



Análisis probabilística de la evolución de la degradación de revestimientos en piedra con utilización de cadenas de Markov

A. Silva¹, J. de Brito¹, P. L. Gaspar², L. C. Neves³

¹Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos, IST, Universidade de Lisboa, e-mail: anasilva931@msn.com

²Faculdade de Arquitectura, Universidade de Lisboa

³NTEC, University of Nottingham

Información del artículo

Artículo recibido el 16 de Marzo de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 18 de agosto de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2016 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2016.

© 2015 ALCONPAT Int.

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 5, No. 3, Septiembre – Diciembre 2015, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de última modificación: 01 de septiembre de 2015.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMEN

Los modelos de predicción de la vida útil intentan extrapolar el comportamiento futuro de los elementos de construcción, anticipando el punto en el que se requiere la intervención. Cadenas de Markov se pueden usar para evaluar la condición futura de los elementos de construcción y se utilizan en este estudio para modelar la vida útil de revestimientos pétreos, a partir de las inspecciones visuales de edificios en servicio. La degradación de los revestimientos pétreos se califica en una escala discreta de cinco niveles, y se evalúa la probabilidad de transición de condiciones de degradación. Este estudio también permite comprender la influencia de las condiciones de exposición en la evolución de la degradación de los revestimientos.

Palabras clave: Cadenas de Markov; predicción de la vida útil; revestimientos pétreos.

RESUMO

Os modelos de previsão de vida útil procuram extrapolar o comportamento futuro dos elementos construtivos, antevendo o momento a partir do qual é necessário intervir. As cadeias de Markov permitem avaliar a condição futura dos elementos da construção, sendo utilizadas no presente estudo, na modelação da previsão da vida útil de revestimentos pétreos (fixados directamente ao suporte), a partir de inspecções visuais de edifícios em serviço. A degradação dos revestimentos pétreos é classificada numa escala discreta composta por cinco níveis, sendo avaliada a probabilidade de transição entre condições de degradação e o tempo de permanência em cada uma dessas condições. O presente estudo permite ainda compreender a influência das condições de exposição na evolução da degradação deste tipo de revestimentos.

Palavras-chave: cadeias de Markov; previsão da vida útil; revestimentos pétreos.

ABSTRACT

The service life prediction models intend to extrapolate the future behaviour of building elements, anticipating the instant at which an intervention is required. Markov chains can be used to assess the future condition of the construction components and are applied in this study to model the service life of stone claddings (directly adhered to the substrate), based on visual inspections of buildings in service conditions. The degradation of stone claddings is evaluated using a discrete scale with five condition levels. In this study the probability of transition from degradation conditions and the time spent in each of these conditions are evaluated. This study also allows a better understanding of the influence of the exposure conditions on the evolution of degradation of the claddings under analysis.

Keywords: Markov chains; service life prediction; stone claddings.

Autor de correspondencia: Jorge de Brito

1. INTRODUCCIÓN

La degradación es un proceso complejo y dinámico, en lo que los agentes y mecanismos de degradación actúan en sinergia y se encuentran en constante cambio. Los estados actual y futuro de las construcciones presentan grados distintos de incertidumbre. Para intentar superar esta dificultad, a veces es necesario recurrir a un abordaje estocástico en la previsión de la vida útil (Frangopol et al., 2004). En general, este tipo de abordaje conlleva una complejidad elevada y parte de la premisa de que la deterioración es un proceso regido por variables aleatorias (Moser, 2003). Así, se puede mirar a la degradación como un proceso continuo de pérdida de desempeño, que evoluciona de forma probabilística en el tiempo. El fenómeno de degradación puede aún ser descrito como la transición entre estados de condición, caracterizados por diferentes niveles de degradación (Basso et al., 2012). Las cadenas de Markov son uno de los métodos que permiten evaluar, de modo estocástico, la condición futura de los revestimientos de fachada. Las cadenas de Markov simulan la evolución de la degradación de las construcciones y permiten definir la probabilidad de desempeño futuro de un elemento de la construcción con base tan solo en su desempeño actual, ignorando la historia de deterioración y de mantenimiento del elemento, su edad, además de otros parámetros (Neves et al., 2006).

En este estudio, se aplica a la previsión de la vida útil de revestimientos pétreos un modelo basado en las cadenas de Markov, permitiendo el análisis de la distribución probabilística de cada una de las condiciones de degradación en el tiempo (y también el tiempo mediano de permanencia en cada condición de degradación). Además, es analizada la influencia de algunas características de los revestimientos en la evolución de su proceso de degradación. Este tipo de modelo es crucial en el ámbito del mantenimiento del patrimonio construido, porque fornece datos relativos al más probable instante en el que fallan los revestimientos, función de sus características y de la edad en la que es extremadamente improbable la rotura de estos elementos, englobando la noción de riesgo asociada al fallo de los revestimientos, posibilitando de este modo una definición informada de los planos de mantenimiento y de los periodos de garantía y de cobertura de danos por parte de las aseguradoras.

2. DEGRADACIÓN DE LOS REVESTIMENTOS PÉTREOS

Las cadenas de Markov se basan en un conjunto de estados discretos que caracterizan el desempeño de las construcciones. Existen distintos métodos para la evaluación del estado de degradación de los edificios y de sus componentes, que varían según la jerarquía de los elementos de la construcción y la definición de parámetros de condición asociados a los fallos (Straub, 2003). Diversos autores han establecido sistemas de clasificación de las anomalías o escalas de degradación para expresar la degradación visual y funcional de los elementos analizados (Balaras et al., 2005; Shohet et al., 1999); en estos sistemas se incluye la clasificación de los fallos a través de una escala de variables discretas, desde el nivel de condición más favorable (situaciones de ausencia de degradación visible) hasta la situación más desfavorable (degradación extensa o pérdida de funcionalidad). En el presente estudio, ha sido adoptada una escala con 5 niveles de degradación (entre la condición A – sin degradación visible – y la condición E – degradación generalizada). Esta clasificación relaciona el estado de degradación de los revestimientos en piedra y la evaluación física y visual de las fachadas en el momento de la inspección (“Tabla 1”).

