

Estudio de la vida útil de las vigas de hormigón del tablero de un puente sobre el mar

Study of service life of concrete girder bridge on the sea

T. J. DA SILVA*, A. M. GOMES**

*Universidad Federal de Uberlândia. Facultad de Ingeniería Civil, Uberlândia, Minas Gerais

**Universidad Federal de Minas Gerais, Escuela de Ingeniería, Belo Horizonte, Minas Gerais

Fecha de recepción: 15-XII-02

Fecha de aceptación: 15-III-03

BRASIL

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es presentar el estudio de la evolución de la probabilidad de fallo de las vigas de hormigón posibilitando estimar la vida útil de un puente sobre el mar en la región sureste de Brasil. El mecanismo de deterioro analizado en el estudio ha sido la corrosión de las armaduras. Los modelos utilizados para ello están relacionados con la carbonatación y penetración de cloruros. Se han realizado diferentes ensayos para la caracterización de las principales variables empleadas en los cálculos y en los mecanismos de deterioro. Las informaciones han sido completadas con los datos de control obtenidos durante la construcción. Mediante simulación se obtuvieron las funciones de densidad conjunta de las variables. Se usa el método FORM para estimar la probabilidad de fallo. Adoptándose una probabilidad de fallo de 10^{-3} para la fisuración debido a los productos de corrosión, los valores obtenidos para las vidas útiles para las 25 vigas analizadas están en un rango de 25 hasta 70 años.

SUMMARY

The objective of this paper is to study the evolution of the failure probability of the concrete beams to estimate the service life of a sea bridge in the southeast region of Brazil. The mechanism of deterioration analyzed in the study was the corrosion of the reinforcing bars. The models utilized for that are related with the carbonation and penetration of chlorides. Tests have been carried out for the characterization of the main variables used in the calculations and in the deterioration models. The information was completed with the control data obtained during the construction. It was obtained the functions of conjoined density of the variables through simulation. The method FORM was used to estimate the failure probability. For an adopted failure probability of 10^{-3} for cracking due the corrosion products, the obtained values for the service lives for the 25 analyzed beams were in a range of 25 up to 70 years.

PALABRAS CLAVE: vida útil, corrosión, puentes de hormigón, fiabilidad estructural, fisuración.

KEYWORDS: service life, corrosion, concrete bridges, structural reliability, cracking.

1. INTRODUCCIÓN

La vida útil de las estructuras de hormigón ha sido estudiada por muchos investigadores. En general, hay que elegir un criterio y definir la función de estado límite para la propiedad de control elegida. Además del

1. INTRODUCTION

Many researchers have studied the service life of concrete structures. In general it is necessary to choose an approach and to define the state limit function for the elected control property. Besides the deterioration

deterioro debido a la acción natural de la estructura, la corrosión de las armaduras es el más importante mecanismo de deterioro y refleja en gran parte el tema de vida útil para las estructuras de hormigón.

Basándose en lo anteriormente comentado, se ha hecho el estudio de la vida útil de las vigas principales del tablero de un puente sobre el mar en la región sureste de Brasil en la ciudad de Vitoria. El puente ha sido construido en los años 80 y tiene 3.339 metros de largo, está constituida por tres tipos. En la primera parte, que está junto al continente, la estructura es compuesta de pilares y tablero con vigas principales de aproximadamente 36 metros de luz. La segunda parte, ya sobre el mar, ha sido ejecutada en sección cajón en voladizos sucesivos. La parte central ha sido en estructura metálica. El puente contiene 54 pilares en tierra y 7 sobre el mar. Una vista del puente y la geometría del tablero se presentan en la Figura 1.

En este trabajo se presenta el estudio relacionado con la fisuración producida por los productos de corrosión de ocho vigas pretensadas del vano de la primera parte del puente localizado entre los ejes N17 y N18. Además de la fisuración, también se ha hecho una simulación de la pérdida de capacidad portante a la flexión.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para la realización del trabajo se ha adaptado el método de predicción de vida útil desarrollado inicialmente para forjados (1). El método es probabilista por tanto necesita que las variables sean definidas estadísticamente. Para esto se ha realizado la inspección con técnicas no destructivas y una campaña para obtener datos ambientales y datos de control llevados a

