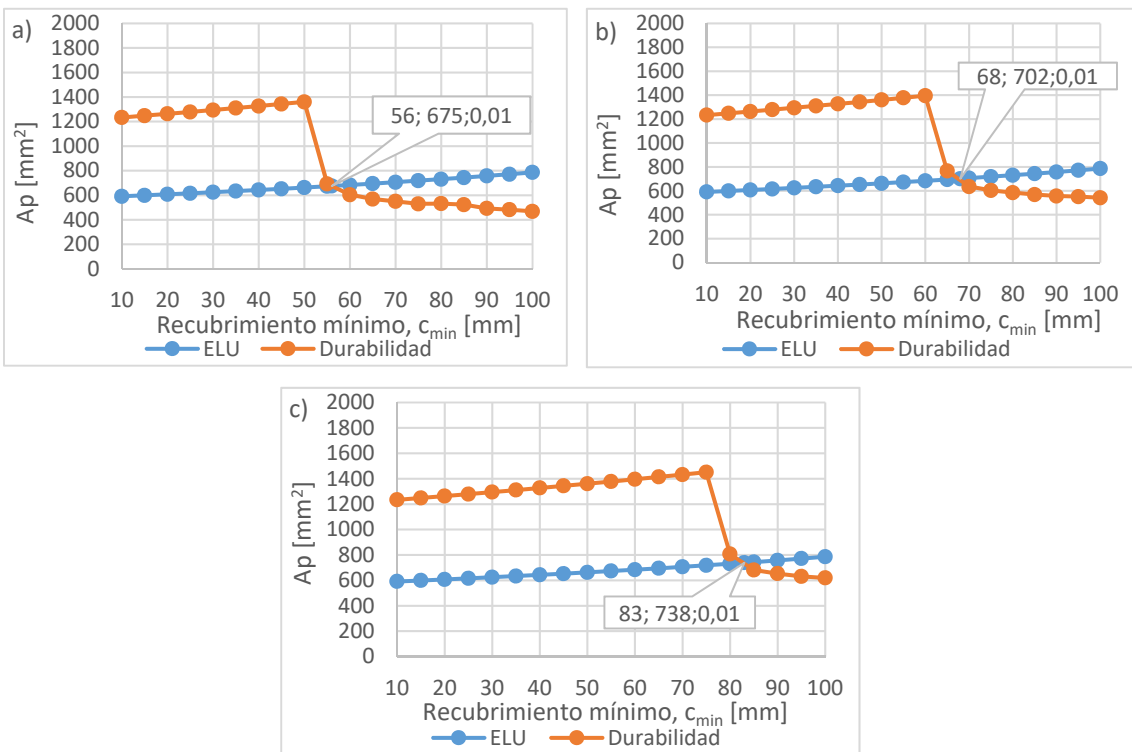


Figura 53 Curva de optimización para la relación de carga de 1,86; Ambiente XD3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.

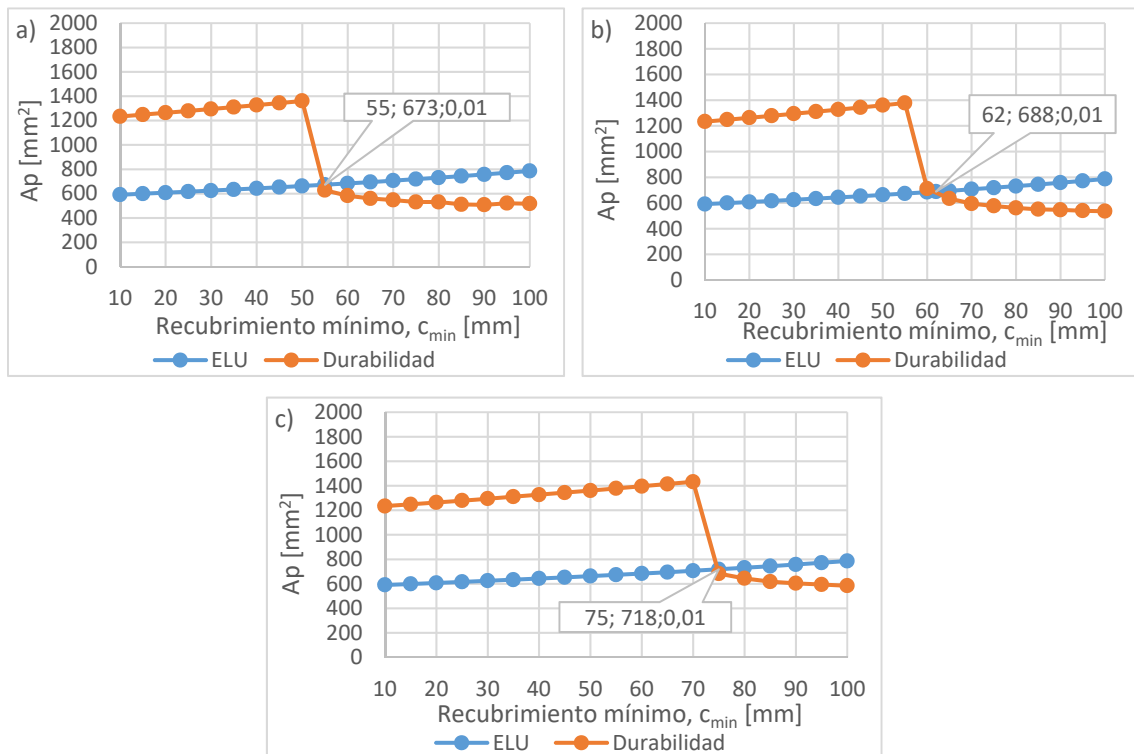


Figura 54 Curva de optimización para la relación de carga de 1,86; Ambiente XS3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.

A la vista de los gráficos, vemos una gran diferencia entre los casos de carbonatación y penetración de cloruros. Para los casos de penetración de cloruros, vemos que todas las curvas de durabilidad siguen el mismo patrón: la curva empieza creciendo, hasta que llega a un punto que cae y empieza a decrecer. Este punto de cambio de curvatura es, justamente, el paso del ancho de fisura necesario 0 a un ancho de fisura que empieza a crecer, pero que sigue siendo menor que 0,35 mm.

Los anchos de fisura obtenidos con la armadura necesaria para ELU, en todos los casos, dan menores de 0,1. Esto da lugar a que el punto óptimo donde se cruzan las curvas debe tener este ancho de fisura. Este hecho no posibilita una optimización mayor, es decir, no es posible encontrar una durabilidad en la que, añadiendo recubrimiento o modificando otros factores, contrarresten el efecto negativo de la fisura.

Por lo tanto, sin modificar las características del material, serían necesarios los siguientes recubrimientos para cumplir con la durabilidad deseada, según el tipo de ambiente (ver Figura 55).

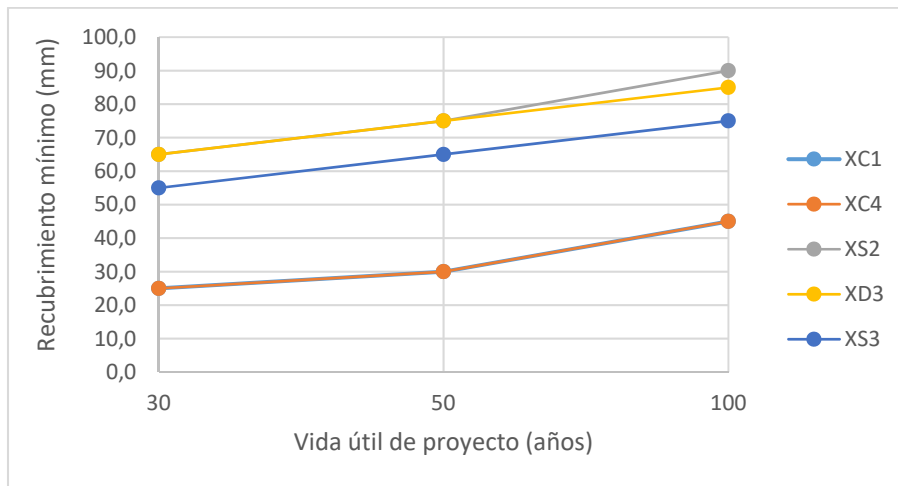
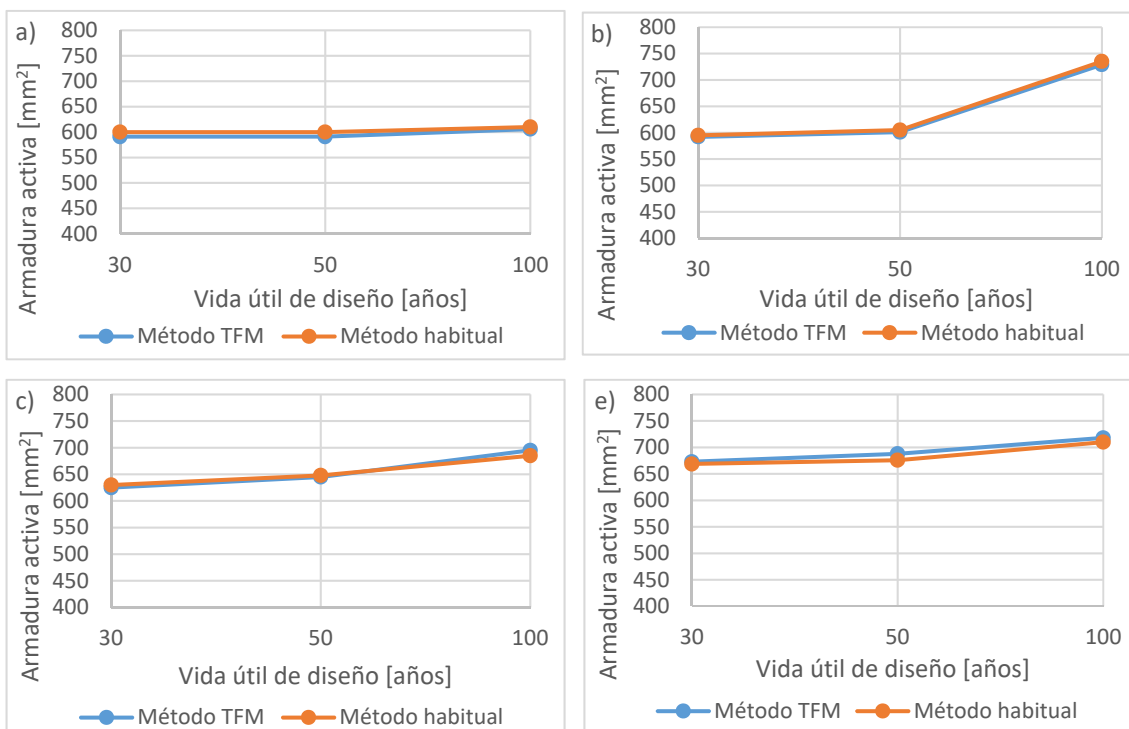


Figura 55 Recubrimiento necesario para elementos de hormigón pretensado, para cumplir con la durabilidad deseada, según el tipo de ambiente.

En la Figura 56 se muestran unos gráficos comparativos entre la armadura necesaria calculada a partir de un Excel proporcionado por la UPC para el cálculo de pretensado parcial y, por otro lado, los resultados obtenidos en este TFM. Como se puede observar, el método aquí propuesto no serviría para optimizar, pues en muy pocos casos se necesita menos armadura que con el cálculo habitual de hormigón pretensado. Esto es debido a que la armadura activa necesaria para cumplir con ELU ya es suficientemente grande como para que el ancho de fisura obtenido sea muy pequeño.





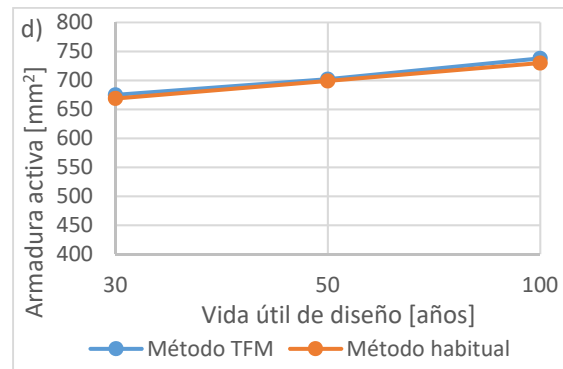


Figura 56 Comparativa entre la armadura de pretensado necesaria mediante el método utilizado en este TFM y el método habitual de cálculo de hormigón pretensado parcial, calculada a partir de una hoja de Excel proporcionada por la UPC para los tipos de ambiente: a) XC1; b) XC4; c) XS2; d) XD3; e) XS3.

#### 4.2 COMPARATIVA ECONÓMICA ENTRE EL MÉTODO NORMATIVO Y EL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN.

Una parte interesante del método propuesto es el ahorro económico que puede suponer, tanto más, cuanto más agresivo sea el ambiente y más restrictiva sea la normativa con el ancho de fisura admisible.

Como hemos dicho anteriormente, este ahorro solo se obtendría en el cálculo de vigas de hormigón armado, ya que en pretensado los valores de la armadura son aproximadamente iguales que con el cálculo habitual del hormigón pretensado parcial. Es por ello que la comparación tan sólo se hará para las vigas de hormigón armado.

Del banco de precios del ITeC (Comerón Graupera & Diéguez Lorenzo, n.d.) se han obtenido los siguientes precios:

- Armadura pasiva para vigas AP500 S de acero en barras corrugadas B500S de límite elástico  $\geq 500 \text{ N/mm}^2$ ..... 1,19 €/kg
- Cemento Pórtland compuesto CEM II/B-M 42,5 N según UNE-EN 197-1, a granel..... 95,08 €/t
- Cemento con escorias de alto horno CEM III/A 42,5 N según UNE-EN 197-1, a granel..... 108,55 €/t
- Hormigón HA-25/F/20/I de consistencia fluida, tamaño de árido 20 mm, con  $\geq 250 \text{ kg/m}^3$  de cemento, apto para clase de exposición I..... 67,57 €/m<sup>3</sup>
- Hormigón HA-30/F/20/IIb de consistencia fluida, tamaño de árido 20 mm, con  $\geq 300 \text{ kg/m}^3$  de cemento, apto para clase de exposición IIb.. 76,80 €/m<sup>3</sup>

- Hormigón HA-35/F/20/IIIb de consistencia fluida, tamaño de árido 20 mm, con  $\geq 325 \text{ kg/m}^3$  de cemento, apto para clase de exposición IIIb.. 82,85 €/m<sup>3</sup>
- Hormigón HA-35/F/20/IV de consistencia fluida, tamaño de árido 20 mm, con  $\geq 325 \text{ kg/m}^3$  de cemento, apto para clase de exposición IV..... 83,91 €/m<sup>3</sup>
- Hormigón HA-35/F/20/IIIc de consistencia fluida, tamaño de árido 20 mm, con  $\geq 350 \text{ kg/m}^3$  de cemento, apto para clase de exposición IIIc.. 85,53€/m<sup>3</sup>

Los precios que a continuación se van a calcular serán los precios de los elementos que cambian entre el cálculo optimizado y el cálculo normativo por metro de viga, es decir, solamente se introducirá el precio del acero de refuerzo, del tipo de cemento y de la clase de hormigón. Cabe recalcar que estos precios sólo sirven de comparación entre ambos métodos, puesto que el cálculo que se ha hecho es demasiado simplificado, en tanto que, por ejemplo, no estaría bien contabilizar el cemento por un lado y el hormigón por el otro, ya que en el hormigón estaría el cemento incluido.