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este estudio, han sido inspeccionados 203 revestimientos en piedra natural (con fijación directa al soporte) en condiciones reales de utilización. Para tal, se han hecho solamente inspecciones visuales, evaluando *in situ* las características de los revestimientos, su estado de conservación (según la escala presentada en la Tabla 1, que atribuye a los revestimientos inspeccionados un dado nivel de degradación, función del área del revestimiento afectada y del tipo de anomalía), de sus características de exposición ambiental y de las condiciones de mantenimiento. La muestra analizada contiene edificios de los siglos XIX y XX, destinados a distintos usos: habitacionales, comercio o servicios. La muestra ha sido seleccionada de modo aleatorio; sin embargo se ha buscado una muestra coherente y representativa del tipo de piedra natural presente en los revestimientos existentes en Portugal. A demás, la muestra obtenida presenta un largo abanico de edades, en el que el edificio más reciente tiene solamente 1 año y el edificio más antiguo tiene 82 años, lo que permite evaluar con más rigor el proceso de envejecimiento y degradación de los elementos analizados. En el presente estudio, se asume que la edad es obtenida según el período de tiempo que transcurre desde la última reparación hasta la fecha de la inspección (ya que una intervención en el revestimiento deberá reponer las características iniciales, reempezando así su proceso de degradación, desde el punto de vista de los modelos de previsión de vida útil). En esta muestra, ninguno de los casos estudiados pertenece a la condición de degradación más desfavorable (condición E). La “Figura 1” ilustra las distintas condiciones de degradación caracterizadas en la Tabla 1.



Figura 1. Condiciones de degradación de los revestimientos pétreos

Tabla 1. Niveles de degradación de los revestimientos en piedra natural

Degradación física y visual	Condición de degradación
No presenta degradación visible	Condición A
Anomalías visuales o de degradación superficial $\leq 15\%$ Anomalías de pérdida de integridad $\leq 20\%$	Condición B
Anomalías visuales o de degradación superficial $\leq 30\%$ Anomalías en juntas $\leq 30\%$ Fallos en la fijación al soporte $\leq 20\%$ Anomalías de pérdida de integridad $\leq 20\%$	Condición C
Anomalías visuales o de degradación superficial $> 30\%$ Anomalías en juntas $> 30\%$ Fallos en la fijación al soporte $> 20\%$ Anomalías de pérdida de integridad $\leq 20\%$	Condición D
Fallos en la fijación al soporte $> 20\%$ Anomalías de pérdida de integridad $> 20\%$	Condición E

4. ANÁLISIS PROBABILÍSTICA DE LA DEGRADACIÓN DE LOS REVESTIMIENTOS PÉTREOS EN EL TIEMPO

En este estudio, se usa la función *fmincon* (*constrained nonlinear optimization*) presente en el *software* MATLAB para obtener la matriz intensidad (Q), que permite obtener la transición entre estados de degradación, acorde el estado original y la tasa de transición entre el estado actual y el estado futuro. Con base en las tasas de transición entre condiciones de degradación, la probabilidad de transición entre estados de degradación puede ser obtenida a través de la ecuación diferencial de Chapman-Kolmogorov. La matriz de intensidad es obtenida a través de la maximización del algoritmo de verosimilitud (Carrington et al., 2005), tal como se presenta en la ecuación (1), siendo para tal utilizado en este estudio el algoritmo numérico de conjunto activo (*active-set numerical algorithm*, presente en la función *fmincon*) (Kalbfleisch e Lawless, 1985). Con el objetivo de mejorar la estabilidad del algoritmo de optimización, se maximiza el algoritmo de verosimilitud (Fletcher e Powell, 1963; Higham e Higham, 2005), como representado en la ecuación (1). La matriz Q obtenida para los revestimientos en piedra es dada por la ecuación (2).

$$\text{Find } \theta \xrightarrow{\text{maximize}} \log(L(Q)) = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m \log(P_{ij}^{\Delta t}) \quad (1)$$

$$Q = \begin{bmatrix} q_{A,B} \\ q_{B,C} \\ q_{C,D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2210 \\ 0,0190 \\ 0,0115 \end{bmatrix} \quad (2)$$

A través de la matriz intensidad (Q) es posible estimar el tiempo de permanencia en cada estado de degradación (“Figura 2”). Los revestimientos en piedra transitan con más rapidez entre estados de condición más favorables. Este resultado está directamente relacionado con la definición de los estados de degradación. Es normal que la transición entre estados de degradación no se haga de modo uniforme, ya que los estados de condición siguen una escala que tampoco es constante. La condición A de degradación (más leve) corresponde a un revestimiento pétreo sin apenas deterioración y, por tanto, para que un revestimiento en piedra transite para lo siguiente nivel basta con que presente cambios en la uniformidad de la superficie o manchas puntuales. Parece por eso razonable que la transición de la condición A para la siguiente condición ocurra en media en solamente 4,5 años.