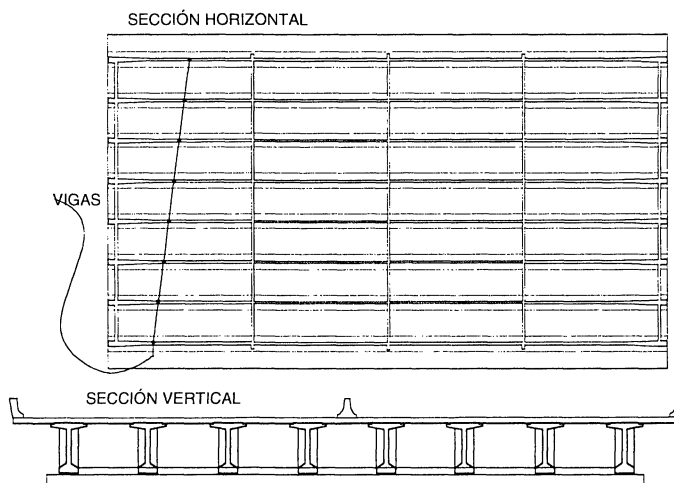
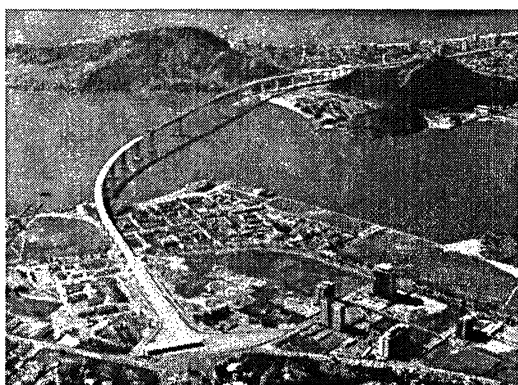


Figura 1.- Vista del puente y geometría del tablero.

Figure 1.- Bridge's view and span geometry characteristics.

due to the natural action of the structure, the corrosion of the steel is the most important mechanism of deterioration and it largely reflects the service life topic to concrete structures.

Based on the previously stated, it was made the service life study of the main beams of a bridge over the sea in the city of Vitoria, southeastern of Brazil. The bridge was built in the 80's and is 3.339 meters long, constituted of three parts. The first part, in the continent, the structure is made up of columns and T-beams of approximately 36 meters of span. The second part, in the sea, was executed in box-girder section by the cantilever balance. The central part was made in metallic structure. The bridge contains 54 columns in land and 7 in the sea. A view of the bridge and the geometry of the span are presented in the Figure 1.

This work presents the study related with the cracking which took place by the corrosion products of eight prestressed beams of the span of the bridge's first part located between the axes N17 and N18. Besides the cracking, it was made a simulation of the loss of resistance to bending moments.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

In order to do the study, it was adapted the method of service life prediction developed initially to one-way slabs (1). The method is probabilistic; therefore it needs the variables to be defined statistically. For this, it has been carried out the inspection with non-destructive techniques and a campaign to obtain environmental and control data carried out during the

cabo durante la construcción del puente. Las variables empleadas en los modelos que simulan los procesos de deterioro son, en este caso, el avance del frente de carbonatación, la penetración de los cloruros y la tasa de corrosión de las armaduras.

2.1. Método para la predicción de la vida útil

El método se basa en la aplicación del análisis estocástico partiendo de modelos deterministas de predicción de, por un lado, la profundidad de carbonatación y el perfil de penetración de cloruros y, por otro lado, la velocidad de corrosión de las armaduras (1). Las principales variables, tanto ambientales como mecánicas, que participan en los modelos de deterioro, de cálculo estructural y de solicitaciones, son tratadas como variables aleatorias. Utilizando los modelos se aplica la técnica de simulación numérica de MonteCarlo al efecto de obtener los estadísticos que definen las funciones de distribución de las variables que serán empleadas en el cálculo de la probabilidad de fallo.

De acuerdo con el método, la vida útil del elemento analizado se define mediante un estado límite de daño. En este trabajo se presentará, como aspectos determinantes de la vida útil, la fisuración producida por los productos de la corrosión y la simulación para el agotamiento de la resistencia a la flexión. Los dos estados son definidos a través de una relación de la probabilidad de fallo en función del tiempo, estableciendo una probabilidad de fallo aceptable. El desarrollo que se presenta a continuación es solamente para la fisuración producida por los productos de la corrosión. La formulación referente al agotamiento de la resistencia a la flexión puede ser encontrada en otras publicaciones del mismo autor (1).

Con el empleo del FORM (First Order Reliability Method), la probabilidad de fallo P_{fi} es estimada para el período de tiempo « p_i » definido de forma progresiva (2). Para el estado límite de utilización, la condición adoptada ha sido la fisuración producida por la corrosión. Los modelos empleados para ello tienen como finalidad estimar el volumen de productos de corrosión que produce fisuración (VMACOR) y el volumen de corrosión acumulado (VCORT) por intervalo de tiempo.

$$P_{fi} = P[(VMACOR(t) - VCORT \leq 0); t \leq t_i] \quad [1]$$

Con la probabilidad de fallo aceptable para el caso en estudio, se estima el tiempo que la fisuración se manifiesta y para el agotamiento de la resistencia a la flexión el tiempo en que el elemento estructural alcanza una capacidad resistente a flexión inaceptable, es decir, el tiempo de vida útil según los dos criterios.

construction of the bridge. The variables are used in the models that simulate the processes of deterioration, in this case, the carbonation front, the chloride penetration and the corrosion rate of the steel.

2.1. Method for service life prediction

The method is based on the application of the stochastic analysis leaving from deterministic models of prediction of the carbonation depth and the profile of chloride penetration in one hand and, on the other hand, the corrosion intensity of the reinforcement (1). The main environmental and mechanical variables that participate in the deterioration models of structural calculations and solicitations are treated as random variables. Using the models the MonteCarlo numeric simulation technique is applied to the effect of obtaining the statistical ones that define the distribution functions of the variables that will be used to calculate the failure probability.