Tabla 18 Precios para cada uno de los casos estudiados, por tipos de ambientes para el cálculo normativo y el cálculo optimizado

XC1									
Cálculo normativo									
Td [años]	C <sub>EC-02</sub> [mm]	As [mm <sup>2</sup> ]	Acero de Refuerzo		Tipo de Cemento		Clase de Hormigón		TOTAL
			Kg/m	€/m	kg/m	€/m	m <sup>3</sup> /m	€/m	€/m
30	16	961	7,54	8,98	345,00	32,80	0,15	10,14	51,92
50	16	961	7,54	8,98	345,00	32,80	0,15	10,14	51,92
100	25	985	7,73	9,20	345,00	32,80	0,15	10,14	52,14
Cálculo optimizado									
Td [años]	C <sub>OPT</sub> [mm]	As [mm <sup>2</sup> ]	Acero de Refuerzo		Tipo de Cemento		Clase de Hormigón		TOTAL
			Kg/m	€/m	kg/m	€/m	m <sup>3</sup> /m	€/m	€/m
30	10	945	7,42	8,83	345,00	32,80	0,15	10,14	51,77
50	15	958	7,52	8,95	345,00	32,80	0,15	10,14	51,89
100	25	985	7,73	9,20	345,00	32,80	0,15	10,14	52,14
XC4									
Cálculo normativo									
Td [años]	C <sub>EC-02</sub> [mm]	As [mm <sup>2</sup> ]	Acero de Refuerzo		Tipo de Cemento		Clase de Hormigón		TOTAL
			Kg/m	€/m	kg/m	€/m	m <sup>3</sup> /m	€/m	€/m
30	25	940	7,38	8,78	345,00	32,80	0,15	11,52	53,10
50	30	952	7,47	8,89	345,00	32,80	0,15	11,52	53,22
100	40	978	7,68	9,14	345,00	32,80	0,15	11,52	53,46
Cálculo optimizado									
Td [años]	C <sub>OPT</sub> [mm]	As [mm <sup>2</sup> ]	Acero de Refuerzo		Tipo de Cemento		Clase de Hormigón		TOTAL
			Kg/m	€/m	kg/m	€/m	m <sup>3</sup> /m	€/m	€/m
30	15	916	7,19	8,56	345,00	32,80	0,15	11,52	52,88
50	20	928	7,28	8,67	345,00	32,80	0,15	11,52	52,99
100	37	970	7,61	9,06	345,00	32,80	0,15	11,52	53,38

XS2									
Cálculo normativo									
Td [años]	C <sub>EC-02</sub> [mm]	As [mm <sup>2</sup> ]	Acero de Refuerzo		Tipo de Cemento		Clase de Hormigón		TOTAL
			Kg/m	€/m	kg/m	€/m	m <sup>3</sup> /m	€/m	€/m
30	35	1634	12,83	15,26	345,00	32,80	0,15	12,43	60,49
50	40	2023	15,88	18,90	345,00	32,80	0,15	12,43	64,13
100	50	3093	24,28	28,89	345,00	32,80	0,15	12,43	74,12
Cálculo optimizado									
Td [años]	C <sub>OPT</sub> [mm]	As [mm <sup>2</sup> ]	Acero de Refuerzo		Tipo de Cemento		Clase de Hormigón		TOTAL
			Kg/m	€/m	kg/m	€/m	m <sup>3</sup> /m	€/m	€/m
30	30	940	7,38	8,78	345,00	32,80	0,15	12,43	54,01
50	45	978	7,68	9,14	345,00	32,80	0,15	12,43	54,37
100	86	1099	8,63	10,27	345,00	32,80	0,15	12,43	55,50
XD3									
Cálculo normativo									
Td [años]	C <sub>EC-02</sub> [mm]	As [mm <sup>2</sup> ]	Acero de Refuerzo		Tipo de Cemento		Clase de Hormigón		TOTAL
			Kg/m	€/m	kg/m	€/m	m <sup>3</sup> /m	€/m	€/m
30	40	2023	15,88	18,90	345,00	32,80	0,15	12,59	64,29
50	45	2508	19,69	23,43	345,00	32,80	0,15	12,59	68,82
100	55	3767	29,57	35,19	345,00	32,80	0,15	12,59	80,58
Cálculo optimizado									
Td [años]	C <sub>OPT</sub> [mm]	As [mm <sup>2</sup> ]	Acero de Refuerzo		Tipo de Cemento		Clase de Hormigón		TOTAL
			Kg/m	€/m	kg/m	€/m	m <sup>3</sup> /m	€/m	€/m
30	65	1033	8,11	9,65	345,00	37,45	0,15	12,59	59,69
50	85	1125	8,83	10,51	345,00	37,45	0,15	12,59	60,55
100	95	1126	8,84	10,52	345,00	37,45	0,15	12,83	60,80
XS3									
Cálculo normativo									
Td [años]	C <sub>EC-02</sub> [mm]	As [mm <sup>2</sup> ]	Acero de Refuerzo		Tipo de Cemento		Clase de Hormigón		TOTAL
			Kg/m	€/m	kg/m	€/m	m <sup>3</sup> /m	€/m	€/m
30	40	10558	82,88	98,63	345,00	32,80	0,15	12,83	144,26
50	45	12506	98,17	116,82	345,00	32,80	0,15	12,83	162,46
100	55	16430	128,98	153,48	345,00	32,80	0,15	12,83	199,11
Cálculo optimizado									
Td [años]	C <sub>OPT</sub> [mm]	As [mm <sup>2</sup> ]	Acero de Refuerzo		Tipo de Cemento		Clase de Hormigón		TOTAL
			Kg/m	€/m	kg/m	€/m	m <sup>3</sup> /m	€/m	€/m
30	55	1015	7,97	9,48	345,00	37,45	0,15	12,83	59,76
50	70	1055	8,28	9,86	345,00	37,45	0,15	12,83	60,13
100	100	1161	9,11	10,85	345,00	37,45	0,15	12,83	61,12

En la Figura 57 se representa la tendencia de la variación de costes del diseño:

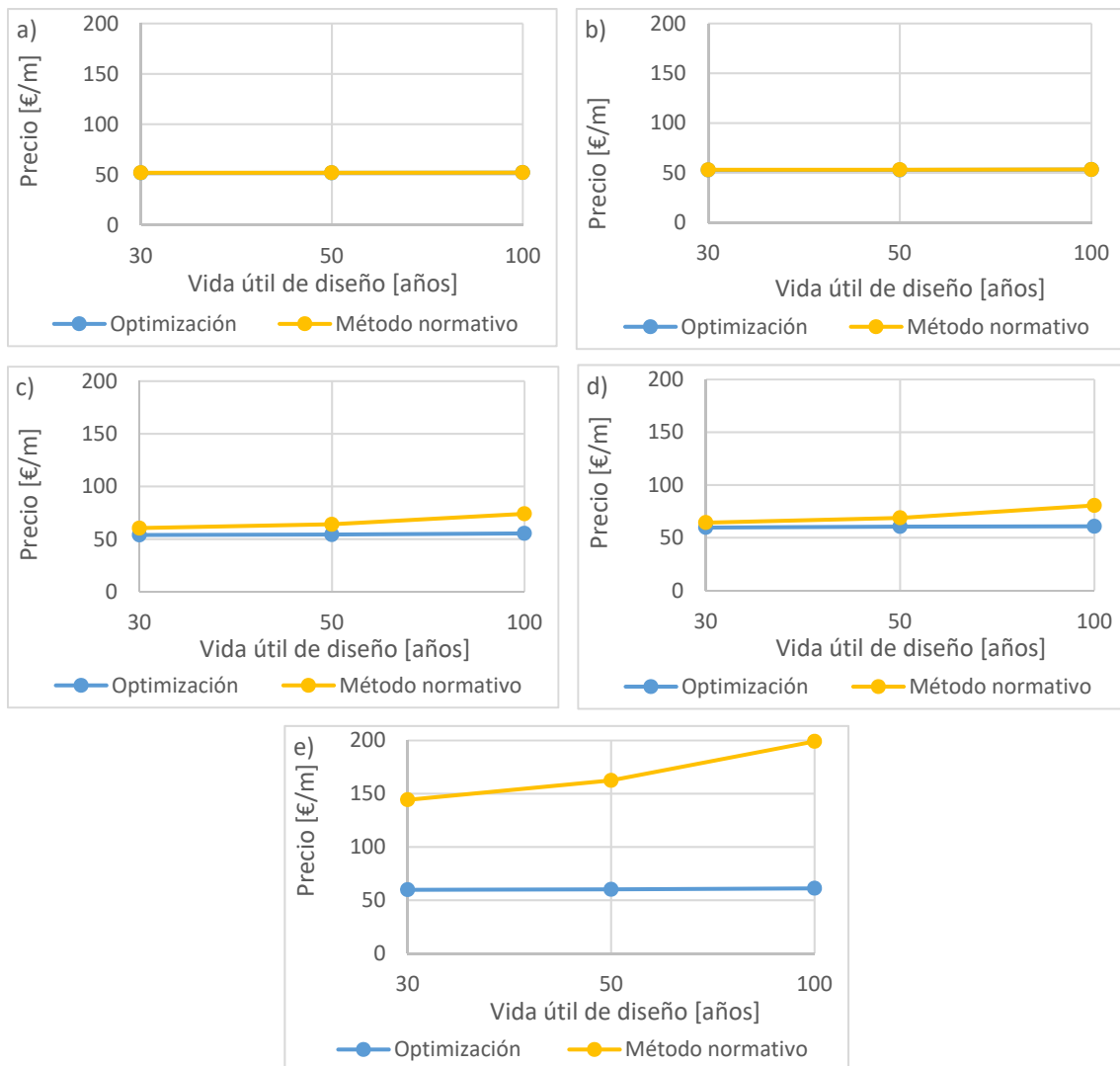


Figura 57 Comparativa de precios para el método por optimización y el método del Anejo 9 para: a) XC1; b) XC4; c) XS2; d) XD3; e) XS3.

Se observa que, a mayor agresividad del ambiente, mayor es el ahorro que se podría tener con el método optimizado. Para los casos de carbonatación el coste es, aproximadamente, el mismo que si se calculara con el método normativo. Sin embargo, en ambientes con penetración de cloruros como agente agresivo, el precio empieza a ser diferente, cuanto más, a mayor vida útil. El caso más extremo de todos lo encontramos en el ambiente XS3, equivalente al ambiente IIIc según la EHE-08 (Gobierno de España, 2008). En este ambiente solo se permite un ancho de fisura de 0,1 mm, motivo por el cual se multiplica la cantidad de armadura necesaria y, por lo tanto, el precio, llegando a elevarse hasta tres veces más que con el método optimizado. Esto, en grandes obras, puede suponer un ahorro económico muy importante.

### 4.3 RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO POR DURABILIDAD.

A la vista de los resultados obtenidos en los capítulos anteriores y, para obtener un ahorro económico y ser más sostenibles, se proponen las siguientes recomendaciones:

- La fisura afecta negativamente a la durabilidad de un elemento de hormigón, tanto armado como pretensado. Sin embargo, se pueden contrarrestar los efectos aumentando el recubrimiento o modificando las características del hormigón, con el consiguiente ahorro económico en armadura de refuerzo.
- A pesar de contrarrestar el efecto del ancho de fisura con un aumento de recubrimiento, no se permitirán anchos de fisura por encima de 0,5 mm. En el caso de hormigones vistos, se recomienda fijar el límite superior en 0,4 mm por cuestiones estéticas.
- El máximo recubrimiento recomendado lo fijaríamos en 10 cm, pues por encima de esto, estaríamos reduciendo demasiado el brazo de palanca, y por lo tanto la eficacia de las armaduras.
- Para necesidades de recubrimiento por encima de los 10 cm, se recomienda modificar el tipo de cemento a CEM III, pues incrementa favorablemente la durabilidad.
- Para ambientes muy agresivos, se puede combinar el CEM III con otro tipo de adiciones como las cenizas volates, hasta el límite que marca la normativa, para mejorar todavía más el comportamiento.
- Otra de las medidas a tener en cuenta es la reducción de la relación a/c y aumentar la cantidad del contenido de cemento.
- La optimización para el caso de hormigón pretensado no es posible con este método, pues la armadura necesaria para cumplir con el Estado Límite Último nos garantiza anchos de fisura tales que no es posible su optimización.
- Otra opción para mejorar la durabilidad de un elemento es optar por diámetros de armadura menores, pues son más favorables a la durabilidad, debido a:
  - El aumento del tiempo de propagación.
  - La disminución del ancho de fisura generado por la armadura necesaria para ELU.
- Para los ambientes en los que el agente agresivo predominante sea la carbonatación:
  - No se considera necesario elevar el recubrimiento por encima del que marca la norma, pues no se trata de ambientes muy peligrosos. De este modo, con las recomendaciones seguidas por la normativa nos encontraríamos ante una durabilidad adecuada para todos los casos estudiados.
  - La elección de hormigones menos permeables, es decir, más compactos y con menos porcentaje de aire ocluido, hará que el CO<sub>2</sub> tenga una mayor dificultad para avanzar hacia la armadura.

- Para los ambientes en los que el agente agresivo predominante sea la penetración de cloruros, se recomienda, en caso de ser necesario, elevar el recubrimiento hasta 10 cm. Para vidas útiles de 100 años, cuando el agente agresor sean los cloruros, se recomienda encarecidamente un uso de cemento tipo CEM III, y la posibilidad de otro tipo de adiciones.

## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Tras los estudios realizados a lo largo del TFM vemos que en la EHE-08 (Gobierno de España, 2008) hay una contradicción entre el cálculo mediante el Anejo 9 y el cálculo mediante el Artículo 49º del Capítulo 11. Mientras que el artículo 49º sigue la teoría de que la fisura tiene un efecto muy negativo en la durabilidad, con el consiguiente aumento de armadura; el Anejo 9, indicado para cálculos más específicos, sigue la segunda de las teorías explicadas: la fisura no tiene un efecto tan negativo en la durabilidad como se cree, y por lo tanto, no la tiene en cuenta.

