



Análise probabilística da evolução da degradação de revestimentos pétreos com utilização de cadeias 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 Julio de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 18 de Septiembre 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.

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.

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.

Autor de correspondencia: Jorge de Brito

© 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.

1. INTRODUÇÃO

A degradação é um processo complexo e dinâmico, em que os agentes e mecanismos de degradação actuam sinergicamente e estão em constante permutação. Os estados actual e futuro das construções têm associados vários graus de incerteza. Para tentar superar esta dificuldade, é por vezes necessário recorrer a uma abordagem estocástica na previsão da vida útil (Frangopol et al., 2004). Regra geral, este tipo de abordagem tem uma elevada complexidade e assenta na premissa de que a deterioração é um processo regido por variáveis aleatórias (Moser, 2003). Assim, a degradação pode ser vista como um processo contínuo de perda de desempenho, que evolui probabilisticamente ao longo do tempo. O fenómeno de degradação pode ainda ser descrito como a transição entre estados de condição, caracterizados por diferentes níveis de degradação (Basso et al., 2012). As cadeias de Markov são um dos métodos que permite avaliar, estocasticamente, a condição futura dos revestimentos de fachada. As cadeias de Markov simulam a evolução do estado de degradação das construções, permitindo definir a probabilidade do desempenho futuro de um elemento da construção com base apenas no seu desempenho actual, ignorando a história de deterioração e de manutenção do elemento construtivo, a sua idade, além de outros parâmetros (Neves et al., 2006). No presente estudo, é aplicado um modelo baseado nas cadeias de Markov à previsão da vida útil dos revestimentos pétreos, permitindo analisar a distribuição probabilística de cada uma das condições de degradação ao longo do tempo (assim como o tempo médio de permanência em cada condição de degradação). Além disso, é analisada a influência de algumas características dos revestimentos na evolução do seu processo de degradação. Este tipo de modelo é crucial no âmbito da manutenção do património edificado, porque fornece dados relativos ao instante mais provável para a falha dos revestimentos em função das suas características, assim como as idades onde é extremamente improvável que se dê a rotura destes elementos, englobando a noção de risco associado à falha dos revestimentos, possibilitando assim a definição informada de planos de manutenção e de períodos de garantia e de cobertura por parte das seguradoras.

2. DEGRADAÇÃO DOS REVESTIMENTOS PÉTREOS

As cadeias de Markov baseiam-se num conjunto de estados discretos que caracterizam o desempenho das construções. Existem diversos métodos de avaliação do estado de degradação dos edifícios e seus componentes, que variam de acordo com a classificação hierárquica dos elementos de construção, a classificação hierárquica das anomalias e a definição de parâmetros de condição associados às anomalias (Straub, 2003). Diversos autores estabeleceram sistemas de classificação das anomalias ou escalas de degradação com o intuito de exprimir a degradação visual e funcional dos elementos analisados (Balaras et al., 2005; Shohet et al., 1999); nestes sistemas inclui-se a classificação das anomalias através de uma escala de variáveis discretas que variam desde o nível de condição mais favorável (situações de ausência de degradação visível) até à situação mais desfavorável (degradação extensa ou perda de funcionalidade). No presente estudo, foi adoptada uma escala com 5 níveis de degradação (entre a condição A - sem degradação visível - e a condição E - degradação generalizada). Esta classificação relaciona o estado de degradação dos revestimentos pétreos e a avaliação física e visual das fachadas no momento da inspecção (“Tabela 1”).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No presente estudo, foram inspeccionados 203 revestimentos em pedra natural (fixada directamente ao suporte) em condições reais de utilização. Para isso, recorreu-se apenas a inspecções visuais, avaliando *in situ* as características dos revestimentos, o seu estado de conservação (em função da escala descrita na Tabela 1, que atribui aos revestimentos inspeccionados um dado nível de degradação em função da área de revestimento pétreo afectado por um dado conjunto de anomalias), das suas características de exposição ambiental e das condições de manutenção. A amostra analisada é composta por edifícios dos séculos XIX e XX, destinados a diferentes usos: habitação, comércio ou serviços. A amostra foi seleccionada aleatoriamente; no entanto, procurou-se obter uma amostra coerente e representativa do tipo de pedra natural presente nos revestimentos pétreos existentes em Portugal. Além disso, a amostra obtida apresenta uma extensa gama de idades, onde o edifício mais recente tem apenas 1 ano e o edifício mais antigo apresenta 82 anos, permitindo assim avaliar com maior rigor o processo de envelhecimento e degradação dos elementos analisados. No presente estudo, assume-se que a idade é dada pelo período de tempo que decorre desde a última reparação até à data da inspecção (uma vez que uma intervenção no revestimento deverá repor as características iniciais, reiniciando assim o seu processo de degradação, no que diz respeito a modelos de previsão da vida útil). Nesta amostra, nenhum dos casos de estudo pertence à condição de degradação mais desfavorável (condição E). A “Figura 1” procura ilustrar as diferentes condições de degradação caracterizadas na Tabela 1.