In accordance with the method, the service life of the analyzed element is defined by a limit state of damage. The development here presented is only for the cracking placed by the corrosion products. The formulation with respect for the loss of resistance to bending moments can be found in the same author's publications (1). This work presents, as decisive aspects of the service life, the cracking placed by the corrosion products and the simulation for the loss of resistance to bending moments. The two states are defined through a failure probability as a function of time relation, establishing an acceptable failure probability.

With the use of FORM (First Order Reliability Method) (2), the failure probability P_{fi} is adopted for the period of time « p_i » defined by a progressive way. For the serviceability limit state, the adopted condition was the cracking placed by the corrosion. The models applied in it are made to estimate the corrosion products that produce cracking (VMACOR) and the cumulative volume of corrosion (VCORT) for interval of time.

With the acceptable probability of failure for the case in study, it is considered the time for which the cracking is present and the time for which the structural element reaches an unacceptable resistance to bending moments, that is to say, the time of service life according to the two approaches.

2.2. Modelos para la corrosión de armaduras

En el método propuesto, diversos modelos matemáticos son analizados y se adopta el que mejor se ajusta al caso estudiado. Para la elección del modelo se ha hecho el cálculo de la profundidad de carbonatación y penetración de cloruros estimada por los modelos y han sido comparados con los valores reales medidos en la estructura eligiéndose el que más se ha aproximado. Así, considerándose que las condiciones ambientales y el medio agresivo no sufrirán cambios importantes en el futuro, es posible admitir que los modelos seguirán representando los procesos de deterioro. En este trabajo, los modelos adoptados estiman la tasa de corrosión relacionada con despasivación por carbonatación o cloruros y han sido desarrollados a partir de resultados de experimentos realizados en probetas de acero embebidas en hormigón y sometidas a carbonatación o cloruros bajo diversas condiciones ambientales (3).

Tasa de corrosión

Para la carbonatación, la ecuación que ha resultado es:

$$Q_1 = 21,84 - 1,35X_1 - 35,43X_2 - 234,76X_3 + 2,33X_4 + 4,42X_5 + 250,55X_6 \quad [2]$$

donde:

Q_1 = tasa de corrosión (10^{-4} g / cm^2 / año);
 X_1 = temperatura ($^{\circ}C$); X_2 = humedad relativa (% / 100); X_3 = concentración de oxígeno (%/100);
 $X_4 = X_1 \times X_2$ (interacción entre X_1 y X_2); $X_5 = X_1 \times X_3$ (entre X_1 y X_3) y $X_6 = X_2 \times X_3$ (entre X_2 y X_3)

Para el ataque por cloruros, la tasa de corrosión puede ser obtenida mediante la ecuación definida para condiciones ambientales estándar de 15 $^{\circ}C$ de temperatura, un 69% de humedad relativa y un 20% de concentración de oxígeno en la atmósfera:

$$Q_2 = (-0,51 - 7,60 N + 44,97W^2 + 67,95 N W^2) d/c^2 \quad [3]$$

donde:

Q_2 = tasa de corrosión (10^{-4} g / cm^2 / año); N = cantidad de Cl^- representada por el $NaCl$ por peso de agua de amasado (%); W = relación agua/cemento (%/100); d = diámetro de la armadura (mm) y c = recubrimiento (mm)

La tasa de corrosión en una condición en particular se determina a partir de la ecuación 3 ajustada para las condiciones ambientales existentes. El ajuste se hace mediante un factor de conversión determinado por los valores de q_3' y q_3'' obtenidos a partir de la ecuación 4. Para el cálculo de q_3' se utilizan las condiciones ambientales existentes, mientras que en el cálculo de q_3'' se emplea la condición estándar y el contenido existente de cloruros.

2.2. Models for the corrosion of steel in concrete

In the proposed method, several mathematical models were analyzed and adopted the best one adjusted to the studied case. For the selection of the model it has been determined by the models the carbonation depth and the penetration of chlorides and the results have been compared with the actual values measured in the structure adopting the one with the best fit. In this way, considering that the environment and aggressive conditions will not have main changes in the future, it is possible to admit that the models will continue representing the processes of deterioration. In this work, the adopted models estimate the rate of corrosion related with carbonation or chlorides process. They were developed from results of experiments with cores of steel in concrete and subjected to carbonation or chlorides under several environmental conditions (3).