A partir de los modelos encontrados en la literatura, se ha observado que la fisuración tiene un efecto que, en general, es apreciable en la vida útil de cálculo dependiendo del ambiente de exposición en el que nos encontremos. Así pues, en los ambientes estudiados afectados por carbonatación la afectación del ancho de fisura es menor que en los ambientes estudiados por penetración de cloruros. Sin embargo, es cierto que, en general, se observa que cuando no cumple la durabilidad mediante la introducción del ancho de fisura, tampoco la cumple mediante el método del Anejo 9.

Aun así, a pesar de la importancia negativa que la fisura puede tener para la durabilidad, se pueden contrarrestar los efectos aumentando el recubrimiento o modificando las características del hormigón, con el consiguiente ahorro económico en armadura de refuerzo y, por ende, el ahorro energético y la sostenibilidad que ello supone.

Respecto a las relaciones de carga, cabe destacar que, teniendo en cuenta el Estado Límite de Fisuración, desarrollado en el artículo 49º del Capítulo 11 de la EHE-08 (Gobierno de España, 2008), no hay una relación lineal entre ellas en cuanto a la armadura final necesaria mediante el cálculo habitual. Por otro lado, las curvas de durabilidad y Estado Límite Último obtenidas en los gráficos del método de optimización siguen un patrón similar para todos los casos de carga.

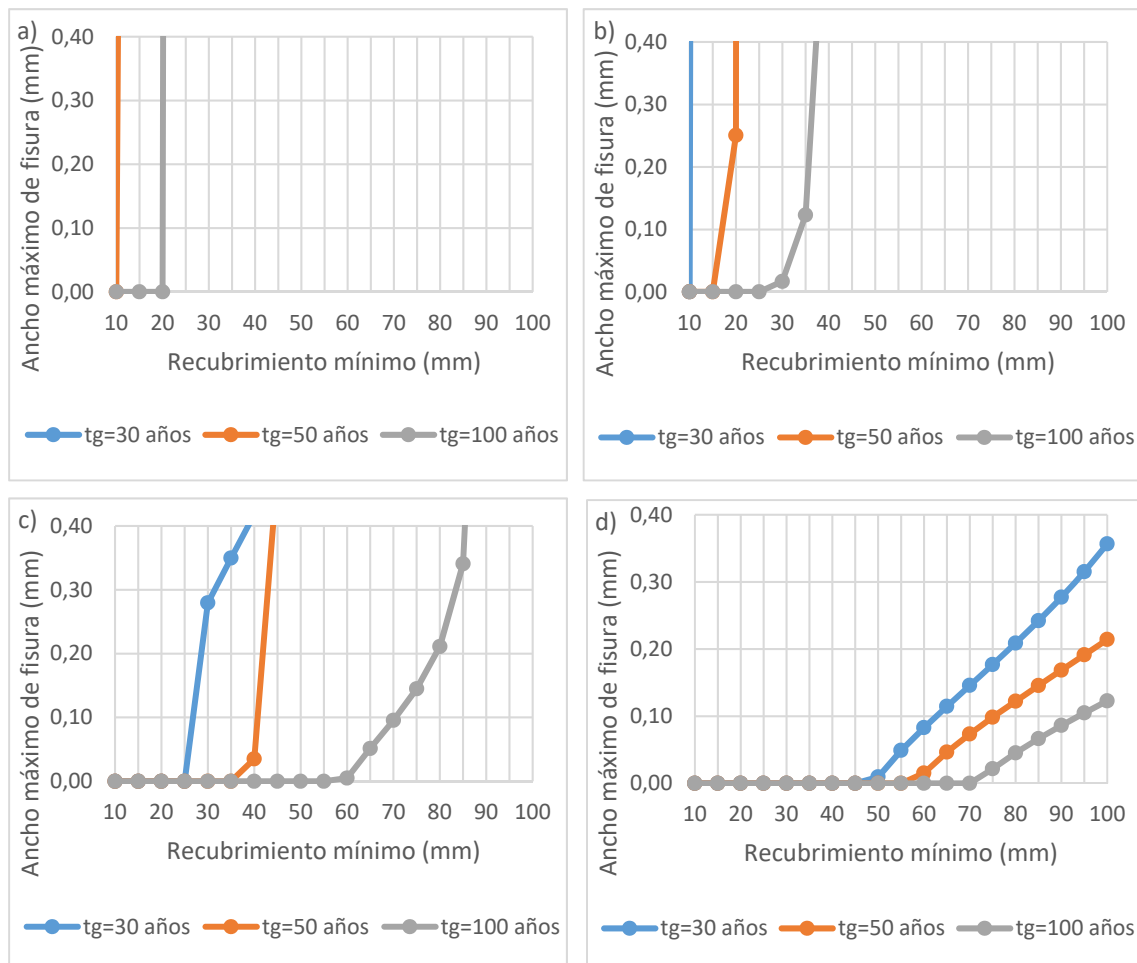
Es importante hacer notar que en este estudio solo se ha tenido en cuenta la afección del ancho de fisura en el tiempo de iniciación. Sin embargo, según la literatura estudiada, la velocidad de corrosión que afecta al tiempo de propagación es igualmente importante y necesitaría de un estudio más riguroso en cuanto a su modificación por fisuración.

Por otro lado, se ha observado que las recomendaciones que da el Eurocódigo 2 (AENOR, 2004) en la *Tabla E.1N-Clases de resistencia indicativas* para la resistencia del hormigón sólo dependen del tipo de ambiente en el que esté la estructura y no de su vida útil. En este sentido, sería interesante poder disponer de una tabla con las características del hormigón (resistencia, relación a/c y cantidad de cemento) que dependieran del ambiente y de la vida útil de proyecto. Del mismo modo, también sería necesaria una tabla análoga para el caso de hormigón pretensado.

Es importante destacar que para los ambientes más agresivos se recomienda mejorar las características del hormigón mediante un cambio de CEM II a CEM III, la reducción de la relación de a/c y el aumento, en su caso, de la cantidad de cemento. Estos cambios mejoran la durabilidad del elemento y conlleva a una solución más económica y sostenible que la necesaria para cumplir el ancho de fisura propuesto por la norma.

Cabe recalcar que, al tratar el recubrimiento, el ancho de fisura y la calidad del hormigón como factores que interactúan entre sí, se puede conseguir la durabilidad deseada, sin tener que restringirse a un ancho de fisura límite. En las figuras 58 y 59 se representa cuál sería el recubrimiento mínimo que iría ligado a un ancho de fisura máximo, para conseguir una vida útil determinada en un ambiente de exposición dado, para un diámetro de 16 mm. En ellas se observa que una vida útil menor y un ambiente de exposición menos agresivo necesitará un recubrimiento mínimo inferior.

- Hormigón armado





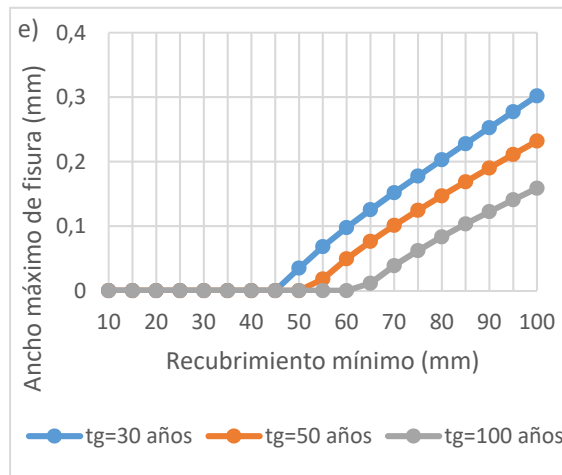
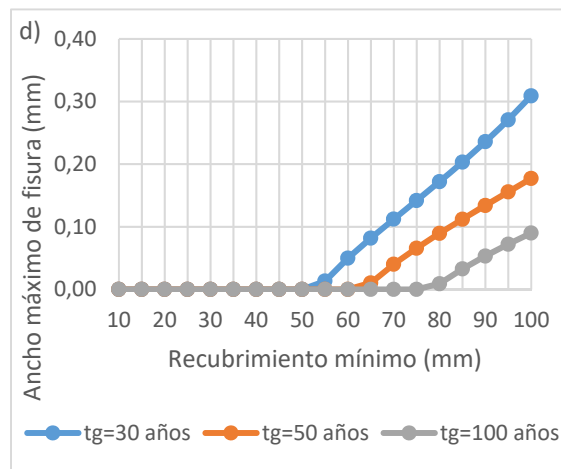
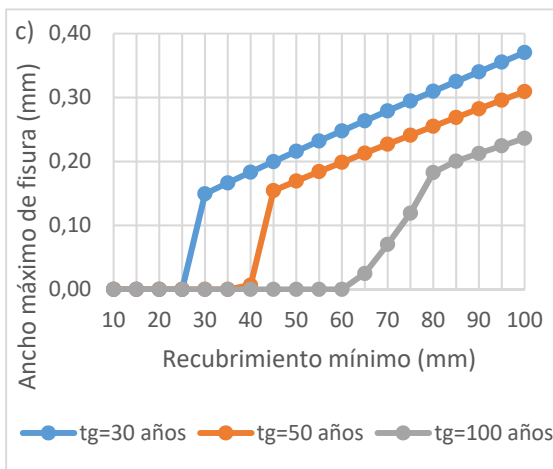
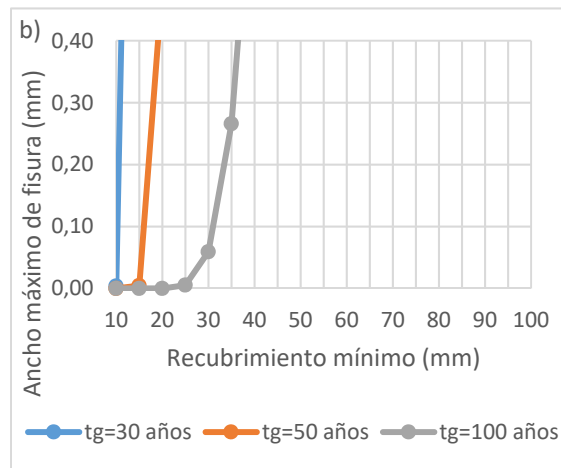
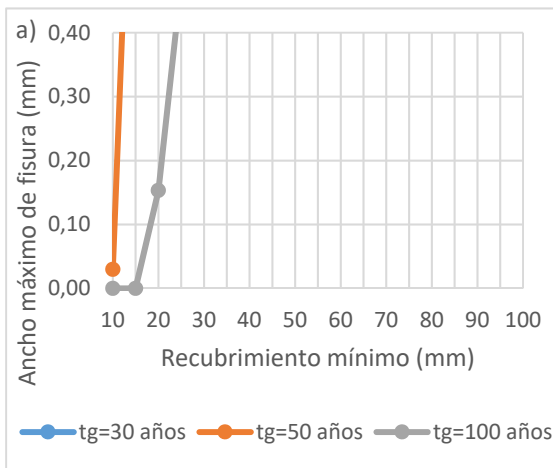


Figura 58 Recubrimiento mínimo necesario y ancho de fisura máximo para elementos de hormigón armado para diferentes vidas útiles en ambientes de exposición: a) XC1, b) XC4, c) XS2, d) XD3, e) XS3

- Hormigón pretensado parcial



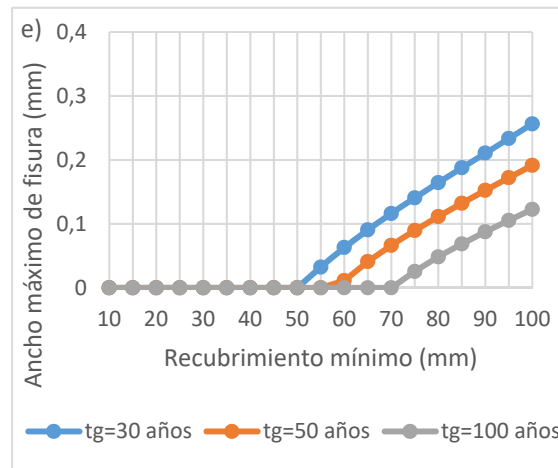


Figura 59 Recubrimiento mínimo necesario y ancho de fisura máximo para elementos de hormigón pretensado parcial para diferentes vidas útiles en ambientes de exposición: a) XC1, b) XC4, c) XS2, d) XD3, e) XS3

Por último, es necesario recalcar que para vigas de hormigón armado es posible el cálculo de una durabilidad que considere la interacción del recubrimiento con las características del hormigón y la fisuración. Esto no es posible en hormigón pretensado, ya que la armadura necesaria para cumplir con el Estado Límite Último hace que el ancho de fisura obtenido sea muy pequeño y, por lo tanto, que no se pueda optimizar para un recubrimiento mayor.

En conclusión, los códigos y normativas consideran que los criterios de durabilidad deben ser satisfechos en términos de ancho de fisura, recubrimiento del hormigón y cantidad de cemento. De este modo, un incremento severo de las condiciones de exposición implica anchos de fisura admisibles muy pequeños. Sin embargo, para conseguir un ancho de fisura más fino es necesario, aumentar la armadura o bien, reducir el recubrimiento. No obstante, esta reducción del recubrimiento conduce a un decrecimiento de la durabilidad debido a la disminución de la protección de las armaduras frente a la corrosión. Por este motivo, actualmente, la fisuración tiene una gran influencia en la comprobación de la durabilidad y limitar la fisura es fundamental. Sin embargo, estos parámetros interactúan entre sí, abriendo la posibilidad de un diseño optimizado para una vida útil no considerada en las normativas actuales, que pueden hacer que, aunque aparezcan microfisuras, la estructura siga teniendo la durabilidad adecuada para el tiempo para el que ha sido proyectado.