Figura 1. Condições de degradação dos revestimentos pétreos

Tabela 1. Níveis de degradação dos revestimentos em pedra natural

Degradação física e visual	Condição de degradação
Não apresenta degradação visível	Condição A
Anomalias visuais ou de degradação da superfície $\leq 15\%$ Anomalias de perda de integridade $\leq 20\%$	Condição B
Anomalias visuais ou de degradação da superfície $\leq 30\%$ Anomalias em juntas $\leq 30\%$ Anomalias na fixação ao suporte $\leq 20\%$ Anomalias de perda de integridade $\leq 20\%$	Condição C
Anomalias visuais ou de degradação da superfície $> 30\%$ Anomalias em juntas $> 30\%$ Anomalias na fixação ao suporte $> 20\%$ Anomalias de perda de integridade $\leq 20\%$	Condição D
Anomalias na fixação ao suporte $> 20\%$ Anomalias de perda de integridade $> 20\%$	Condição E

4. ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA DEGRADAÇÃO DOS REVESTIMENTOS PÉTREOS AO LONGO DO TEMPO

No presente estudo, recorre-se à função *fmincon* (*constrained nonlinear optimization*) presente no *software* MATLAB para obter a matriz intensidade (Q), que permite obter a transição entre estados de degradação, em função do estado original e da taxa de transição entre o estado actual e o estado futuro. Com base nas taxas de transição entre condições de degradação, a probabilidade de transição entre estados de degradação pode ser obtida de acordo com a equação diferencial de Chapman-Kolmogorov. A matriz intensidade é obtida através da maximização do algoritmo de verosimilhança (Carrington et al., 2005), tal como representado na equação (1), sendo, para isso, utilizado no presente estudo o algoritmo numérico de conjunto activo (*active-set numerical algorithm* presente na função *fmincon*) (Kalbfleisch e Lawless, 1985). No presente estudo, com o objectivo de melhorar a estabilidade do algoritmo de optimização, é maximizado o algoritmo de verosimilhança (Fletcher e Powell, 1963; Higham e Higham, 2005), tal como representado na equação (1). A matriz Q obtida para os revestimentos pétreos é dada pela equação (2).

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

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

Através da matriz intensidade (Q), é possível estimar o tempo de permanência em cada estado de degradação (“Figura 2”). Os revestimentos pétreos transitam mais rapidamente entre estados de condição mais favoráveis. Este resultado está directamente relacionado com a definição dos estados de degradação. É natural que a transição entre estados de degradação não seja feita de forma uniforme, uma vez que os estados de condição seguem uma escala que também não é constante. A condição A de degradação (mais favorável) corresponde a um revestimento pétreo sem deterioração e, portanto, para que um revestimento pétreo transite para a condição seguinte basta que apresente mudanças na uniformidade da superfície ou manchas pontuais. Parece, por isso, razoável que a transição da condição A para o estado de condição seguinte ocorra em média em apenas cerca de 4,5 anos.

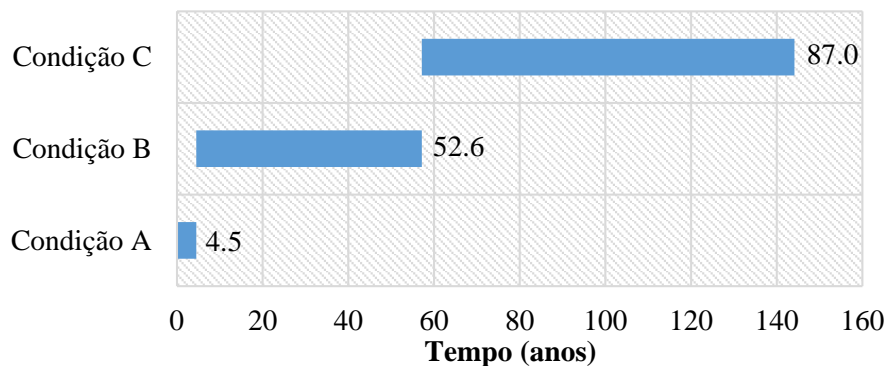


Figura 2. Representação do tempo médio de permanência em cada condição de degradação para os revestimentos pétreos