Rate of corrosion

For the carbonation, the proposed equation is:

where:

Q_1 = rate of corrosion ($\times 10^{-4}$ g / cm^2 / year);
 X_1 = temperature ($^{\circ}C$); X_2 = relative humidity (% / 100);
 X_3 = oxygen concentration (% / 100); $X_4 = X_1 \times X_2$ (interaction between X_1 and X_2); $X_5 = X_1 \times X_3$ (between X_1 and X_3) and; $X_6 = X_2 \times X_3$ (between X_2 and X_3)

For the attack for chlorides, the rate of corrosion can be obtained by (means of) the defined equation with (the) standard conditions $T = 15$ $^{\circ}C$; $RH = 69\%$; $O_2 = 20\%$:

where:

Q_2 = rate of corrosion ($\times 10^{-4}$ g / cm^2 / year); $N = NaCl$ by weight of mixing water (%); $W =$ water-cement ratio (% / 100); $d =$ diameter of reinforcing bars (mm); $c =$ cover thickness (mm)

The rate of corrosion in a particular condition is determined by equation 3 adjusted for the existent environmental conditions. The adjustment is made by a conversion factor determined by q_3' and q_3'' obtained by equation 4. For the calculation of q_3' the existent environmental conditions are used, while in the q_3'' it is used the standard condition and the existent content of chlorides.

$$q_3 = 2,59 - 0,05X_1 - 6,89X_2 - 22,87X_3 - 0,99X_4 + 0,14X_5 + 0,51X_6 + 0,01X_7 + 60,81X_8 + 3,36X_9 + 7,32X_{10} \quad [4]$$

donde:

q_3 = tasa de corrosión (10^{-4} g / cm² / año);
 X_1 = temperatura (°C); X_2 = humedad relativa restada un 45% (% / 100); X_3 = concentración de oxígeno en la atmósfera (% / 100); X_4 = contenido de cloruros (% NaCl por peso de agua de amasado); $X_5 = X_1 \times X_2$ (interacción entre X_1 y X_2); $X_6 = X_1 \times X_3$ (entre X_1 y X_3); $X_7 = X_1 \times X_4$ (entre X_1 y X_4); $X_8 = X_2 \times X_3$ (entre X_2 y X_3); $X_9 = X_2 \times X_4$ (entre X_2 y X_4) y $X_{10} = X_3 \times X_4$ (entre X_3 y X_4)

El valor ajustado para la tasa de corrosión es determinado por:

$$Q = Q_2 (q_3' / q_3'') \quad [5]$$

Volumen máximo de corrosión.

El total de corrosión que produce la fisuración del hormigón de recubrimiento es determinado mediante la ecuación:

$$VMACOR = 0,602 (1 + 2 c / d)^{0,85} d \quad [6]$$

donde:

VMACOR = total de corrosión cuando el hormigón de recubrimiento se fisura (10^{-4} g/cm²);
 c = recubrimiento (mm) y d = diámetro de la armadura (mm).

La tasa de corrosión anual se determina mediante las ecuaciones 2 y 5 presentadas anteriormente. El valor será considerado como VCORT. Se considera que el límite aceptable se alcanza cuando el hormigón de recubrimiento se fisura, o sea, cuando el valor obtenido mediante la ecuación 5 acumulado en los años sea igual al valor calculado por la ecuación 6.

2.3. Inspección

En la inspección los datos permitieron la definición de las variables de resistencia del hormigón y de geometría. Además, ha sido obtenido el perfil de cloruros y la profundidad de carbonatación. La profundidad de carbonatación determinada mediante fenoltaleina estuvo en un rango de 4 a 15 mm. Se han empleado esclerómetro, ultrasonido y pacómetro. Las funciones de probabilidad para las variables han sido ajustadas a través del ajuste de bondad de Kolmogorov-Smirnov. Las funciones normal y log-normal han sido las dos que mejor se ajustaron.

Sin embargo, unos datos no obtenidos en la inspección han sido adoptados por extrapolación de resultados de

where:

q_3 = rate of corrosion ($\times 10^{-4}$ g / cm² / year);
 X_1 = temperature (°C); X_2 = relative humidity (% / 100); X_3 = oxygen concentration (% / 100);
 X_4 = chloride content (% NaCl by weight of mixing water); $X_5 = X_1 \times X_2$ (interaction between X_1 and X_2);
 $X_6 = X_1 \times X_3$ (between X_1 and X_3); $X_7 = X_1 \times X_4$ (between X_1 and X_4); $X_8 = X_2 \times X_3$ (between X_2 and X_3);
 $X_9 = X_2 \times X_4$ (between X_2 and X_4); $X_{10} = X_3 \times X_4$ (between X_3 and X_4).

The adjusted value for the rate of corrosion is determined by:

Maximum of corrosion products

The amount of corrosion products that produces the cracking of concrete cover is determined by the following equation:

where:

VMACOR = amount of corrosion products when the concrete cover cracks ($\times 10^{-4}$ g/cm²);
 c = cover thickness of concrete (mm) and; d = diameter of reinforcing bar (mm).

The rate of annual corrosion is determined by equations 2 and 5 presented previously. This is the VCORT value. The acceptable limit is reached when the cover concrete cracks.

2.3. Inspection

In the inspection the data provided the definition of the variables of resistance of the concrete and the geometry. Also, it was obtained the profile of chlorides and the carbonation depth. The carbonation depth was obtained by phenolphthalein was in 4 to 15 mm range. Rebound hammer, ultrasonic and rebar's detection was used in the inspection. The probability functions for the variables were adjusted through the Kolmogorov-Smirnov adjustment. The normal and log-normal functions were the best adjusted.