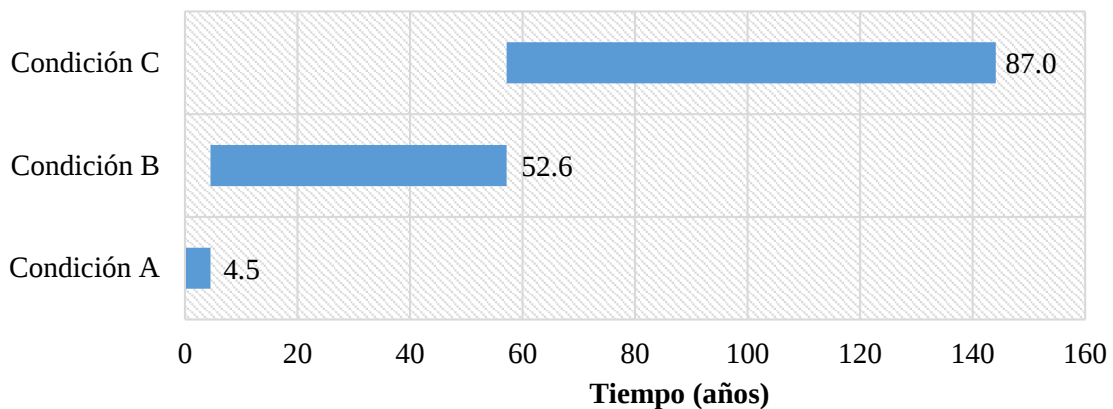


Figura 2. Representación del tiempo medio de permanencia en cada condición de degradación para los revestimientos pétreos

La distribución probabilística de la condición de degradación de los revestimientos en piedra en el tiempo es presentada en la “Figura 3”. La probabilidad de pertenencia a la condición A disminuye en el tiempo, siendo prácticamente nula (menos de 2%) a partir del año 8. La probabilidad máxima (79,2%) de pertenencia a la condición B de degradación ocurre en el año 12 y luego decrece. En cuanto a la condición C, el pico máximo de probabilidad de pertenencia a esta condición es atingido entre los años 71 y 73 (con una probabilidad de 46,1%). Por fin, la probabilidad de pertenencia a la condición D aumenta en el tiempo, siendo inferior a 10% antes del año 41 y superior a 60% a partir del año 145.

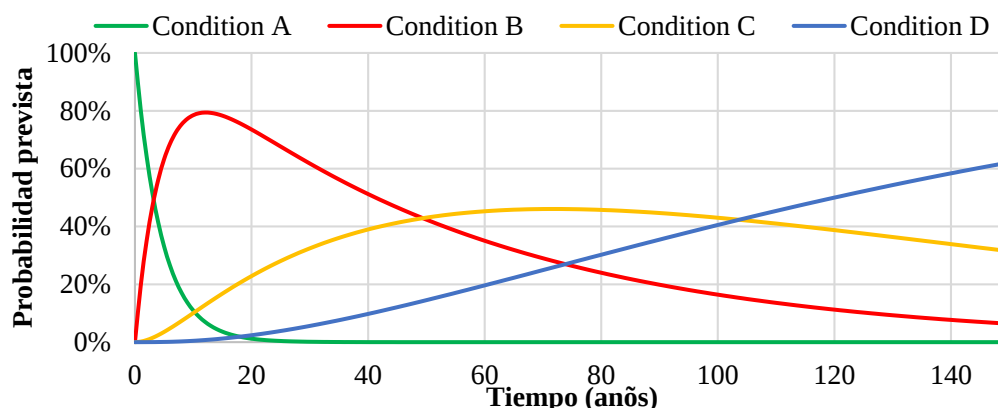


Figura 3. Distribución probabilística de la condición de la degradación de los revestimientos en piedra en el tiempo

La “Tabla 2” presenta la probabilidad de pertenencia de los revestimientos en piedra a cada una de las condiciones de degradación según su edad.

Tabla 2. Probabilidad de pertenencia a cada uno de los niveles de degradación, fución la edad

Intervalo de años	Probabilidad de pertenencia a las condiciones			
	Condición A	Condición B	Condición C	Condición D
[0:10]	41,81%	53,94%	4,11%	0,14%
]10:20]	3,95%	77,34%	17,32%	1,40%
]20:30]	0,43%	67,08%	28,42%	4,07%
]30:40]	0,05%	55,84%	36,29%	7,83%
]40:50]	0,00%	46,23%	41,42%	12,34%
]50:60]	0,00%	38,25%	44,44%	17,31%
]60:70]	0,00%	31,65%	45,82%	22,53%
]70:80]	0,00%	26,18%	45,98%	27,84%
]80:90]	0,00%	21,66%	45,23%	33,11%
]90:100]	0,00%	17,92%	43,83%	38,25%
]100:110]	0,00%	14,82%	41,97%	43,21%
]110:120]	0,00%	12,27%	39,81%	47,93%
]120:130]	0,00%	10,15%	37,47%	52,39%
]130:140]	0,00%	8,39%	35,04%	56,57%
]140:150]	0,00%	6,94%	32,58%	60,47%

Entre los años 3 y 4, es semejante la probabilidad de un revestimiento en piedra pertenecer a las condiciones A y B. Entre los años 49 y 50, es idéntica la probabilidad de pertenencia a las condiciones B y C. Entre los años 103 y 104, es semejante la probabilidad de pertenencia a las condiciones C y D. En estos intervalos de tiempo, se verifica una más grande probabilidad de transición entre las condiciones de degradación.