A distribuição probabilística da condição da degradação dos revestimentos pétreos ao longo do tempo é apresentada na “Figura 3”. A probabilidade de pertencer à condição A vai diminuindo ao longo do tempo, sendo praticamente nula (inferior a 2%) a partir do ano 8. A probabilidade máxima (79,2%) de pertencer à condição B de degradação ocorre ao ano 12, começando a decrescer a partir dessa idade. Quanto à condição C, é atingido um pico máximo de probabilidade de pertencer a esta condição entre os anos 71 e 73 (com uma probabilidade de 46,1%). No que diz respeito à condição D, a probabilidade de pertencer a esta condição vai aumentando ao longo do tempo, sendo inferior a 10% antes do ano 41, e superior a 60% a partir do ano 145.

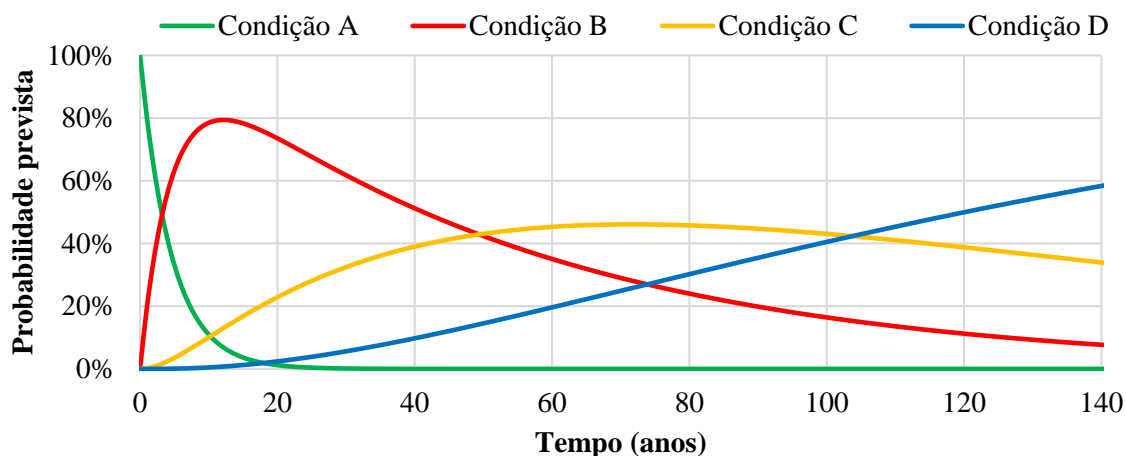


Figura 3. Distribuição probabilística da condição da degradação dos revestimentos pétreos ao longo do tempo

A “Tabela 2” apresenta a probabilidade dos revestimentos pétreos pertencerem a cada uma das condições de degradação em função da sua idade.

Tabela 2. Probabilidade de pertencer a cada um dos níveis de degradação em função da idade

Intervalo de anos	Probabilidade de pertencer a cada uma das condições			
	Condição A	Condição B	Condição C	Condição 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 os anos 3 e 4, a probabilidade de um revestimento pétreo pertencer às condições A e B é semelhante. Entre os anos 49 e 50, a probabilidade de pertencer à condição B é idêntica à de pertencer à condição C. Entre os anos 103 e 104, a probabilidade de pertencer à condição C é semelhante à de pertencer à condição D. Nestes intervalos de tempo, verifica-se uma maior probabilidade de transição entre as condições de degradação.

Para avaliar a eficácia do modelo obtido através das cadeias de Markov, compara-se o número de casos que pertencem a cada estado de degradação dados pelo modelo e observados em trabalho de campo (“Tabela 3”). O erro percentual obtido é relativamente baixo, dada a complexidade do fenómeno em análise.