However, some data not obtained in the inspection were adopted by extrapolation from regions of Vitoria's

regiones de la ciudad de Vitoria o de regiones con características semejantes. Entre las variables adoptadas se encuentran la temperatura, la humedad relativa y la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. Las variables relacionadas con el acero, han sido obtenidas en los informes de control de la construcción.

Para el tránsito han sido utilizados los datos del año de 1999 y la curva de evolución del volumen de tránsito que indica la saturación con 68.400 vehículos para el año de 2020. La Tabla 1 presenta los principales datos utilizados en el estudio.

city or regions with similar characteristics. Among the adopted variables are the temperature, the relative humidity and the concentration of atmosphere carbon dioxide. The variables related to reinforcing steel were obtained in the control reports of the construction.

For the traffic the 1999 data were used and a time series which indicate the saturation on 2020 with 68.400 vehicles. The Table 1 present the main data used in the study.

TABLA 1/TABLE 1
Datos relativos a las vigas entre los ejes N17 y N18
Dates to the beams between the axes N17 and N18

Elementos/Elements	Variable/Variable	Número de muestras Number of samples	Media/Media	Desviación típica Standard deviation
Geometría Geometry Viga Beam (cm)	hvinga	Proyecto/Project	215,00	1,00 (adoptado) (adopted)
	binf	16	76,13	0,79
	bsup	27	131,73	0,64
	hbinf	32	20,16	0,34
	hbsup	32	12,89	0,31
	hmisus	Proyecto/Project	12,00	0,50 (adoptado) (adopted)
	hmisui	Proyecto/Project	25,00	0,50 (adoptado) (adopted)
	bsupav	32	20,53	0,39
	binfav	32	20,53	0,39
Vano/span	Proyecto/Project	3828,00	10,00 (adoptado) (adopted)	
Geometría Geometry Losa Slab (cm)	bmesa	Cálculo/Calculation	258,00(V1 y V8)	5,00 (adoptado) (adopted)
			292,00(V2 a V7)	5,00 (adoptado) (adopted)
	entvig	Proyecto/Project	350,00(V1 y V8)	5,00 (adoptado) (adopted)
			305,00(V2 a V7)	5,00 (adoptado) (adopted)
	Espesor/thickness	Proyecto/Project	17,00	2,00 (adoptado) (adopted)
	Pavimento/pavement	Proyecto/Project	7,00	5,00 (adoptado) (adopted)
	placa inferior/inferior plate	Proyecto/Project	4,00	0,40 (adoptado) (adopted)
Anchura/width	Proyecto/Project	2530,00	10,00 (adoptado) (adopted)	
Recubrimiento Concrete cover (mm)	recub (V1) lat - inf	8 - 4	50,25 - 47,75	8,51 - 5,00
	recub (V2) lat - inf	7 - 4	52,43 - 41,00	3,41 - 11,58
	recub (V3) lat - inf	7 - 4	58,43 - 50,00	17,78 - 6,48
	recub (V4) lat - inf	8 - 4	53,25 - 51,00	8,33 - 13,34
	recub (V5) lat - inf	8 - 4	55,25 - 48,50	5,12 - 9,68
	recub (V6) lat - inf	8 - 4	57,00 - 47,50	9,59 - 13,53
	recub (V7) lat - inf	8 - 4	55,38 - 47,75	7,74 - 9,88
recub (V8) lat - inf	8 - 4	56,75 - 49,25	9,87 - 10,53	
Resistencia del hormigón Concrete comp. strength (MPa)	fcvinga	Esclerometría Rebound hammer	34,80	1,89
	fclosa	control	34,60	2,80
Acero/Steel (MPa)	fyarm	control	538,00	49,50
	fypret	control	1719,50	64,80
	Eyarm	control	200000,00	10000,00
	Eypret	control	180000,00	10000,00
Condiciones ambientales Environmental condition	UR(%)	CST(83 a 99)	77,09	17,05
	T (°C)	CST(82 a 99)	24,21	3,51
	concat (mg/m ³)	SEAMA	501,70	455,05

3. RESULTADOS

Las curvas de evolución de la probabilidad de fallo obtenidas en la simulación del agotamiento de la capacidad portante a la flexión para todas las vigas tienen forma semejante. A partir del inicio, la probabilidad de fallo crece rápidamente debido al aumento previsto para el tránsito. Este período está comprendido entre los años de 1980 hasta 2020. En el inicio de este período, se puede notar que la viga ya estaba ejecutada pero aun no había tránsito, por tanto la probabilidad de fallo se mantiene estable en el valor inicial. En la segunda parte, la capacidad de tránsito del puente está en el límite, el deterioro aumenta suavemente y no afecta sustancialmente a la viga. Por último, la curva presenta una pendiente más acentuada. Esto se debe a la acción de los agentes agresivos.

Para todas las vigas de los vanos han sido elaboradas las gráficas de evolución de la probabilidad de fallo. En las Figuras 2 y 3 se presentan las gráficas de la viga V6, donde se puede notar el tipo de las curvas obtenidas.