## CAPÍTULO 6: BILIOGRAFÍA

- ACI. (1984). Debate: Crack width, cover and corrosion.
- AENOR. Eurocódigo 2. Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. UNE-EN 1992-1-1 (2004).
- Audenaert, Katrien; De Schutter, Geert; Marsavina, Liviu; Boel, V. (2009). Influence of cracks and crack width on penetration depth of chlorides in concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 13(5), 561–572.  
<https://doi.org/10.1080/19648189.2009.9693134>
- Beeby, A. W. (1983). *Cracking, Cover, and Corrosion of Reinforcement. Concrete International* (Vol. 5). Retrieved from  
<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&i=15099>
- Calleja, J. (1966). *Materiales de Construcción, nº 124. Capítulo II. Corrosión de las armaduras en hormigones armados y pretensados* (Vol. 16).
- Comerón Graupera, L. X., & Diéguez Lorenzo, F. (n.d.). Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña. Retrieved from [www.itec.es](http://www.itec.es)
- Darmawan, M. S., & Stewart, M. G. (2007). Spatial time-dependent reliability analysis of corroding pretensioned prestressed concrete bridge girders. *Structural Safety*, 29(1), 16–31. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2005.11.002>
- Gestión de Estructuras. Juan Ramón Casas Rius. UPC. (n.d.). Tema 11. Deterioro del hormigón. Modelos.
- Gobierno de España. EHE-08 Normativa de hormigón estructural en España, 1 § (2008).  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Hartt, W. H. (2009). *Effect of Concrete Crack Width on Corrosion of Embedded Reinforcement*.
- International Federation for Structural Concrete Task Group 5.6. (2006). *Bulletin No. 34: Model Code for Service Life Design*.
- Kim, Y.-Y., Lee, B.-J., & Kwon, S.-J. (2014). Evaluation technique of chloride penetration using apparent diffusion coefficient and neural network algorithm. *Advances in Materials Science and Engineering, Article ID(647243)*, 13 pages.  
<https://doi.org/10.1155/2014/647243>
- Kwon, S. J., Na, U. J., Park, S. S., & Jung, S. H. (2009). Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion. *Structural Safety*, 31(1), 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2008.03.004>
- Otieno, M., Beushausen, H., & Alexander, M. (2012a). Prediction of corrosion rate in reinforced concrete structures - A critical review and preliminary results. *Materials*

*and Corrosion*, 63(9), 777–790. <https://doi.org/10.1002/maco.201106282>

- Otieno, M., Beushausen, H., & Alexander, M. (2012b). Towards incorporating the influence of cover cracking on steel corrosion in RC design codes: the concept of performance-based crack width limits. *Materials and Structures*, 0, 1805–1816. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9871-9>
- Poulsen, E. (1993). On a model of chloride ingress into concrete having time-dependent diffusion coefficient. *Chloride Penetration into Concrete Structures : Nordic Miniseminar*.
- Smilauer, V., Baquerizo, L., Matschei, T., Havlásek, P., Ricardo, W., da Silva, L., & Hájková, K. (2016). ConTemp – A virtual thermo-mechanical simulator for hydrating reinforced concrete blocks with extension to service life. In *International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering* (pp. 463–472).
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of Steel in Concrete*.
- West, J. S., Larosche, C. J., Koester, B. D., Breen, J. E., Kreger, M. E., & Substructures, P. B. (1999). State-of-the-Art Report about durability of post-tensioned bridge substructures.

## ANEJO I: GRÁFICOS DE OPTIMIZACIÓN. VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO (HA)

- Relación de carga  $Q_d/Q_{cuasi}=2.57$ , diámetro 16 mm.

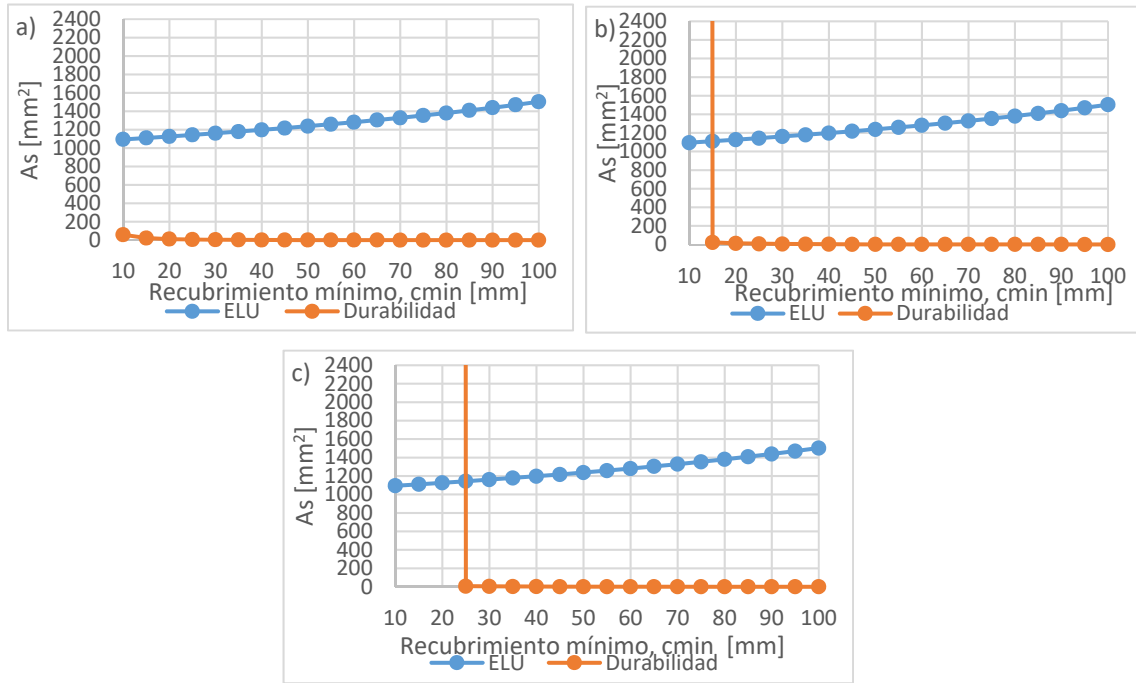


Figura 60 Curva de optimización HA para la relación de carga de 2,57; Ambiente XC1; resistencia  $f_{ck}=20$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.

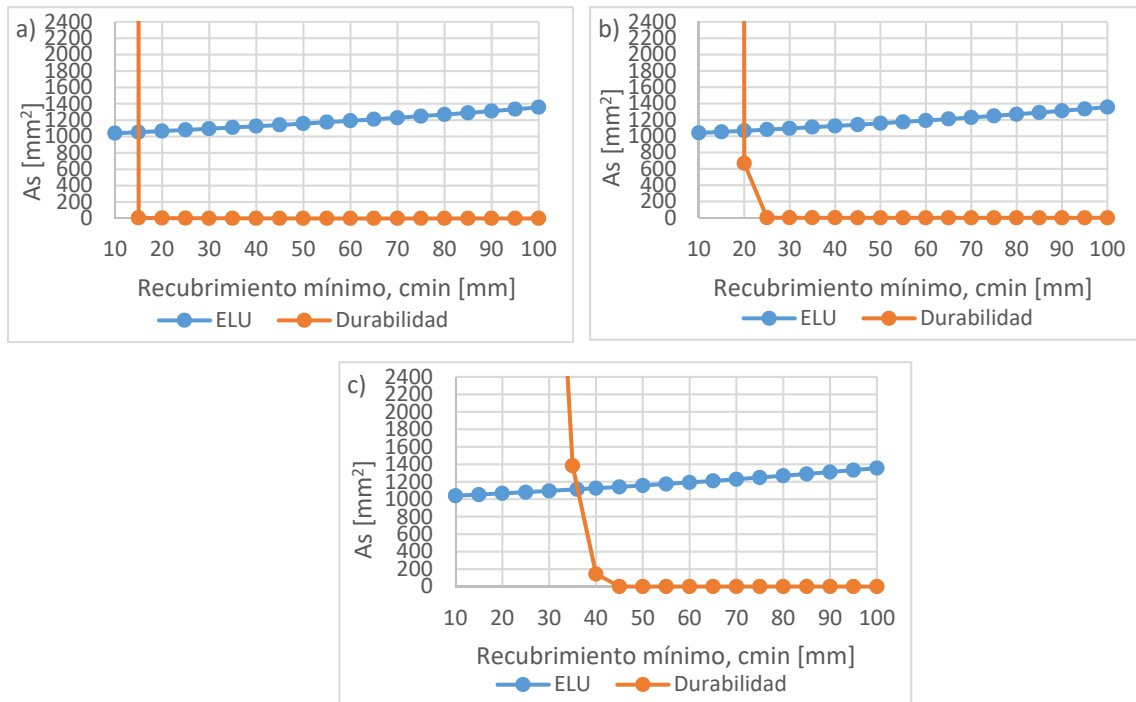


Figura 61 Curva de optimización HA para la relación de carga de 2,57; Ambiente XC4; resistencia  $f_{ck}=30$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.

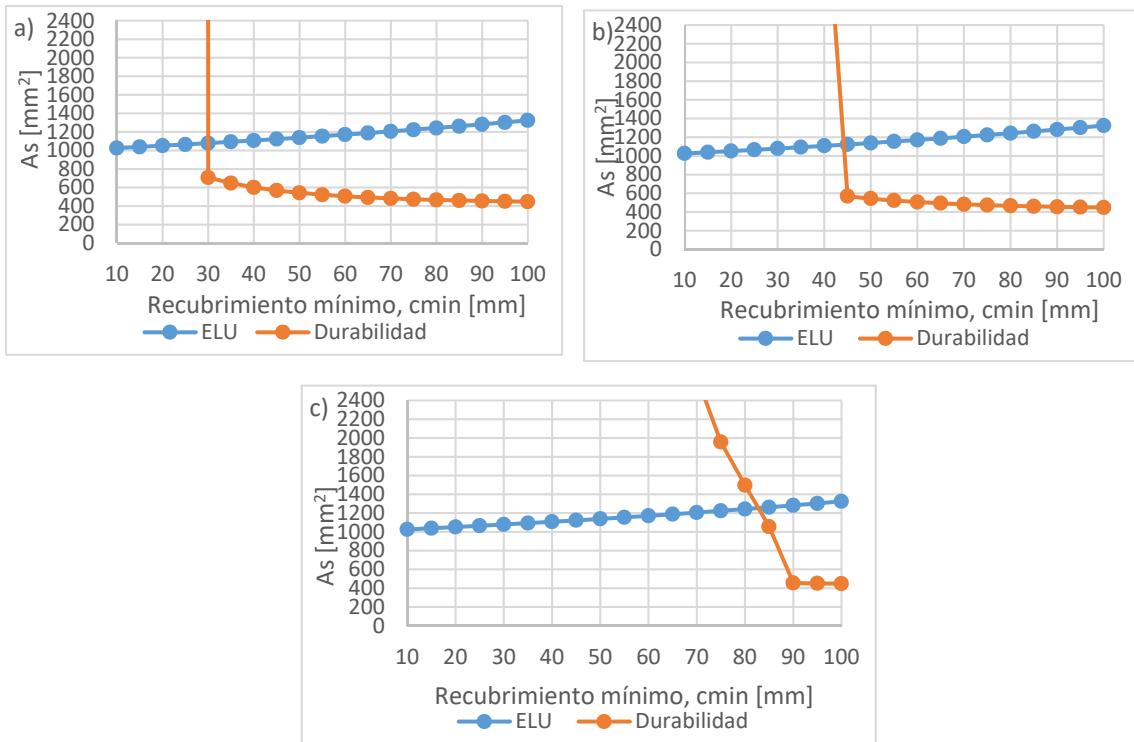


Figura 62 Curva de optimización HA para la relación de carga de 2,57; Ambiente XS2; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.

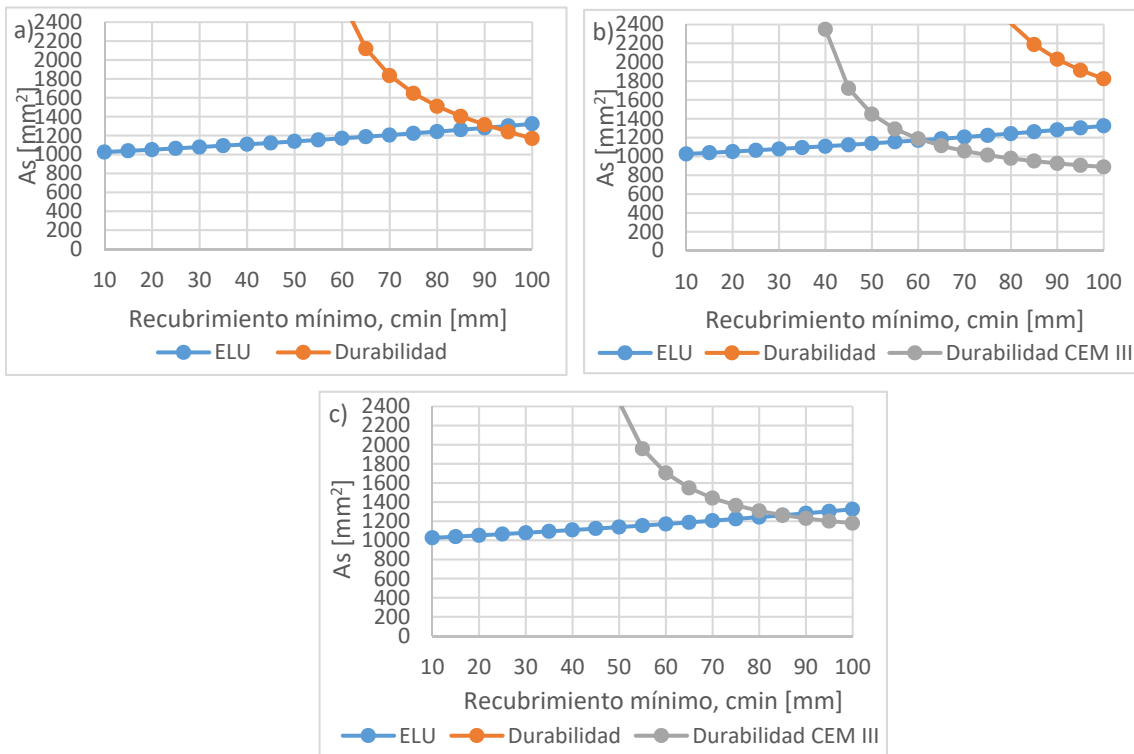


Figura 63 Curva de optimización HA para la relación de carga de 2,57; Ambiente XD3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.