Para testar la eficacia del modelo obtenido a través de las cadenas de Markov, se compara el número de casos que pertenecen a cada uno de los estados de degradación dados por aquél y observados en trabajo de campo (“Tabla 3”). El error porcentual obtenido es relativamente bajo, dada la complejidad del fenómeno en análisis.

Tabla 3 - Capacidad de clasificación del modelo obtenido a través de las cadenas de Markov para los revestimientos pétreos

Estado de degradación	Observado	Previsto	Error porcentual medio (%)
Condición A	9	12,096	34,40%
Condición B	114	105,419	7,53%
Condición C	57	63,959	12,21%
Condición D	23	21,527	6,41%

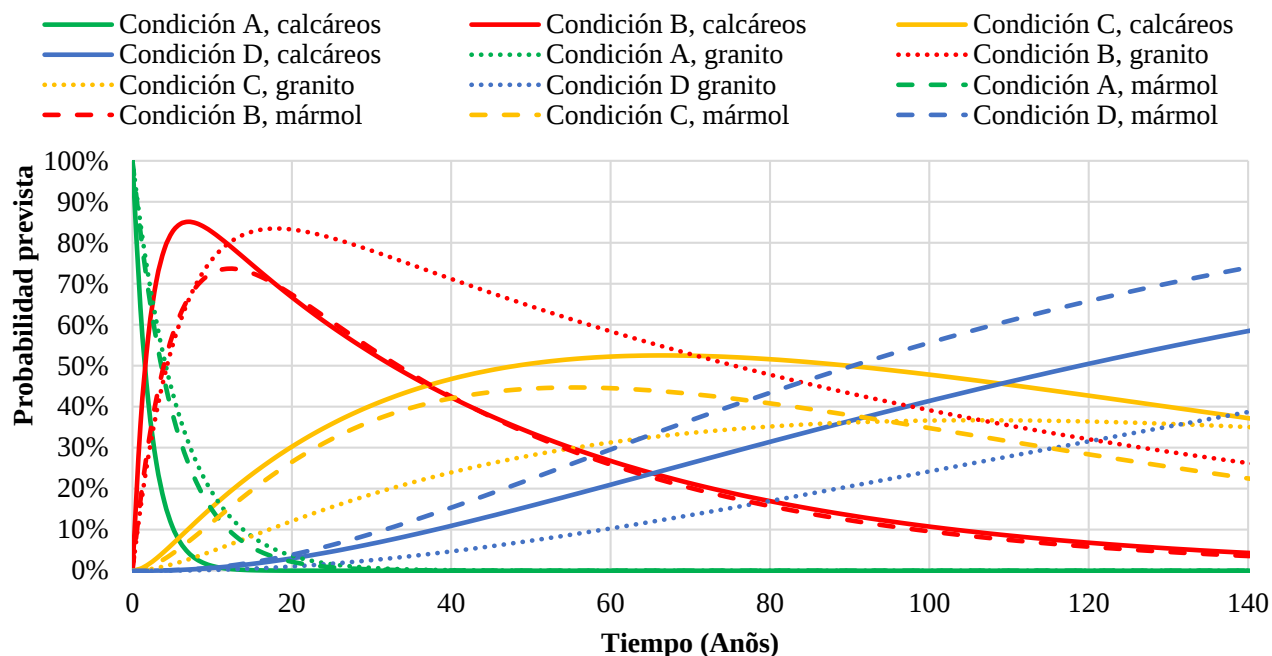
5. ANÁLISIS PROBABILÍSTICA DE LA DEGRADACIÓN DE LOS REVESTIMIENTOS PÉTREOS, SEGÚN SUS CARACTERÍSTICAS

Algunas características de los revestimientos en piedra condicionan de forma significativa su durabilidad. Por eso, se definen distintos modelos de cadenas de Markov que permiten analizar la probabilidad de pertenencia a cada condición de degradación, en el transcurso del tiempo y en función de esas características. Se analizan las siguientes variables: (a) tipo de piedra; (b) tipo de acabado; (c) dimensión de la placa de piedra; (d) exposición a la humedad; (e) cercanía del mar. La discusión de los resultados obtenidos se encuentra en la sección 5; de seguida se presentan algunas consideraciones relativas a la durabilidad de los revestimientos en piedra, función de sus características.