A través de los datos obtenidos en la evaluación, recogidos en la gráfica de la Figura 2, se puede concluir que la capacidad resistente de la viga es cerca de la proyectada. Considerando una probabilidad de fallo aceptable de 10^{-6} , el tiempo estimado para la viga alcanzar esta probabilidad será de 163 años, o sea, superior al tiempo de proyecto normalmente adoptado. Para la probabilidad de fallo por agotamiento a flexión de 10^{-4} , el tiempo estimado es de 430 años.

Considerando que la fisuración es debida a los productos de corrosión, los valores de tiempo obtenidos para una probabilidad de 10^{-4} , es de 74 años. Para una probabilidad de 10^{-3} , el tiempo estimado es de 85 años. Otros valores pueden ser extraídos de la gráfica de la Figura 3.

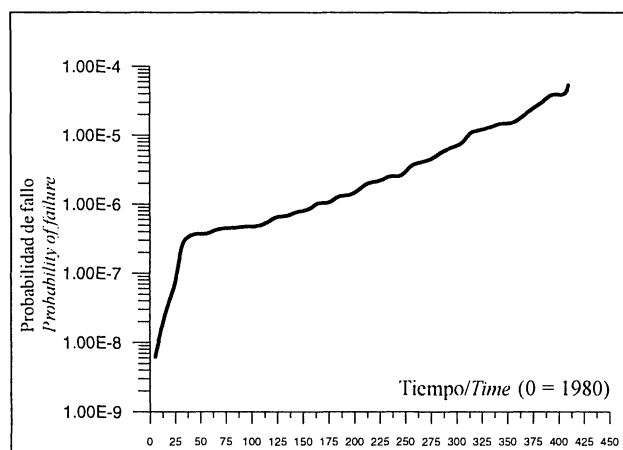


Figura 2.- Evolución de la probabilidad de fallo por agotamiento a flexión para la viga V6.

Figure 2.- Evolution of failure probability for resistance to bending moments for the V6 beam.

3. RESULTS

The evolution curves for the probability of failure obtained in the simulation of the resistance to bending moments for all beams have a similar form. From the beginning, the failure probability grows quickly due to the increase of the traffic. This period is from the 80s up to 2020. In the beginning of this period, one can notice that the beam was already executed but there was not traffic yet, therefore the failure probability stays stable in the initial value. In the second part, the capacity of traffic of the bridge is in its limit, the deterioration increases smoothly and it doesn't affect the beam substantially. Finally, the curve presents an accented slope. This is due to the action of the aggressive agents.

For all the beams of the span the graphs of evolution of the failure probability were elaborated. The graphs of the beam V6 is presented in Figures 2 and 3 where one can notice the type of the obtained curves.

Through the data obtained in the evaluation, presented in the Figure 2, one can conclude that the resistant capacity of the beam is close the projected one. Considering a probability of failure of 10^{-6} , the time for the beam to reach this probability will be in 163 years, that is to say, superior to the time of the usually adopted project. For the resistance to bending moments criterion and the failure probability of 10^{-4} , the time is 430 years.

Considering the cracking due to the corrosion products criterion, the obtained time for a probability of 10^{-4} are 74 years. For the same criterion, for a probability of 10^{-3} , the time is 85 years. Other values can be extracted from Figure 3.

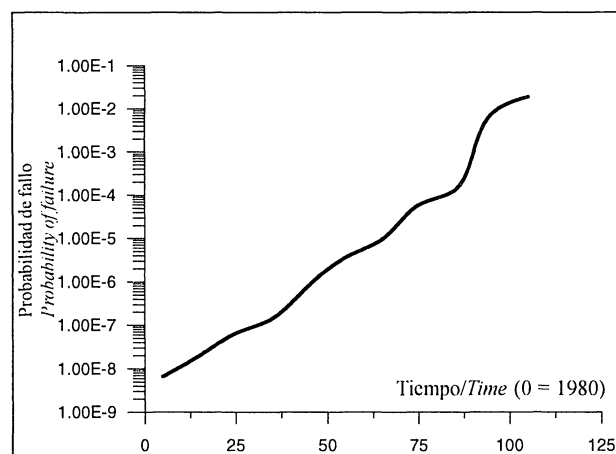


Figura 3.- Evolución de la probabilidad de fallo por fisuración para la viga V6.

Figure 3.- Evolution of failure probability for cracking for the V6 beam.

Los resultados para las 8 vigas de este vano se presentan en la Tabla 2. En la primera columna se encuentran los valores de la probabilidad de fallo de la viga enseguida a la ejecución y en las columnas siguientes, están los tiempos para las probabilidades de fallo definidas. Se ha cogido el valor de 10^{-6} pues es la que normalmente se adopta en el proyecto. Para las probabilidades de fallo empleadas se ha recogido las observaciones de expertos en el tema (4) y códigos (5). La probabilidad de fallo de 10^{-4} ha sido considerada la aceptable para la condición de agotamiento de la capacidad portante a la flexión. Para la fisuración debido a los productos de corrosión se ha considerado razonable adoptar la probabilidad de fallo de 10^{-3} .