Tabela 3 - Capacidade classificativa do modelo obtido através das cadeias de Markov para os revestimentos pétreos

Estado de degradação	Observado	Previsto	Erro percentual médio (%)
Condição A	9	12,096	34,40%
Condição B	114	105,419	7,53%
Condição C	57	63,959	12,21%
Condição D	23	21,527	6,41%

5. ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA DEGRADAÇÃO DOS REVESTIMENTOS PÉTREOS EM FUNÇÃO DAS SUAS CARACTERÍSTICAS

Algumas características dos revestimentos pétreos condicionam significativamente a sua durabilidade. Assim sendo, são definidos vários modelos de cadeias de Markov que analisam a probabilidade de pertencer a cada condição de degradação, ao longo do tempo e em função dessas características. São assim analisadas as variáveis: (a) tipo de pedra; (b) tipo de acabamento; (c) dimensão da placa pétrea; (d) exposição à humidade; (e) e proximidade do mar. A discussão dos resultados obtidos é realizada na secção 6, sendo tecidas algumas considerações relativamente à durabilidade dos revestimentos pétreos em função das suas características.

5.1 Tipo de pedra

Koch e Siegesmund (2004) referem que a durabilidade é um requisito fundamental a ter em consideração quando se especifica as pedras naturais a utilizar como material de revestimento, principalmente em revestimentos exteriores, expostos a agentes ambientais de degradação. É pois relevante analisar a influência do tipo de pedra na progressão da degradação dos revestimentos. Na “Figura 4”, é apresentada a distribuição probabilística da condição da degradação ao longo do tempo em função do tipo de pedra utilizada no revestimento. Os revestimentos em calcário são os que permanecem durante menos tempo na condição A de degradação; para os restantes tipos de pedra, o tempo de permanência nesta condição é semelhante. Quanto à condição B, em revestimentos em calcário, a probabilidade máxima ($P = 85,2\%$) de pertencerem a esta condição ocorre no ano 7; para os revestimentos em mármore, o pico de probabilidade máxima ($P = 73,7\%$) é atingido no ano 12 e para os revestimentos em granito, o pico de probabilidade máxima ($P = 83,5\%$) ocorre no ano 18. Relativamente ao nível C, os revestimentos em mármore atingem uma probabilidade máxima ($P = 44,7\%$) de pertencerem a esta condição entre os anos 55 e 56, os revestimentos em calcário atingem esse pico ($P = 52,5\%$) entre os anos 66 e 67 e os revestimentos em granito atingem o pico máximo de probabilidade ($36,7\%$) entre os anos 105 e 108 (significativamente mais tarde). A maior

probabilidade de transição entre as condições B e C ocorre: entre os anos 37 e 38, para os revestimentos em calcário; entre os anos 40 e 41, para os revestimentos em mármore; e entre os anos 106 e 108, para os revestimentos em granito.