5.1 Tipo de piedra

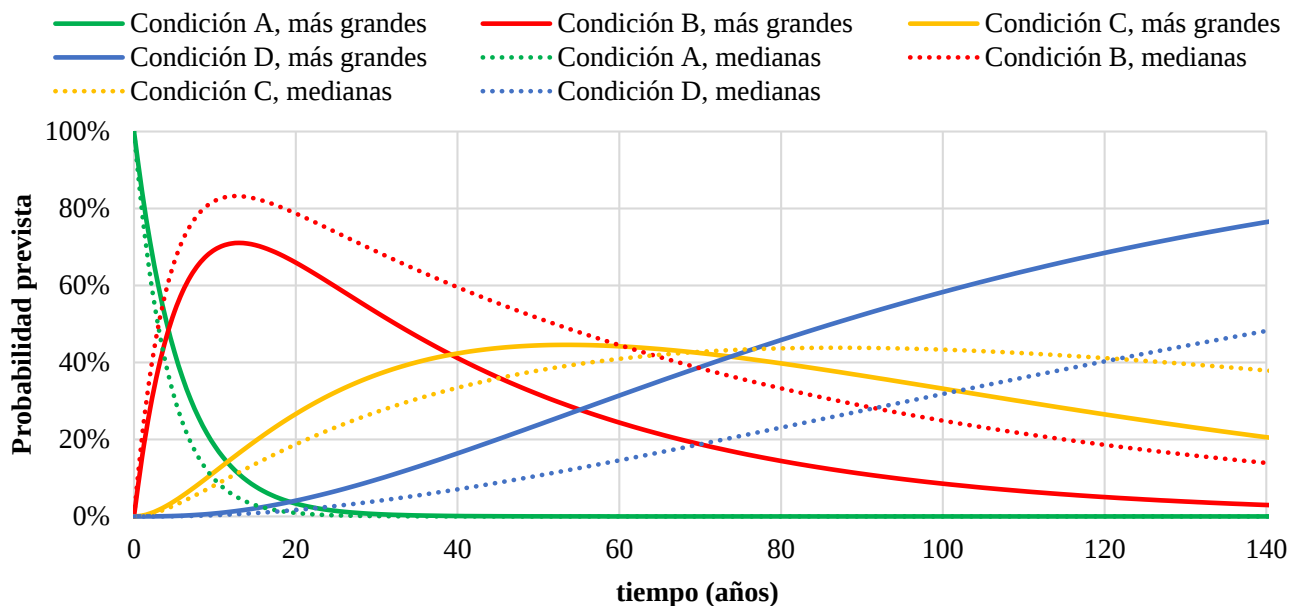
Koch e Siegesmund (2004) refieren que la durabilidad es un requisito fundamental a considerar cuando se especifica piedra natural como material de revestimiento, principalmente en revestimientos exteriores, expuestos a agentes ambientales de degradación. Así, es relevante la análisis de la influencia del tipo de piedra en la progresión de la degradación en los revestimientos. En la “Figura 4” se presenta la distribución probabilística de la condición de degradación en el tiempo, según el tipo de piedra utilizada en el revestimiento. Las piedras calcáreas son las que se quedan más tiempo en la condición A de degradación; para los restantes tipos de piedra, es semejante el tiempo de permanencia en esta condición. En cuanto a la condición B, para los revestimientos calcáreos, la probabilidad máxima ($P = 85,2\%$) de pertenencia en esta condición ocurre en el año 7; para los revestimientos de mármol, la probabilidad máxima ($P = 73,7\%$) se alcanza en el año 12 y para los revestimientos de granito la probabilidad máxima ($P = 83,5\%$) ocurre en el año 18. Respecto en nivel C, los revestimientos en mármol alcanzan su probabilidad máxima de ($P = 4,7\%$) pertenencia a esta condición entre los años 55 y 56, los revestimientos calcáreos alcanzan esa cumbre ($P = 52,5\%$) entre los años 66 y 67 y los revestimientos de granito la alcanzan ($36,7\%$) entre los años 105 y 108 (significativamente después). La más grande

probabilidad de transición entre las condiciones B y C se da entre los años 37 y 38 para los revestimientos calcáreos, entre los años 40 y 41 para los mármoles; y entre los años 106 y 108, para los granitos.



5.2 Dimensión de la placa de piedra

En la “Figura 5” se presenta la distribución probabilística de pertenencia a cada condición en transcurso del tiempo, función de la dimensión de la placa de piedra.



Los revestimientos en piedra con placas de dimensiones más grandes ($A \geq 0,4 \text{ m}^2$) tienen una probabilidad máxima de pertenencia a la condición B sobre los 13 años de edad ($P = 71,1\%$) y de pertenencia a la condición C entre los años 54 y 54 ($P = 44,6\%$). Estos revestimientos presentan una probabilidad máxima de transición entre las condiciones B y C entre los años 39 y 40 y entre las condiciones C y D entre los años 73 y 74. Por su turno, los revestimientos con placas en piedra de dimensiones medianas ($A < 0,4 \text{ m}^2$) presentan una probabilidad máxima de pertenencia a la condición B sobre los 13 años de edad ($P = 83,2\%$) y la probabilidad de pertenencia a la condición C alcanza su cumbre entre los años 86 y 88 ($P = 43,8\%$). Para estos revestimientos, la transición entre condiciones B y C tiene más probabilidad de ocurrencia entre los años 64 y 65, mientras la transición entre las condiciones B y C presenta más grande probabilidad de darse entre los años 1221 y 122.

5.3 Exposición a la humedad

En la “Figura 6” se enseña la distribución probabilística de pertenencia a cada condición en el transcurso del tiempo, función de la exposición a la humedad. En la definición del grade de exposición de los revestimientos en piedra a la humedad se consideran dos categorías: (i) baja exposición, para edificios ubicados en contexto urbano, distando más de 5km del mar y sin la influencia de vientos dominantes; (ii) edificios en zonas de costa, sin protección de la acción conjunta de viento y lluvia. Los revestimientos con alta exposición a la humedad cambian más rápidamente de la condición más favorable (condición A) para la siguiente. Para revestimientos con alta exposición a la humedad, la probabilidad de pertenencia a la condición B alcanza su cumbre sobre el año 8 ($P = 83,3\%$) y la probabilidad de pertenencia a la condición C lo alcanza entre los años 51 y 52 ($P = 38,7\%$). Los revestimientos con una baja exposición alcanzan probabilidades máximas ($P = 72,7\%$) de pertenencia a la condición B en el año 17 y a la condición C ($P = 48,4\%$) en el año 80.