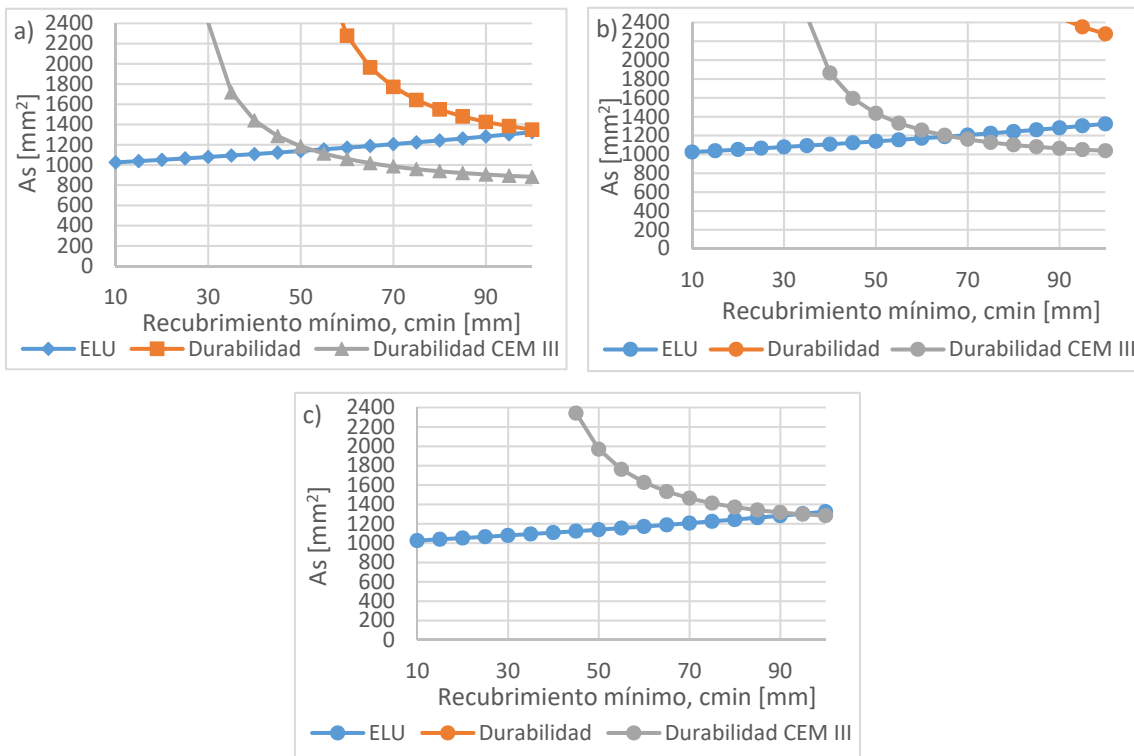


Figura 64 Curva de optimización HA para la relación de carga de 2,57; Ambiente XS3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.

- Relación de carga  $Q_d/Q_{cuasi}=2.37$ , diámetro 16 mm.

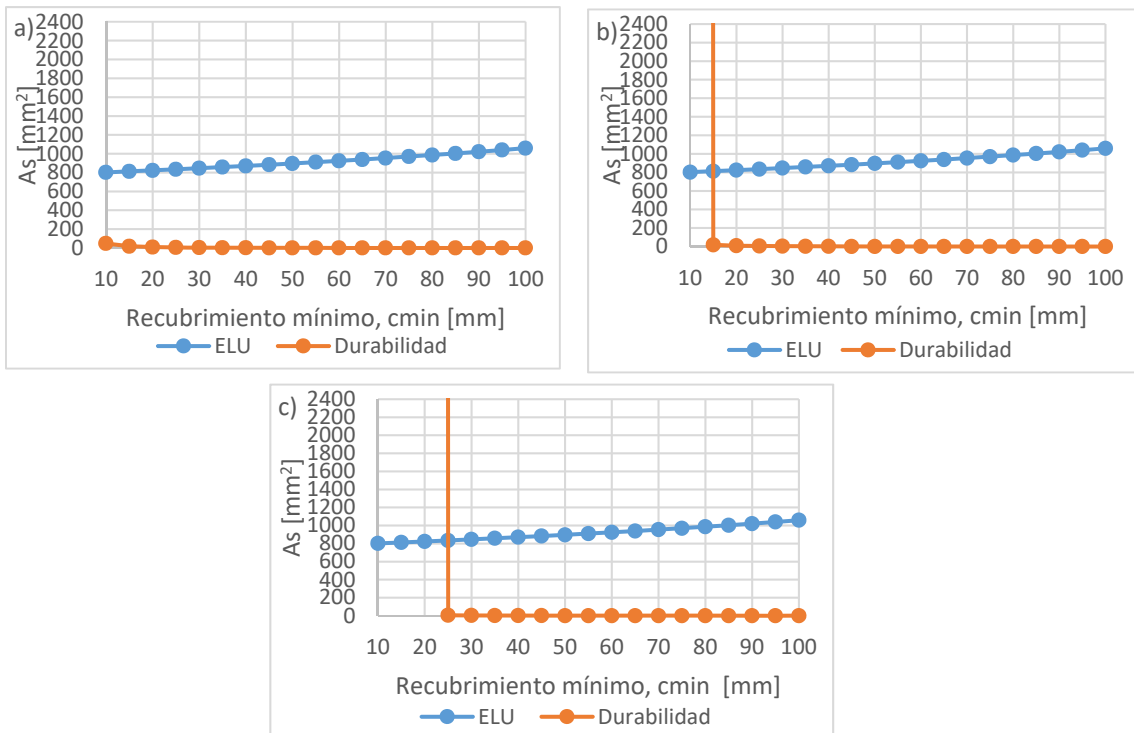


Figura 65 Curva de optimización HA para la relación de carga de 2,37; Ambiente XC1; resistencia  $f_{ck}=20$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.

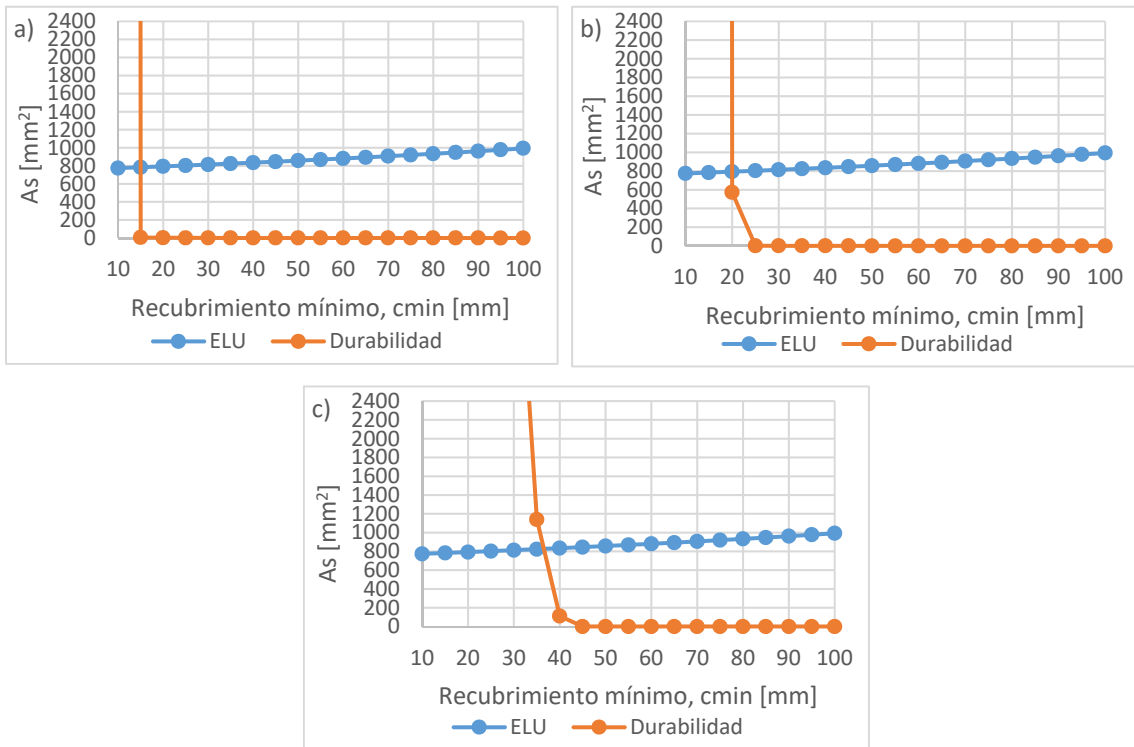


Figura 66 Curva de optimización HA para la relación de carga de 2,37; Ambiente XC4; resistencia  $f_{ck}=30$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.

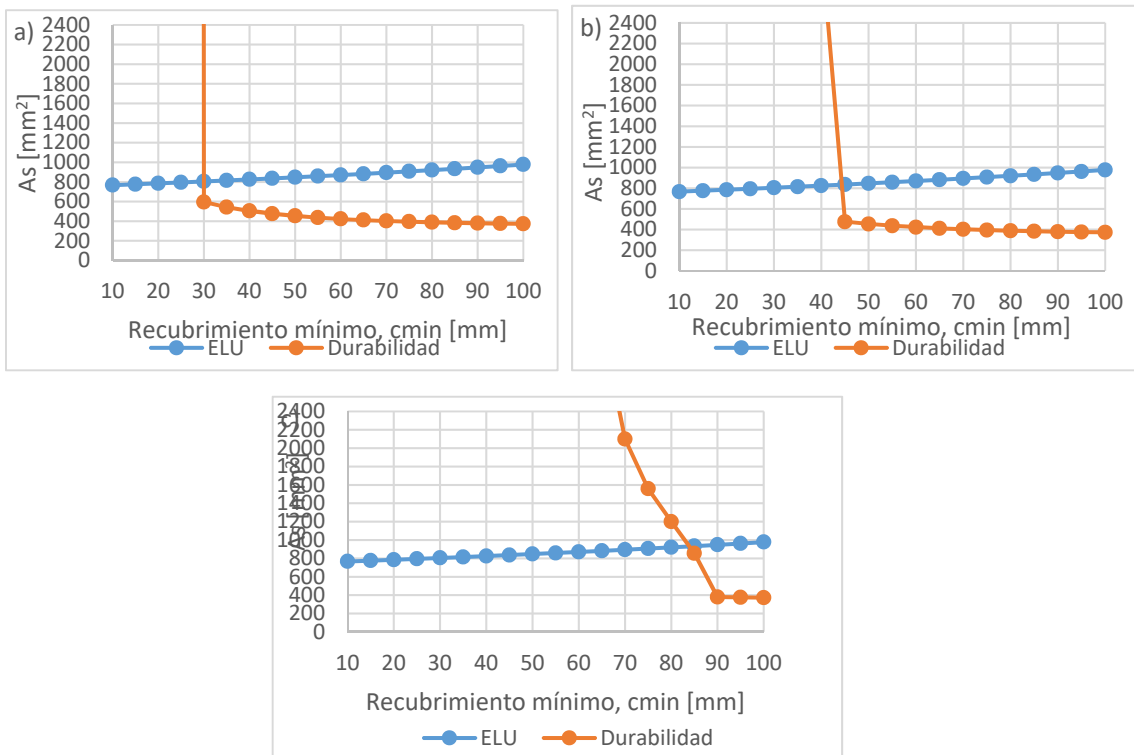


Figura 67 Curva de optimización HA para la relación de carga de 2,37; Ambiente XS2; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.



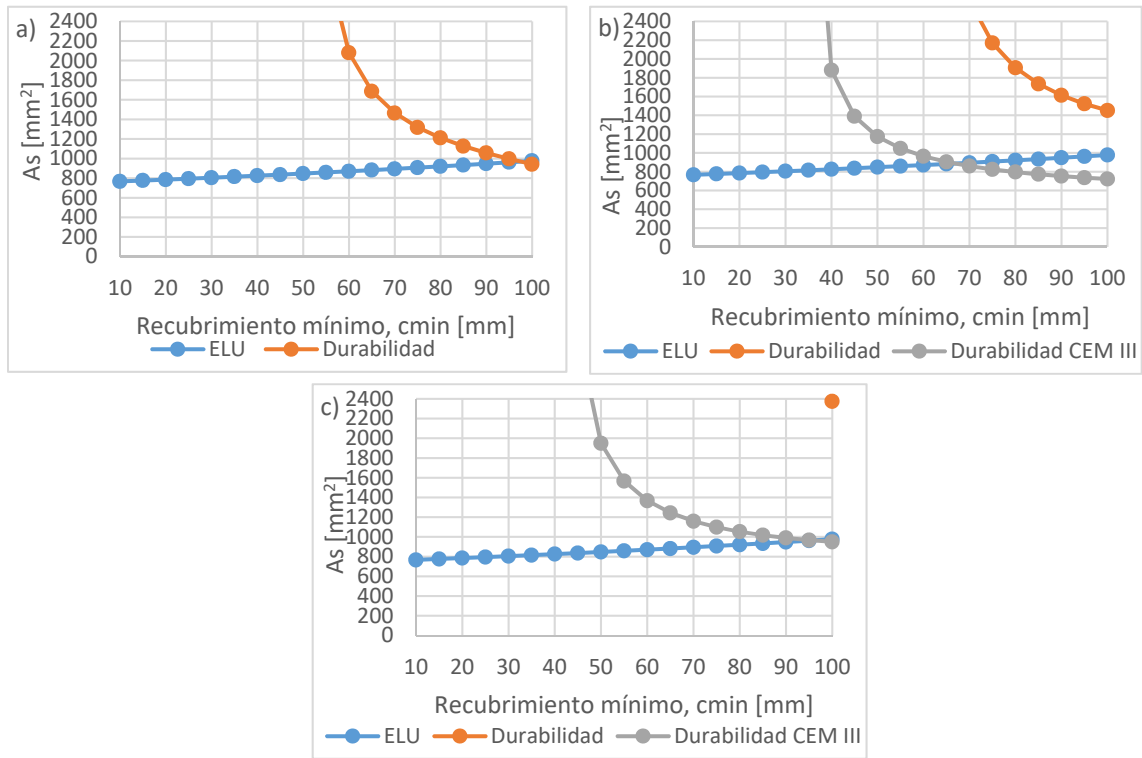


Figura 68 Curva de optimización HA para la relación de carga de 2,37; Ambiente XD3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.