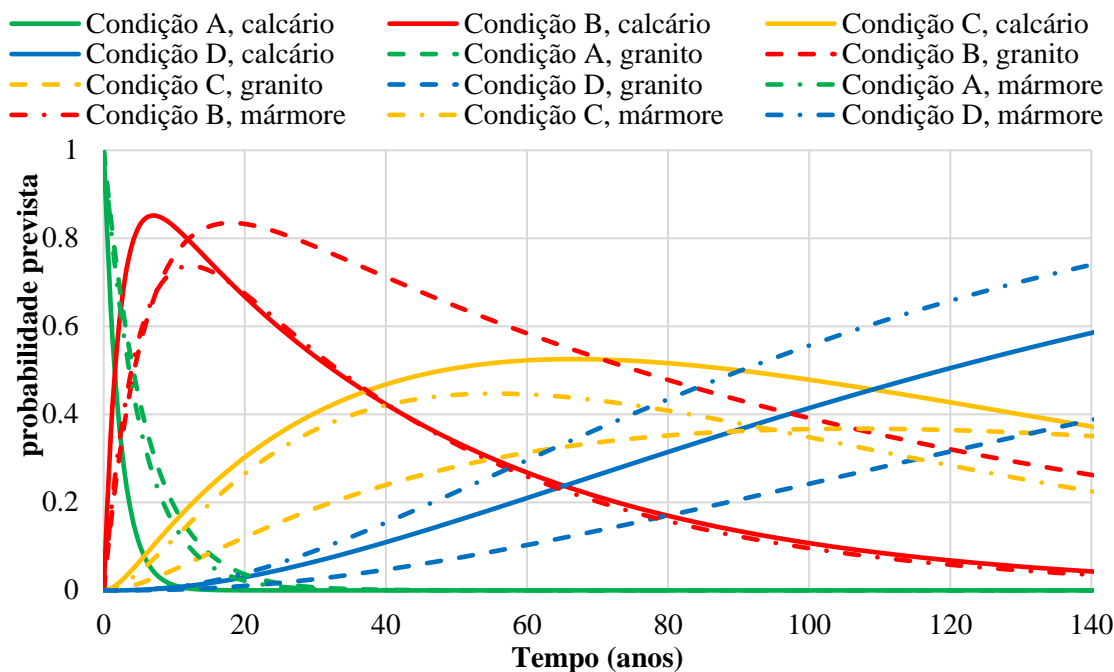


Figura 4. Distribuição probabilística da condição da degradação ao longo do tempo em função do tipo de pedra

5.2 Dimensão da placa pétrea

Na “Figura 5”, é apresentada a distribuição probabilística de pertencer a cada condição ao longo do tempo em função da dimensão da placa pétrea.

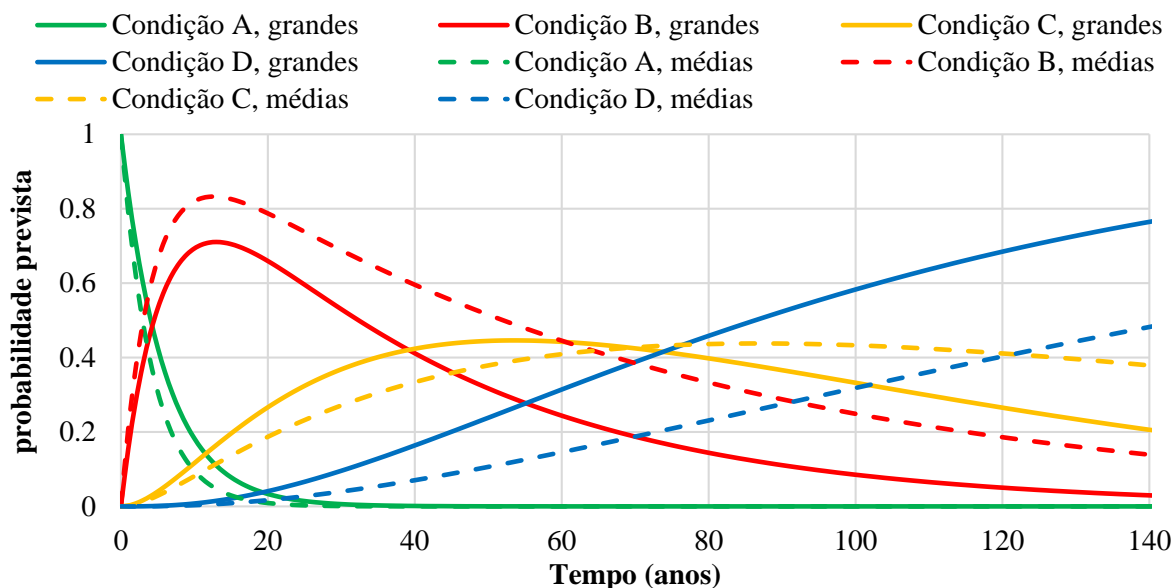


Figura 5. Distribuição probabilística da condição da degradação ao longo do tempo em função da dimensão da placa pétrea

Os revestimentos pétreos com placas de grandes dimensões ($A \geq 0,4 \text{ m}^2$) têm uma probabilidade máxima de pertencer à condição B por volta de 13 anos de idade ($P = 71,1\%$) e a probabilidade de pertencer à condição C atinge um pico máximo entre os anos 53 e 54 ($P = 44,6\%$). Estes revestimentos apresentam uma probabilidade máxima de transição entre as condições B e C entre os anos 39 e 40 e uma probabilidade máxima de transição entre as condições C e D entre os anos 73 e 74. Por sua vez, os revestimentos com placas pétreas de médias dimensões ($A < 0,4 \text{ m}^2$), apresentam uma probabilidade máxima de pertencer à condição B por volta de 13 anos de idade ($P = 83,2\%$) e a probabilidade de pertencer à condição C atinge um pico máximo entre os anos 86 e 88 ($P = 43,8\%$). Para estes revestimentos, a transição entre as condições B e C tem maior probabilidade de ocorrência entre os anos 64 e 65, enquanto a transição entre as condições C e D têm maior probabilidade de ocorrência entre os anos 121 e 122.