The results for the 8 beams of this selected span are presented in the table 2. In the first column are the beam probabilities of failure after the execution and in the following columns are the times for the defined failure probabilities. One can take the value of 10^{-6} because it is usually adopted in the project. For the probabilities of failure applied it has taken the observations of researchers (4) and codes (5). A 10^{-4} value of probability of failure was considered acceptable for the resistance to bending moment's condition. For the cracking due the corrosion products it was considered reasonable to adopt the 10^{-3} probability of failure.

TABLA 2/TABLE 2
Resultados del estudio de probabilidades de fallo de las vigas entre los ejes N17-N18
Results for probability of failure of the beams in the axes N17-N18

Vigas (Beams)	Probabilidad de fallo inicial (Probability of failure initial)	Tiempo en años para agotamiento a la flexión para las probabilidades (Time in years for resistance to bending moments for the probabilities)		Tiempo en años para la fisuración para las probabilidades (Time in years for the probabilities)	
		10^{-6}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-3}
V1	8×10^{-9}	28	407	105	134
V2	4×10^{-9}	153	412	80	91
V3	8×10^{-10}	181	450	114	141
V4	2×10^{-10}	131	414	80	85
V5	3×10^{-9}	140	420	104	134
V6	7×10^{-9}	163	430	74	85
V7	7×10^{-9}	167	427	100	129
V8	8×10^{-9}	28	>500	106	137

4. DISCUSIÓN

Por los resultados encontrados, se puede verificar que todas las vigas se presentan en buenas condiciones de seguridad. Después del periodo de crecimiento del tránsito, se nota que la acción de los agentes agresivos produce un deterioro lento. Este hecho es corroborado por los bajos contenidos de cloruros encontrados en la inspección. Lo mismo se puede afirmar del frente de carbonatación, donde los valores no ultrapasan a los 15 mm.

Las vigas V1 y V8, están en las laterales y reciben una carga más grande del tránsito que las demás, pero el proyecto ya contempla este factor pues ellas han sido construidas con 8 cordones y las centrales con 7 cordones. Debido a este hecho tanto las vigas intermedias cuanto las laterales presentan valores de

4. DISCUSSION

From the results one can verify that all beams are presented under safety conditions. After the traffic growth period it is noticed that the action of the aggressive agents produces a slow deterioration. The chlorides detected in the inspection corroborate this fact. One can say the same to the carbonation front, where the values are shorter than 15 mm.

The beams V1 and V8 are in the lateral and they receive a bigger load of traffic than the other ones, but the project already contemplates this load, so they were built with 8 strands and the central beams with 7 strands. Due to this fact, the central and the lateral beams presented failure probabilities in the same

probabilidades de fallo del mismo orden, diferenciándose apenas por la variación del recubrimiento de las armaduras y de la acción de los cloruros y de la carbonatación. En este caso, las vigas presentan una vida útil superior a la normalmente requerida.

Con relación a la probabilidad de fisuración debido a los productos de corrosión, los períodos para que esta forma de deterioro pueda afectar son superiores a los 80 años. Por tanto, antes de este período, la posibilidad que haya delaminación del recubrimiento de las armaduras es exigua.

De forma general, los resultados comprueban que las vigas han sido ejecutadas con calidad superior a la prevista en el proyecto. Este hecho ya se podría verificar a través de los resultados de la inspección, donde la resistencia del hormigón y el recubrimiento de las armaduras son superiores a los valores especificados. También ha sido favorable la uniformidad de la sección geométrica de los elementos, conforme se ha presentado en la Tabla 1.

5. CONCLUSIONES

Las conclusiones de este trabajo pueden hallarse en dos líneas. La primera que aborda el método empleado y, la segunda, que concluye sobre los resultados obtenidos. Respecto al método empleado, a través de él ha sido posible identificar algunas vigas de otros tableros las cuales deben ser inspeccionadas en períodos más cortos. Además, ha quedado claro que es posible realizar el estudio de la vida útil de estructuras de hormigón de una forma más ingenieril y basada en técnicas confiables que permiten la cuantificación.

La segunda conclusión es que, a pesar de que los elementos estructurales hayan sido proyectados y sometidos a condiciones semejantes, las particularidades de construcción y los cambios producidos por la acción del medio ambiente producen resultados distintos, generando condiciones de seguridad también distintas, por esto, cada caso debe ser analizado en particular. Sin embargo, se puede observar que para condiciones habituales, o sea, con el uso hasta entonces destinado, estas vigas pueden alcanzar períodos de vida útil superiores a los 100 años, considerando el tiempo medio mínimo para la despasivación de las armaduras, sin necesidad de una intervención onerosa, o sea, solamente con el mantenimiento rutinario.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) T. J. Da Silva. Predicción de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro. p. 327. Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña, España (1998).
- (2) R. E. Melchers. Structural Reliability - analysis and prediction. p. 400, Ellis Horwood Series in Civil Engineering (1987).
- (3) S. Morinaga: *Prediction of service lives of reinforced concrete buildings based on the corrosion rate of reinforcing steel*. Proceedings 5th. International Conference - Durability of Building Materials and Components. Brighton, Reino Unido, (1990), pp.5-16.
- (4) D. E. Allen: *Safety criteria for the evaluation of existing structures*. Report IABSE Colloquium, 67 (1993), pp. 77-84.
- (5) Joint Committee on Structural Safety. Probabilistic Model Code. p. 62, JCSS-OSTL/DIA/VROU, 12th draft (2000).

range. The variation of the bars recover, the action of the chlorides and the carbonation are the factors that changed. In this case, the beams presented superior service life to the usually required.