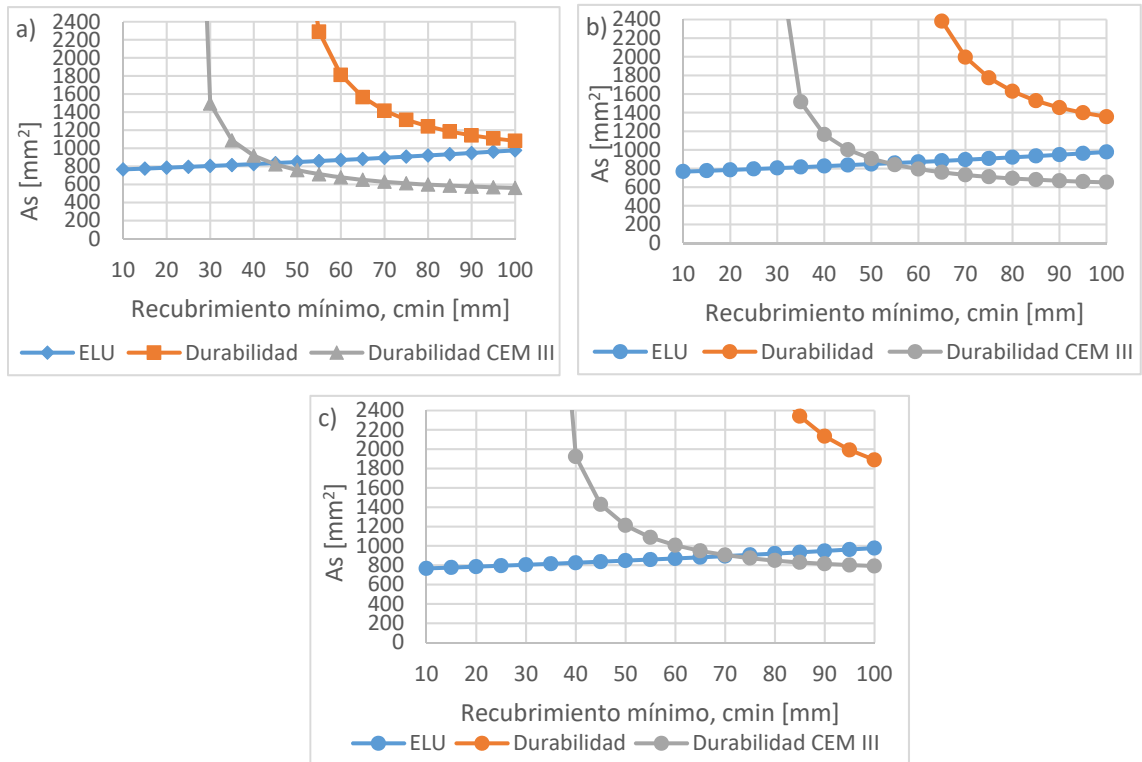


Figura 69 Curva de optimización HA para la relación de carga de 2,37; Ambiente XS3; resistencia  $f_{ck}=30$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.

- Relación de carga  $Q_d/Q_{cuasi}=1.96$ , diámetro 16 mm.

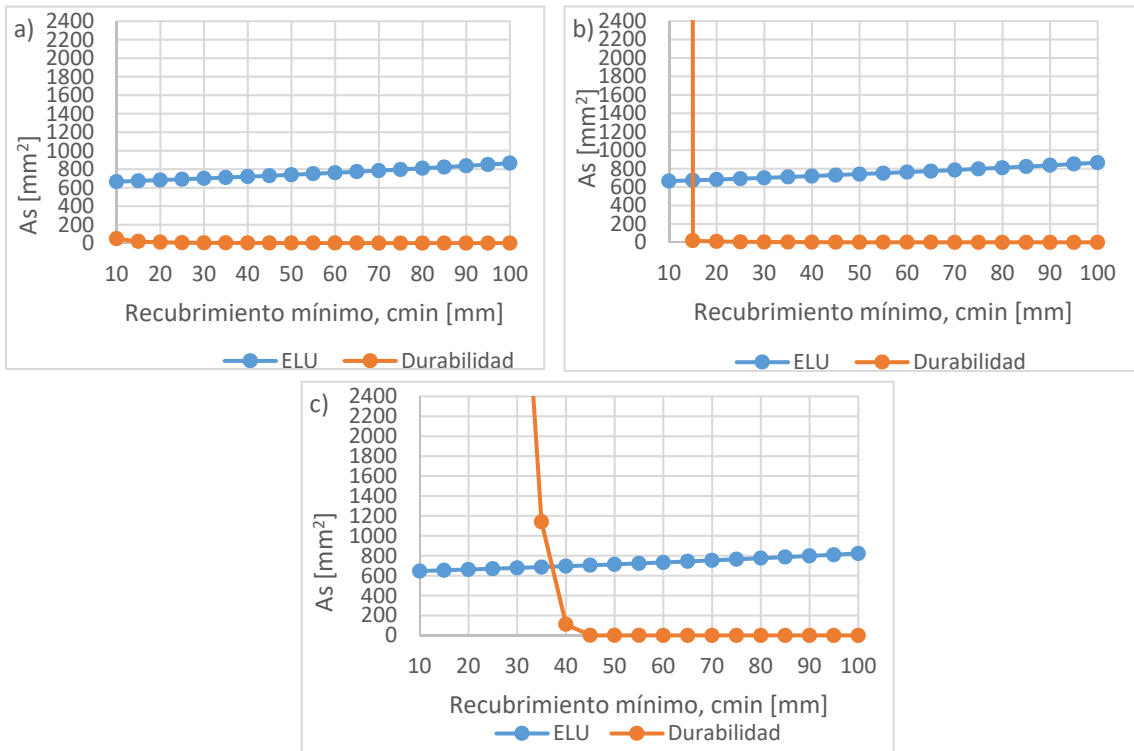


Figura 70 Curva de optimización HA para la relación de carga de 1,96; Ambiente XC1; resistencia  $f_{ck}=20$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.

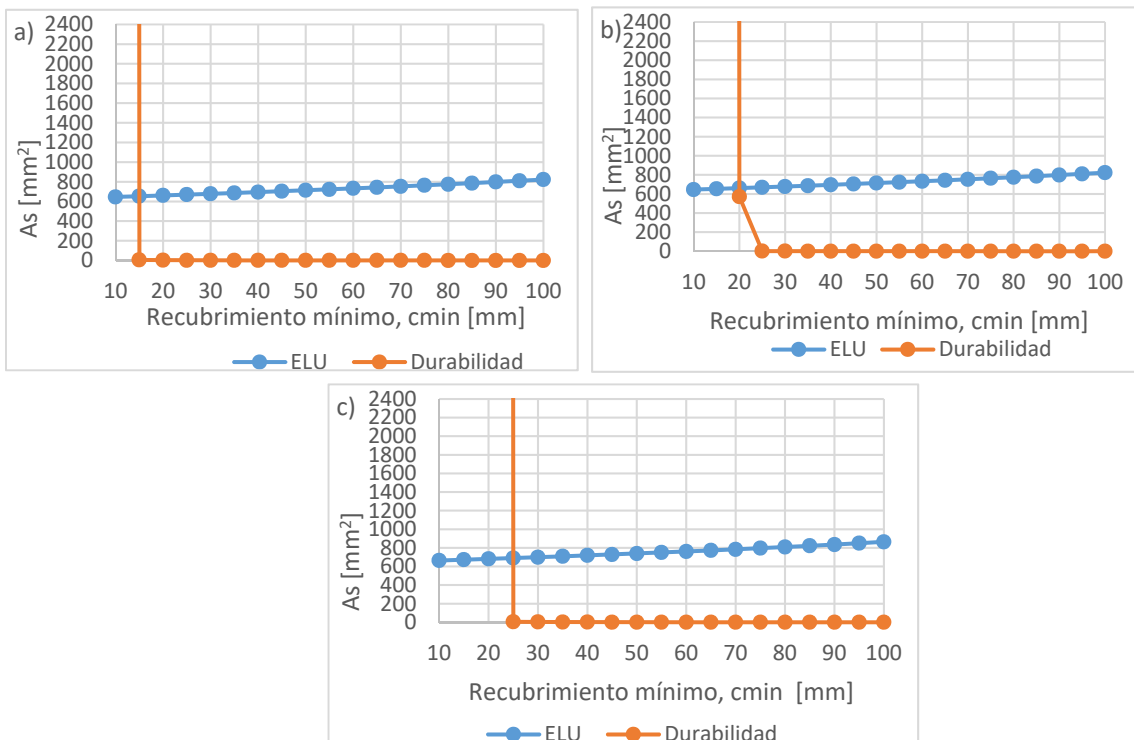


Figura 71 Curva de optimización HA para la relación de carga de 1,96; Ambiente XC4; resistencia  $f_{ck}=30$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.

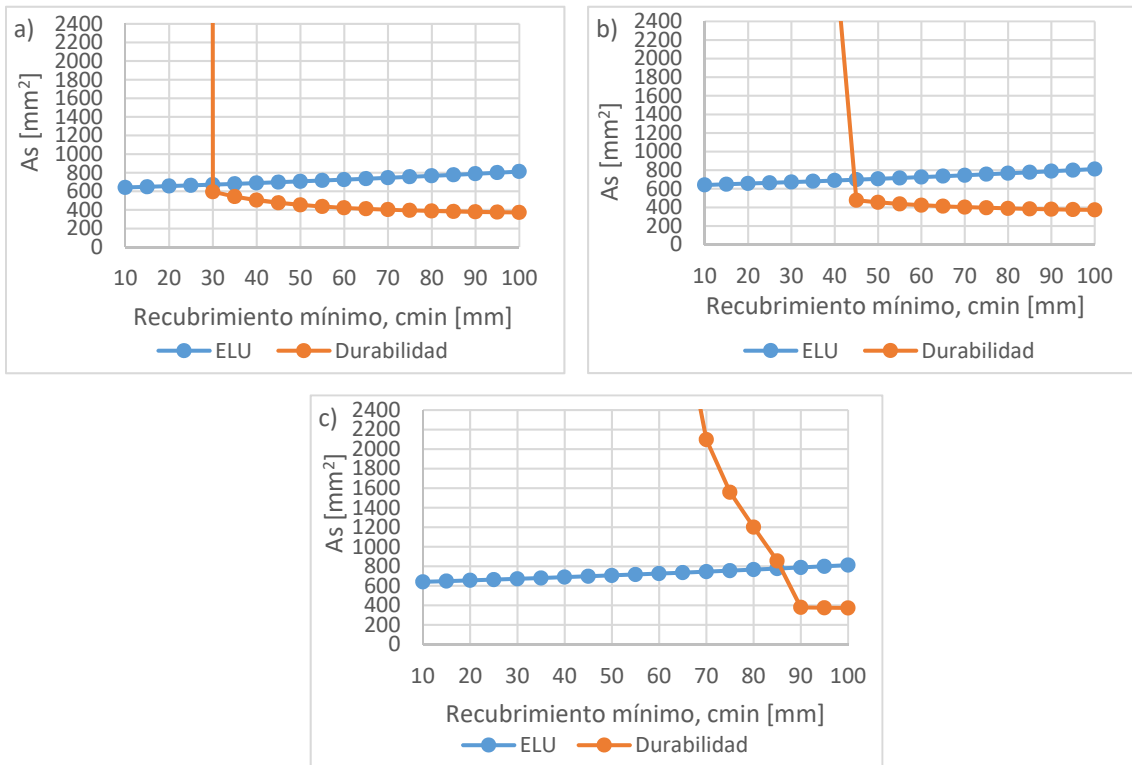


Figura 72 Curva de optimización HA para la relación de carga de 1,96; Ambiente XS2; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.

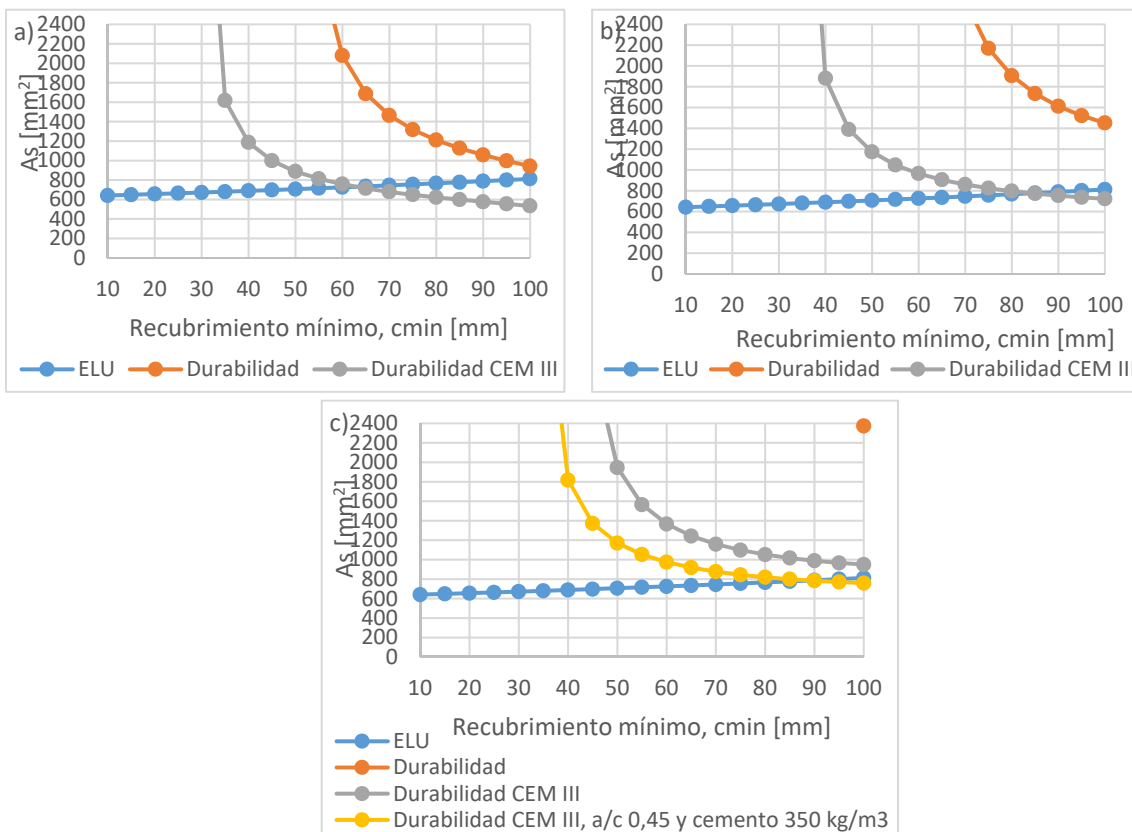


Figura 73 Curva de optimización HA para la relación de carga de 1,96; Ambiente XD3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.