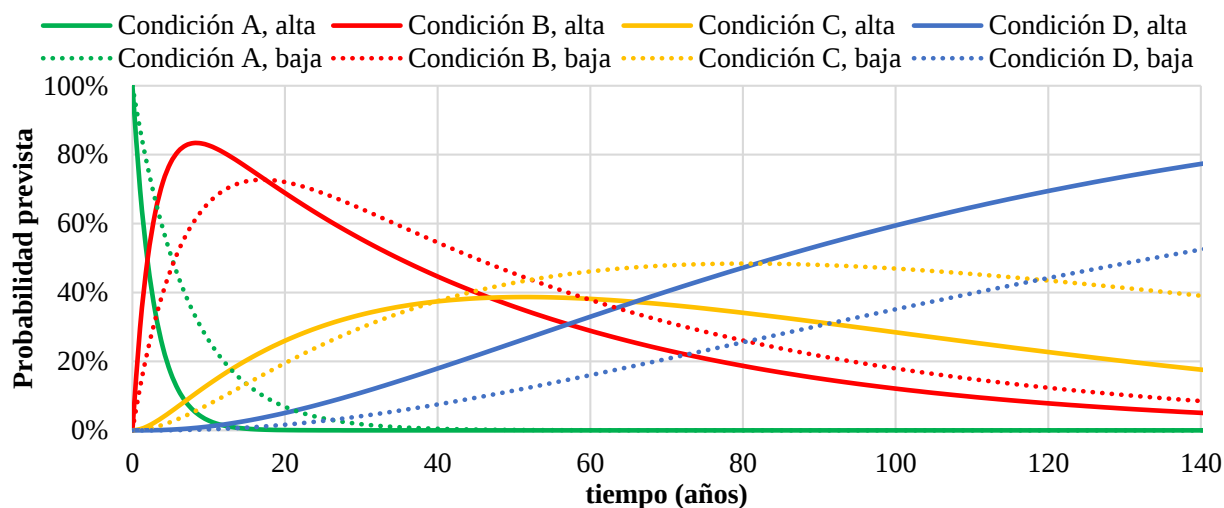


Figura 6. Distribución probabilística de la condición de la degradación en el tiempo, función del grado de exposición a la humedad

5.4 Proximidad del mar

La “Figura 7” presenta la distribución probabilística de la condición de la degradación en el transcurso del tiempo, función de la proximidad del mar. La probabilidad y tiempo de permanencia en la condición más favorable (A) son prácticamente los mismos para las fachadas ubicadas más de 5km y menos de 5km del mar. Para fachadas localizadas en la zona costera, las máximas probabilidades de pertenencia a la condición B es de 71,7% en el año 10 y a la condición C es de

43,1% en el año 43. Los revestimientos ubicados a 5km o más del mar alcanzan una máxima probabilidad de pertenencia a la condición B de 84,6% en el año 13 en una máxima probabilidad de pertenencia a la condición C de 41,3% entre los años 92 y 94.

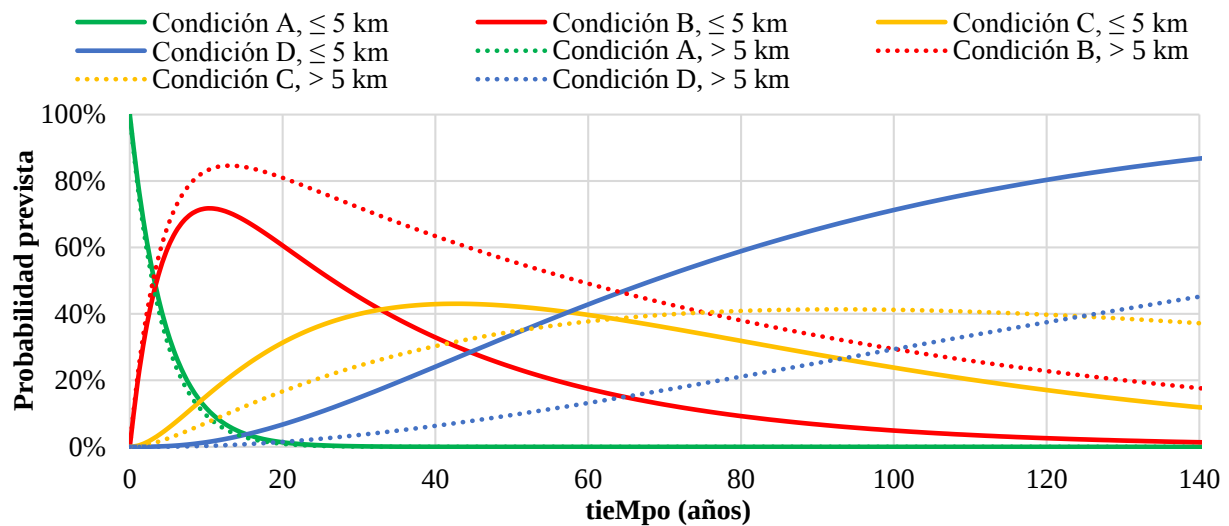


Figura 7. Distribución probabilística de la condición de la degradación en el tiempo, función da proximidad del mar

6. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

En la “Tabla 4” se presenta la probabilidad de pertenencia a cada condición de degradación para los revestimientos en piedra natural, función de las variables consideradas. Los resultados obtenidos son coherentes y creíbles desde un punto de vista físico, permitiendo las conclusiones principales siguientes:

- los revestimientos de granito presentan una probabilidad de 94,4% de pertenencia a las condiciones de degradación más favorables (A y B) y una probabilidad nula de pertenencia a la condición D; los revestimientos de mármol son los que presentan una más grande probabilidad de alcanzaren el nivel de degradación más desfavorable; estos datos confirman los resultados obtenidos en estudios anteriores, que indican que los revestimientos de granito son los más durables, alcanzando el fin de su vida útil más tarde, seguidos de los revestimientos calcáreos e de los mármoles (cuyo máximo límite de degradación se alcanza más temprano);
- los revestimientos con placas en piedra de dimensiones medianas tienen menor probabilidad de pertenencia a condiciones de degradación más graves si comparados con revestimientos con placas en piedra de grandes dimensiones; se confirma así la tendencia de los revestimientos con placas de piedra con dimensiones más grandes de presentaren índices de degradación más elevados, por causa de una más grande concentración de tensiones en el sistema de revestimiento y de un más elevado peso propio (Silva et al., 2012);
- los revestimientos con alta exposición a la humedad tienen más grande probabilidad de pertenencia a la más elevada condición de degradación ($P = 14,3\%$, mientras se obtiene $P = 9,2\%$ para revestimientos con baja exposición); los revestimientos con alta exposición también presentan una más grande probabilidad (aunque poco significativa) de pertenencia a condiciones más favorables (A y B);

- los revestimientos localizados a 5km o más del mar tienen más grande probabilidad de pertenencia a las condiciones de degradación A y B ($P = 68,6\%$, mientras se obtiene $P = 51,9\%$ para aquellos ubicados a menos de 5km); los revestimientos en zona de costa presentan una probabilidad de pertenencia a la condición de degradación más grave de $P = 26\%$, lo que es substancialmente más alto do que la do los revestimientos lejos de la costa ($P = 2,5\%$), lo que revela que, tal como esperado, los revestimientos más cercanos de las zonas de costa presentan niveles de degradación más altos.

Tabla 4. Probabilidad de pertenencia a cada condición de degradación, función de las variables consideradas

Variables consideradas		Probabilidad de pertenencia a cada condición de degradación			
		Condición A	Condición B	Condición C	Condición D
Tipo de piedra	Calcáreo	4,2%	45,8%	38,9%	11,1%
	Granito	5,6%	88,9%	5,6%	0%
	Mármol	3,9%	42,9%	33,8%	19,5%
Dimensión de la placa	Medianas	6,2%	65,1%	24,8%	3,9%
	Grandes	1,4%	40,5%	33,8%	24,3%
Exposición a la humedad	Alta	6,0%	60,7%	19,0%	14,3%
	Baja	3,4%	52,9%	34,5%	9,2%
Proximidad del mar	Hasta 5km	7,8%	44,2%	22,1%	26,0%
	> 5km	2,5%	66,1%	28,9%	2,5%

Los límites superior e inferior de las condiciones C y D corresponden respectivamente al límite máximo admisible de degradación, que se asume en esto estudio como el fin de la vida útil de los revestimientos de fachada. Así, la máxima probabilidad de transición entra la condición C y la condición D marca el instante con más grande probabilidad de ser alcanzar el final de la vida útil de los revestimientos en piedra. Para la muestra global, este instante se da entre los años 103 y 104. En lo que respecta al tipo de piedra, máxima probabilidad de transición entra la condición C y la condición D ocurre: sobre el año 109, para los revestimientos calcáreos, entre los años 77 y 78, para los mármoles; y entre los años 131 y 132 para los revestimientos de granito. Los resultados indican que los granitos son el tipo de piedra más durable, seguidos de los calcáreos y de los mármoles; esta conclusión confirma un estudio realizado por Schouenborg et al. (2007), en el que se analizan 200 edificios, se testa la resistencia mecánica de la piedra natural, a través de ensayos de laboratorio e *in situ*, y se obtienen resultados semejantes. Los revestimientos con placas de piedra de dimensiones medianas cambian del nivel C para el D bastante más tarde (entre los años 121 y 122) que los revestimientos con placas de grandes dimensiones (entre los años 73 y 74). De hecho, los revestimientos con placas de grandes dimensiones alcanzan más rápidamente el fin de su vida útil ya que cuanto más grandes las dimensiones de las placas de piedra, menor es el área ocupada por las juntas, lo que puede originar una más grande concentración de tensiones; por otro lado, placas de más grande dimensión corresponden a elementos más pesados, lo que exige igualmente más grandes espesuras de placa para evitar su fractura luego en la fase de transporte y colocación en obra (Silva et al., 2012). En lo que respecta al grado de exposición a la humedad, la transición entre las condiciones C y D tiene más grande probabilidad de darse entre los años 65 y 66, para revestimientos con alta exposición, y entre los años 118 y 119, para revestimientos con baja exposición, lo que confirma la tendencia de una más rápida degradación de los revestimientos con

alto grado de exposición. Para los revestimientos en zonas de costa, la transición entre condiciones B y C tiene más grande probabilidad de darse entre los años 32 y 33, mientras la transición entre las condiciones C y D ocurre con más probabilidad entre los años 57 y 58. Ya los revestimientos localizados lejos de la costa (más de 5km) tienen más grande probabilidad de transición entre las condiciones B y C entre los años 75 y 76 y una más grande probabilidad de transición entre las condiciones C y D entre los años 124 y 125. Los revestimientos en zonas de costa son más propensos a más elevados índices de degradación debido a su exposición a vientos que contienen sales marinos nocivos para la piedra natural.