For the criterion of the cracking due to the corrosion products based in the probability of failure, this form of deterioration can affect periods beyond 80 years. Therefore, before this period the possibilities that there will be bars recover spalling is small.

In a general way, the results prove that the beams were executed with superior quality than the specified in the project. This fact could also be verified through the results of the inspection, where the concrete compressive strength and the bars recover are superior to the project values. It was also favorable the uniformity of the geometric section of the elements as presented in Table 1.

5. CONCLUSIONS

The conclusions of this work can be in two lines. The first one deals with the used method and the second one concludes on the results obtained for the study case. Regarding the used method it is possible to identify some beams of other spans that should be inspected in shorter periods. Also, it is clear that is possible to carry out the study of the service life of concrete structures in a more technical and scientific way basing in a reliable technique that allows the quantification.

The second conclusion is that although the structural elements were projected and subjected to similar conditions, the construction particularities and the changes by the action of the environment produce different results, also generating different safety conditions. For this reason, each case should be analyzed separately. However, one can observe that to habitual conditions, e.g., by a similar utilization, these beams can reach superior service life up to 100 years, considering the medium minimum time for the depassivation of the reinforcing bars, without necessity of an onerous intervention, that is to say, only with a periodic maintenance.

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Monográfico dedicado al VIDRIO EN LA CONSTRUCCIÓN

La revista MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN editada en el Instituto de Ciencias de la Construcción EDUARDO TORROJA, dedica un número doble (N^{os} 242/243) a un solo material: *El vidrio*.

Haciéndose eco del creciente interés que suscitan las investigaciones e innovaciones sobre los productos derivados del vidrio, este material se trata, por primera vez en la Revista, de forma monográfica, con la amplitud que permite un número especial.

Los distintos artículos que componen este número son muestra de la gran variedad de características, propiedades y aplicaciones bajo las que se presentan los derivados del vidrio. Entre sus usos más comunes se encuentran: elementos transparentes de cerramientos, materiales estructurales en las fachadas, aislamientos de muros y cubiertas, recubrimientos de pisos y paredes, componentes de refuerzo de placas,

paneles, morteros y hormigones, como material decorativo y estético. Hoy en día, el vidrio es un material indispensable en la construcción y su tecnología está en continua evolución para dar respuesta a la constante demanda de nuevos productos con carácter multifuncional.

En este número especial se recogen trabajos de investigación originales e inéditos que cubren una temática muy diversa dentro de los materiales vítreos destinados o aplicados en construcción. Aparecen artículos relacionados con las vidrieras artísticas, los acristalamientos, los vidrios funcionales, las fibras de refuerzo, los vitrocerámicos y los porcelanatos. Los autores de estos trabajos, tanto los nacionales como los internacionales, son especialistas reconocidos en sus respectivos campos científicos.

Los artículos que componen este número especial son:

- Procesos de alteración de las vidrieras medievales. Estudio y tratamientos de protección.
(*Alteration processes of medieval stained glass windows. Study and protection treatments*).
J. M^a Fernández Navarro.
- El efecto de la corrosión en vidrieras coloreadas.
(*The effect of corrosion of stained glass windows*).
J. Leissner.
- Formulación de vidrios absorbentes del calor.
(*Formulation of heat absorbing glasses*).
P. Álvarez-Casariago y P. Mazón.
- Dimensionamiento de placas de acristalamiento para edificios mediante un modelo probabilístico de rotura.
(*A probabilistic model for failure design of glass plates in building*).
A. Fernández Canteli, I. Viña y A. Bernardo Sánchez.
- Caracterización de fibras en forma de lana de roca para aislamiento obtenidas a partir de basaltos canarios.
(*Characterization of fibers as rockwool for insulation obtained from canary islands basalts*).
J. M. Cáceres, J. E. García Hernández y J. M^a Rincón.
- El GRC: Material compuesto de matriz inorgánica reforzado con fibras de vidrio AR.
(*GRC: Composite material from an inorganic matrix reinforced with ar glass fibres*).
P. I. Comino.
- Los materiales vitrocerámicos en la construcción.
(*Glass-ceramic as building materials*).
J. M^a Rincón y M. Romero.
- Gres porcelánico: Aplicaciones arquitectónicas, procesado y propiedades físico-mecánicas.
(*Porcelainized stoneware: Architectural, processing and physico-mechanical properties*).
T. Manfredini, M. Romagnoli y J. M^a Rincón.

Venta de ejemplares: Distribución de Publicaciones
Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja
Serrano Galvache, s/n - 28033 Madrid.
Tfno.: (91) 302.04.40 - Fax: (91) 302.07.00