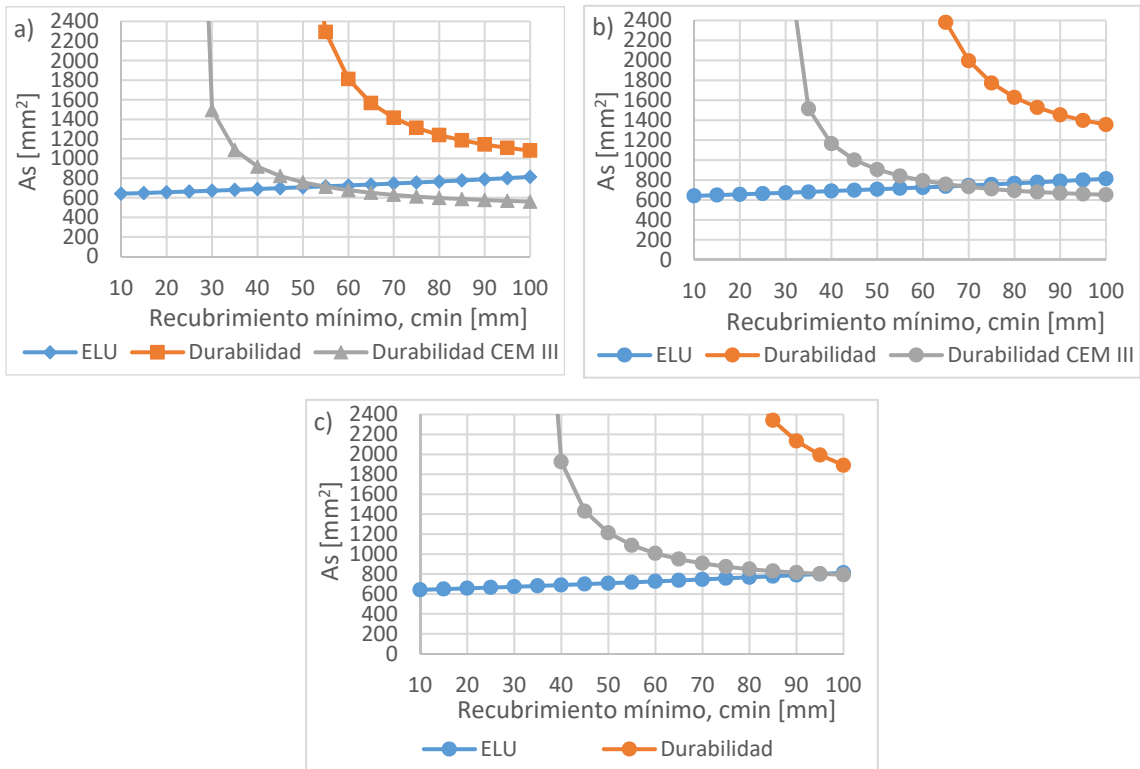


Figura 74 Curva de optimización HA para la relación de carga de 1,96; Ambiente XS3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 año

## ANEJO II: GRÁFICOS DE OPTIMIZACIÓN. VIGAS DE HORMIGÓN PRETENSADO PARCIAL (HPP)

- Relación de carga  $Q_d/Q_{cuasi}=2.57$ , diámetro 16 mm.

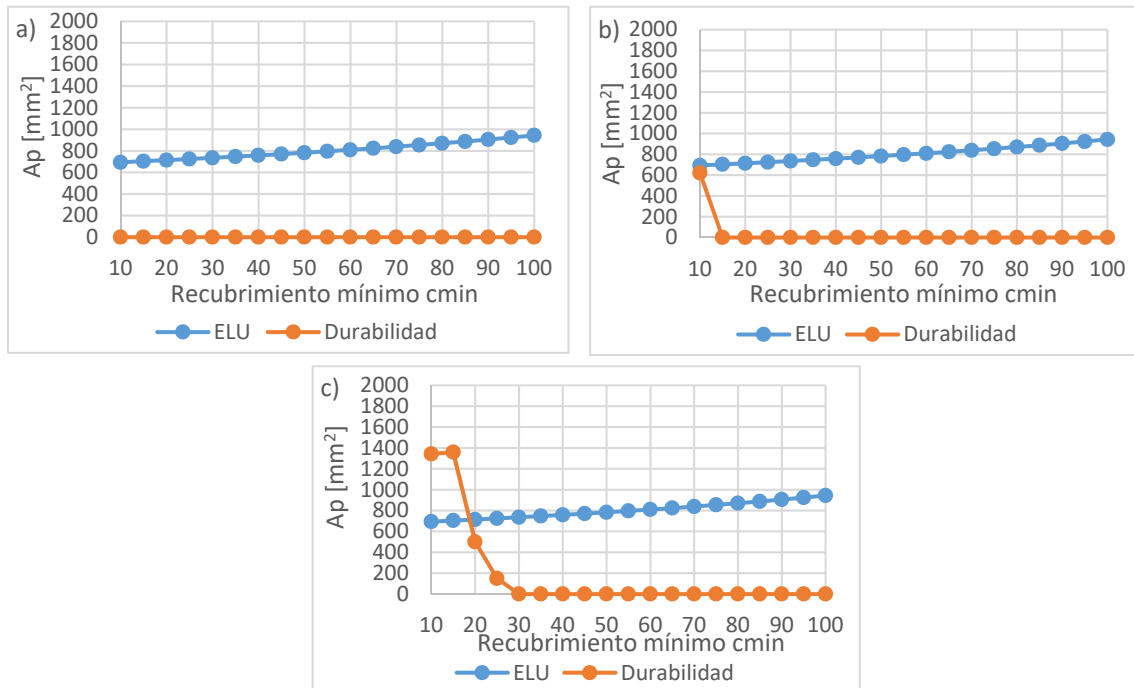


Figura 75 Curva de optimización HPP para la relación de carga 2,57; Ambiente XC1; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años.

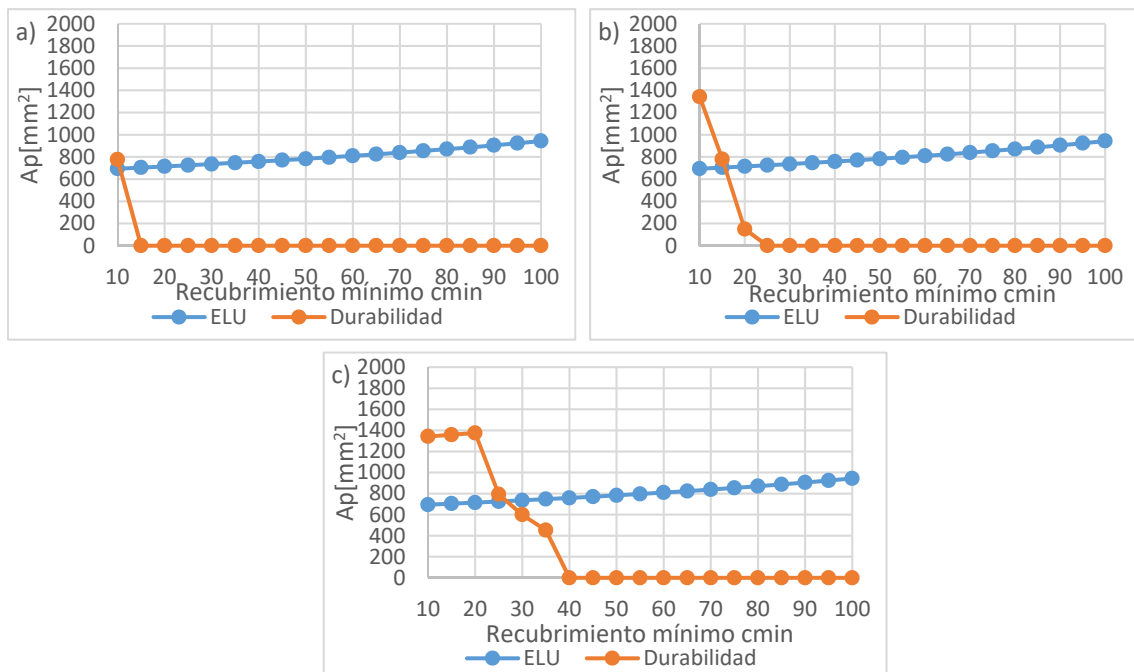


Figura 76 Curva de optimización HPP para la relación de carga 2,57; Ambiente XC4; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años

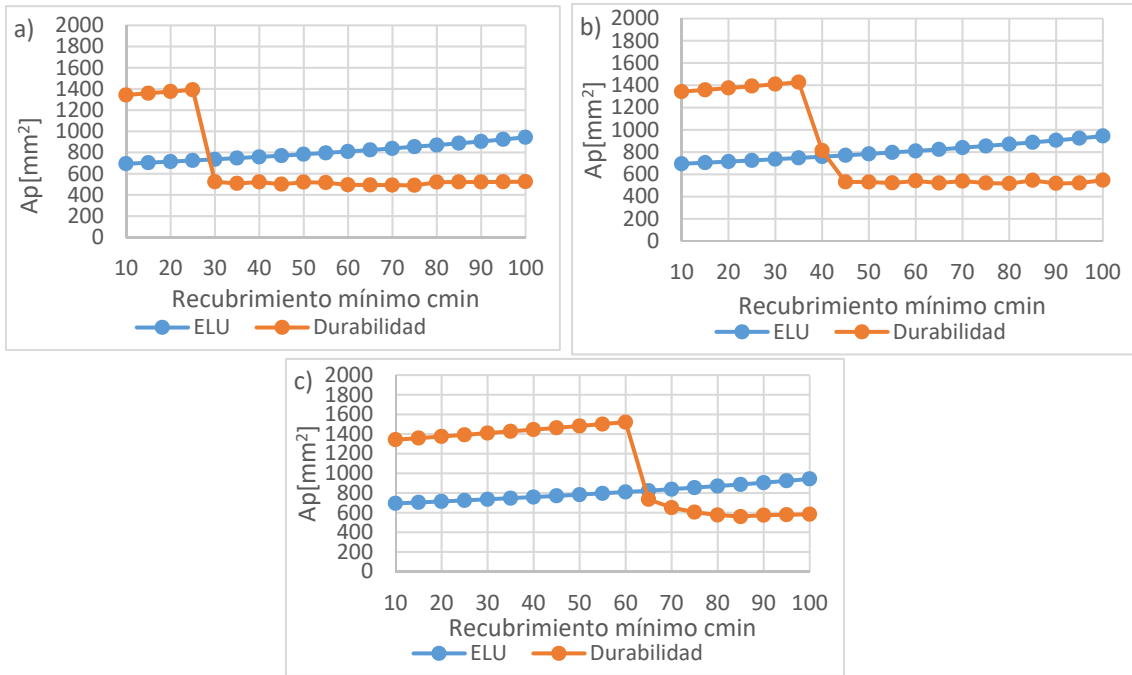


Figura 77 Curva de optimización HPP para la relación de carga 2,57; Ambiente XS2; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años

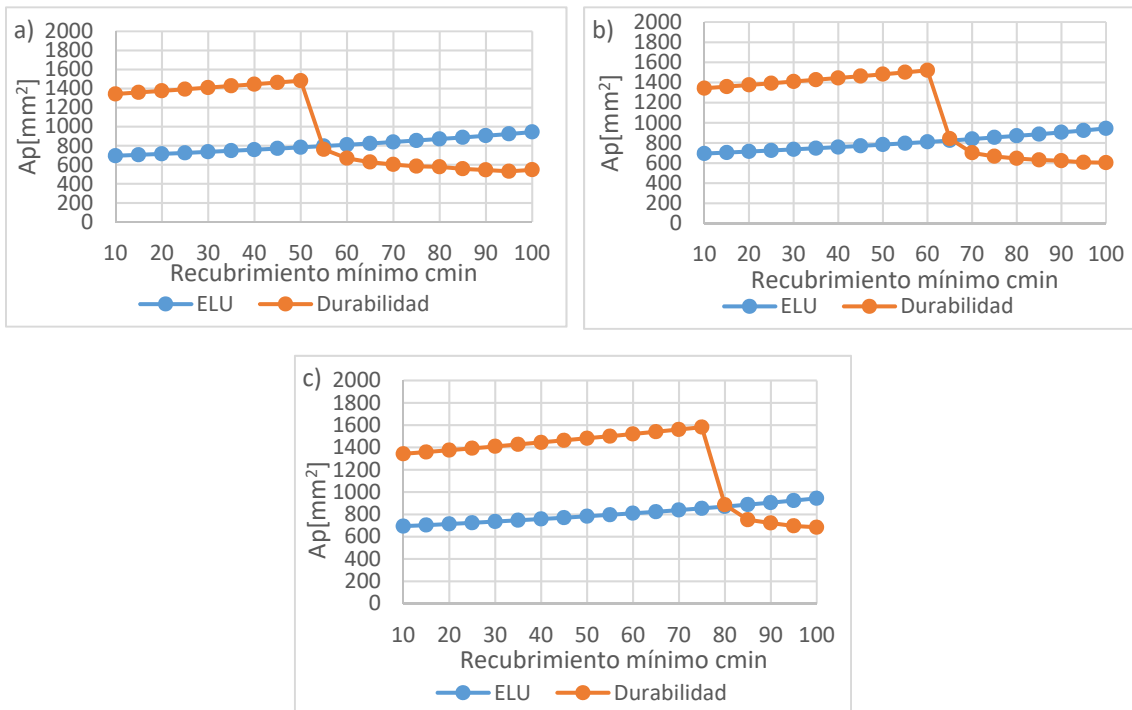


Figura 78 Curva de optimización HPP para la relación de carga 2,57; Ambiente XD3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años

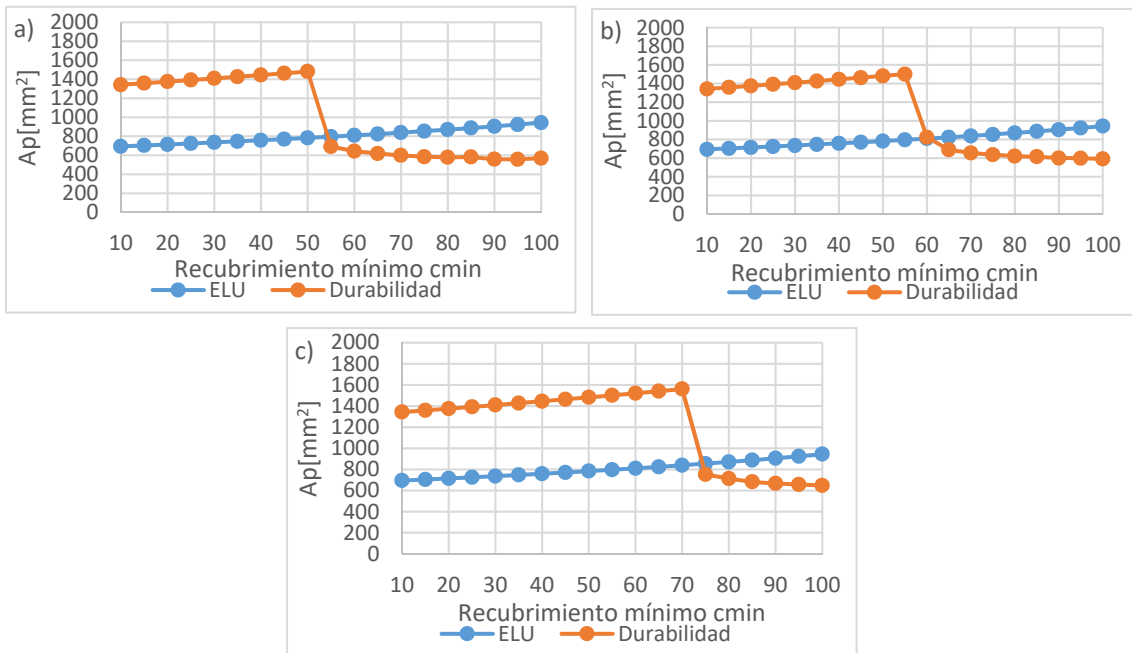


Figura 79 Curva de optimización HPP para la relación de carga 2,57; Ambiente XS3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años

- Relación de carga  $Q_d/Q_{cuasi}=2.37$ , diámetro 16 mm.