La distribución de probabilidad de la condición de degradación de los revestimientos en piedra en el transcurso del tiempo puede también ser interpretada como un modo de evaluación de riesgo del desempeño de las fachadas debido al proceso de su degradación. Así, definiendo el límite de riesgo que considera aceptable, cualquier actor / decidor en el proceso constructivo puede visualizar las necesidades de reparación basadas en el análisis probabilística de un conjunto de datos. Para ilustrar esto concepto, puede considerarse que las probabilidades “alta”, “mediana” y “baja” de pertenencia a una dada condición corresponden a un riesgo “alto”, “mediano” y “bajo” asociado a las consecuencias de los fallos detectados y al coste de reparación, lo que permite una indicación de la urgencia de las acciones de mantenimiento y reparación. Se considera que un riesgo bajo (no son requeridas acciones sino una monitorización de la evolución de la degradación de la fachada) corresponde a $P > 75\%$ de pertenencia a las condiciones A o B. Un riesgo alto (necesaria una reparación generalizada) corresponde a $P > 25\%$ de pertenencia a la condición “D”; y un riesgo mediano corresponde a las situaciones intermedias. Con base en los resultados obtenidos y en función de los presupuestos anteriormente asumidos, se puede hacer algunas recomendaciones: i) los revestimientos en piedra deben de ser monitorizados antes de los 20 años; ii) deben de ser realizados trabajos de reparación antes de los 70 años; iii) a partir de los 70 años, si no hay intervención, se puede considerar la substitución de los revestimientos.

7. CONCLUSIÓN

En la modelación de la vida útil, es relevante conocer a la tasa de transición entre estados de degradación, antever el comportamiento del elemento en estudio y prever el momento a partir del que él no dará respuesta a las exigencias para las que ha sido proyectado.

En el presente estudio, el desempeño futuro de los revestimientos en piedra es previsto a través de la utilización de las cadenas de Markov, que corresponden a un modelo estocástico con ancha utilización en el dominio de la modelación de la durabilidad, que necesita de poca información en su calibración. Los modelos propuestos en este estudio consiguen fornecer indicaciones relativas a un proceso complejo, como lo es la degradación de las fachadas, y dan información relativa a la sinergia entre los agentes de degradación (como es el caso de las condiciones de exposición ambiental) y las condiciones o niveles de degradación. Además, el presente estudio nos da información relativa a la distribución probabilística de la condición de los revestimientos en el transcurso del tiempo (y función de sus características más relevantes), así como el conocimiento del tiempo medio de permanencia en cada nivel de condición de degradación hasta la transición para la condición siguiente y la indicación de los efectos de la degradación en la durabilidad de los revestimientos pétreos. Esta información es útil en la definición (de un modo racional y técnicamente informado) de un abanico de estrategias de mantenimiento en el ciclo de vida del edificio. Los modelos estocásticos, como las cadenas de Markov, fornecen información crucial en el contexto de las premios de seguros, porque permiten la evaluación del riesgo de fallo en los revestimientos y permiten estimar el instante más probable para la rotura de los elementos de la construcción, de acuerdo con sus características.

8. REFERENCIAS

- Balaras, A., Droutsa, K., Dascalaki, E., Kontoyiannidis S. (2005) “*Deterioration of European apartment buildings*”, Energy and Buildings, Vol. 37, No. 5, pp. 515-527.
- Basso, N., Garavaglia, E., Sgambi, L. (2012) “*Selective maintenance planning based on a Markovian approach*”, IALCCE - International Association for life-cycle Civil Engineering, 3rd International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Vienna, Austria, pp. 435-441.
- Carrington, P.J., Scott, J., Wasserman, S. (eds.) (2005) “*Models and methods in social network analysis*” (New York, USA, Cambridge University Press).
- Fletcher, R., Powell, M.J.D. (1963) “*A rapidly convergent descent method for minimization*”, Computer Journal, V. 6, pp. 163-168.
- Frangopol, D.M., Kallen, M.-J., Noortwijk, J.M.V. (2004) “*Probabilistic models for life-cycle performance of deteriorating structures: review and future directions*”, Progress in Structural Engineering and Materials, Vol. 6, No. 4, pp. 197-212.
- Higham, D., Higham, N. (2005) “*MATLAB guide*” (Philadelphia, USA, Society for Industrial Mathematics).
- Kalbfleisch, J.D., Lawless, J.F. (1985) “*The analysis of panel data under a Markov assumption*”, Journal of the American Statistical Association, Vol. 80, No. 392, pp. 863-871.
- Koch, A., Siegesmund, S. (2004) “*The combined effect of moisture and temperature on the anomalous expansion behaviour of marble*”, Environmental Geology, Vol. 46, No. 3-4, pp. 350-363.
- Moser, K. (2003) “*Engineering design methods for service life planning - State of the art*”, International Workshop on Management of Durability in the Building Process, Politecnico di Milano, Milan, Italy, paper 40.
- Neves, L. C., Frangopol, D. M., Cruz, P. J. S. (2006) “*Lifetime multi-objective optimization of maintenance of existing steel structures*”, 6th International Symposium Steel Bridges, European Convention for Construction Steelwork, Prague, Czech Republic, pp. 206-215.
- Schouenborg, B., Grelk, B., Malaga, K. (2007) “*Testing and assessment of marble and limestone (TEAM) - Important results from a large European research project on cladding panels*”, ASTM International, Vol. 4, No. 5, pp. 10-22.
- Shohet, I., Rosenfeld, Y., Puterman, M., Gilboa, E. (1999) “*Deterioration patterns for maintenance management - a methodological approach*”, 8th DBMC, Conference on Durability of Building Materials and Components; Ottawa, Canada, pp.1666-1678.
- Silva, A., Brito, J. de, Gaspar, P. L. (2012) “*Application of the factor method to maintenance decision support for stone cladding*”, Automation in Construction, Vol. 22, pp. 165-174.
- Straub, A. (2003) “*Using a condition-dependent approach to maintenance to control costs and performances*”, Facilities Management, Vol. 1, No. 4, pp. 380-395.