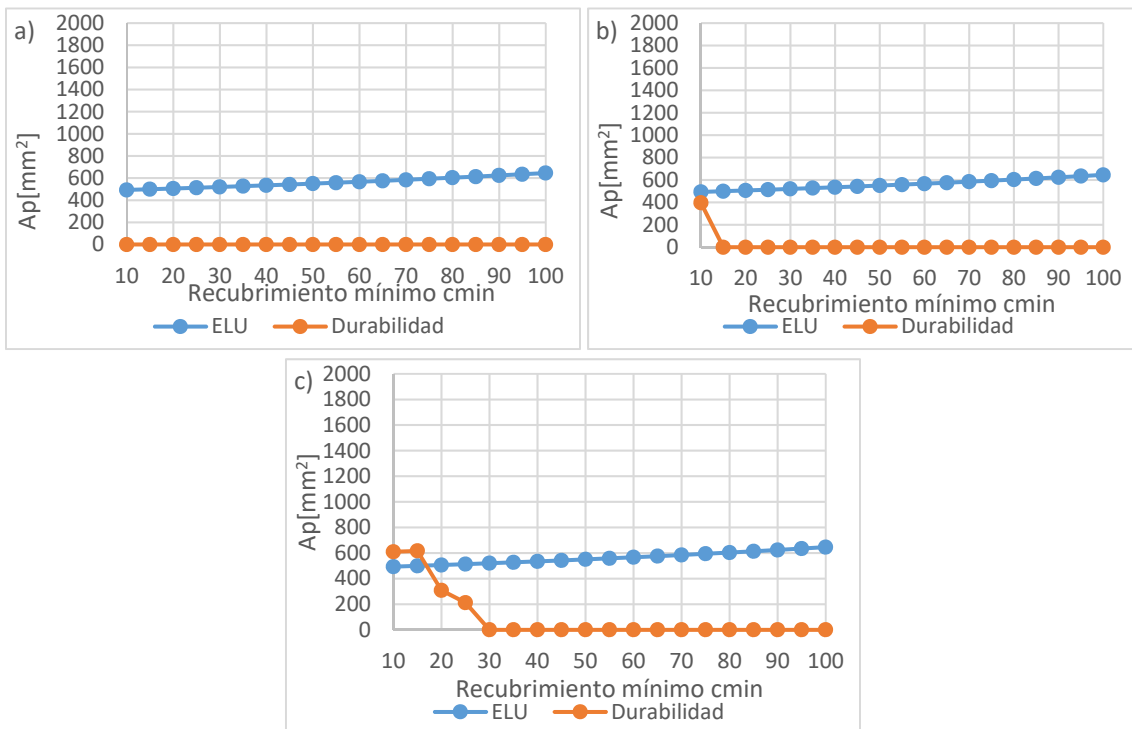


Figura 80 Curva de optimización HPP para la relación de carga 2,37; Ambiente XC1; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años

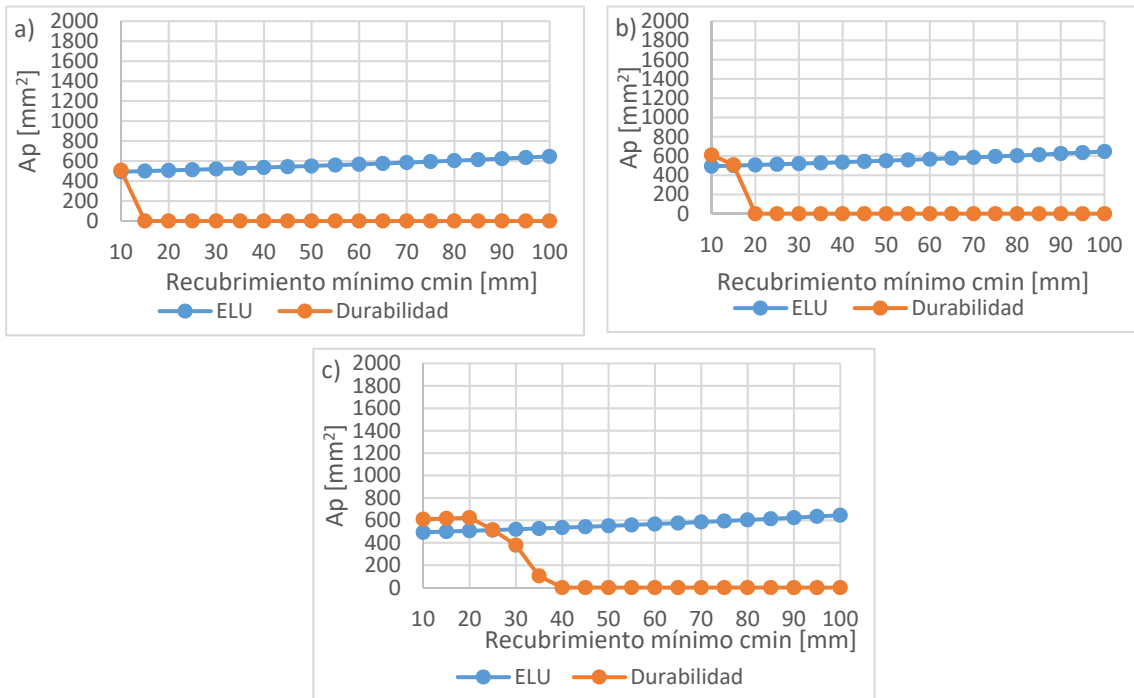


Figura 81 Curva de optimización HPP para la relación de carga 2,37; Ambiente XC4; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años

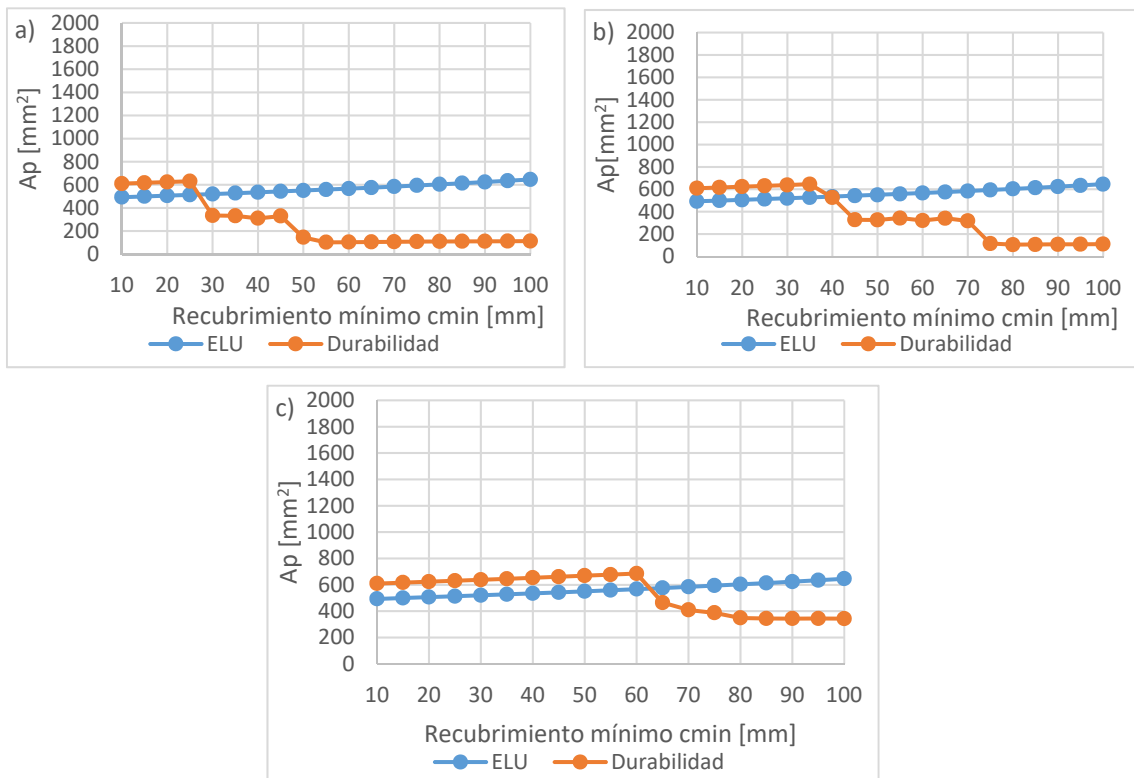


Figura 82 Curva de optimización HPP para la relación de carga 2,37; Ambiente XS2; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años



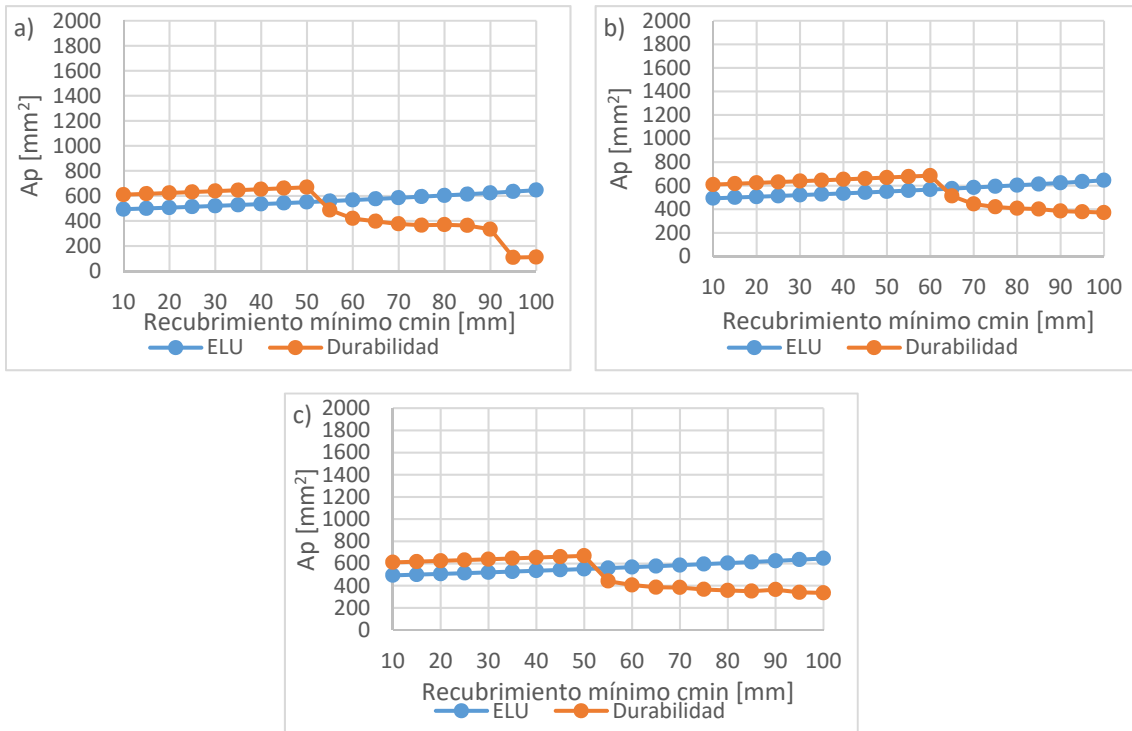


Figura 83 Curva de optimización HPP para la relación de carga 2,37; Ambiente XD3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años

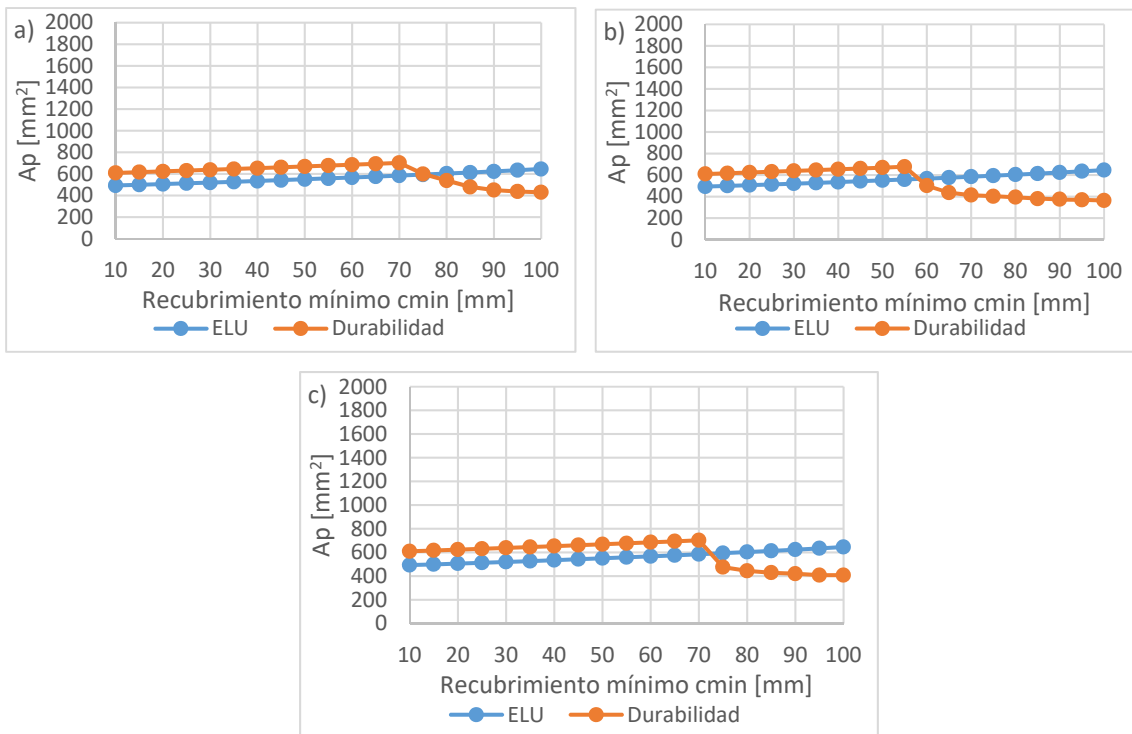


Figura 84 Curva de optimización HPP para la relación de carga 2,37; Ambiente XD3; resistencia  $f_{ck}=35$  MPa y diámetro 16 mm para una vida útil de: a)30 años; b)50 años; c)100 años