5.3 Exposição à humidade

Na “Figura 6”, é apresentada a distribuição probabilística de pertencer a cada condição ao longo do tempo em função da exposição à humidade. Na definição do nível de exposição à humidade dos revestimentos pétreos são consideradas duas categorias: (i) exposição baixa, para edifícios localizados em contexto urbano, a mais de 5 km do mar e sem influência de ventos dominantes; (ii) edifícios em zonas costeiras, sem protecção da acção combinada do vento e da chuva. Os revestimentos com exposição alta à humidade transitam mais rapidamente da condição mais favorável (condição A) para a condição seguinte. Para revestimentos com exposição alta à humidade, a probabilidade de pertencer à condição B atinge um pico máximo por volta do ano 8 ($P = 83,3\%$) e a probabilidade de pertencer à condição C atinge um pico máximo entre os anos 51 e 52 ($P = 38,7\%$). Os revestimentos com exposição baixa atingem uma probabilidade máxima ($P = 72,7\%$) de pertencer à condição B no ano 17 e uma probabilidade máxima ($P = 48,4\%$) de pertencer à condição C no ano 80.

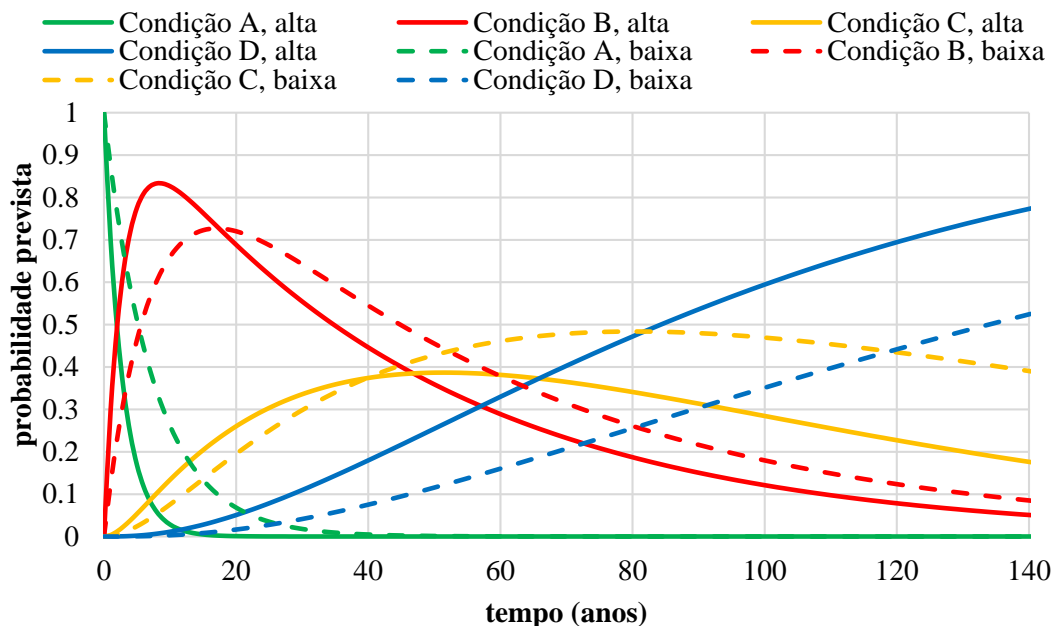


Figura 6. Distribuição probabilística da condição da degradação ao longo do tempo em função da exposição à humidade

5.4 Proximidade do mar

A “Figura 7” apresenta a distribuição probabilística da condição da degradação ao longo do tempo em função da proximidade do mar. A probabilidade e tempo de permanência na condição mais favorável (A) são praticamente os mesmos para as fachadas localizadas a mais de 5 km e a menos de 5 km do mar. Para fachadas na zona costeira, a probabilidade máxima de pertencerem à condição B é igual a 71,7% no ano 10 e a probabilidade máxima de pertencerem à condição C igual a 43,1% no ano 43. Os revestimentos localizados a mais de 5 km do mar têm uma probabilidade máxima de pertencerem à condição B igual a 84,6% no ano 13 e a probabilidade máxima de pertencerem à condição C igual a 41,3% entre os anos 92 e 94.

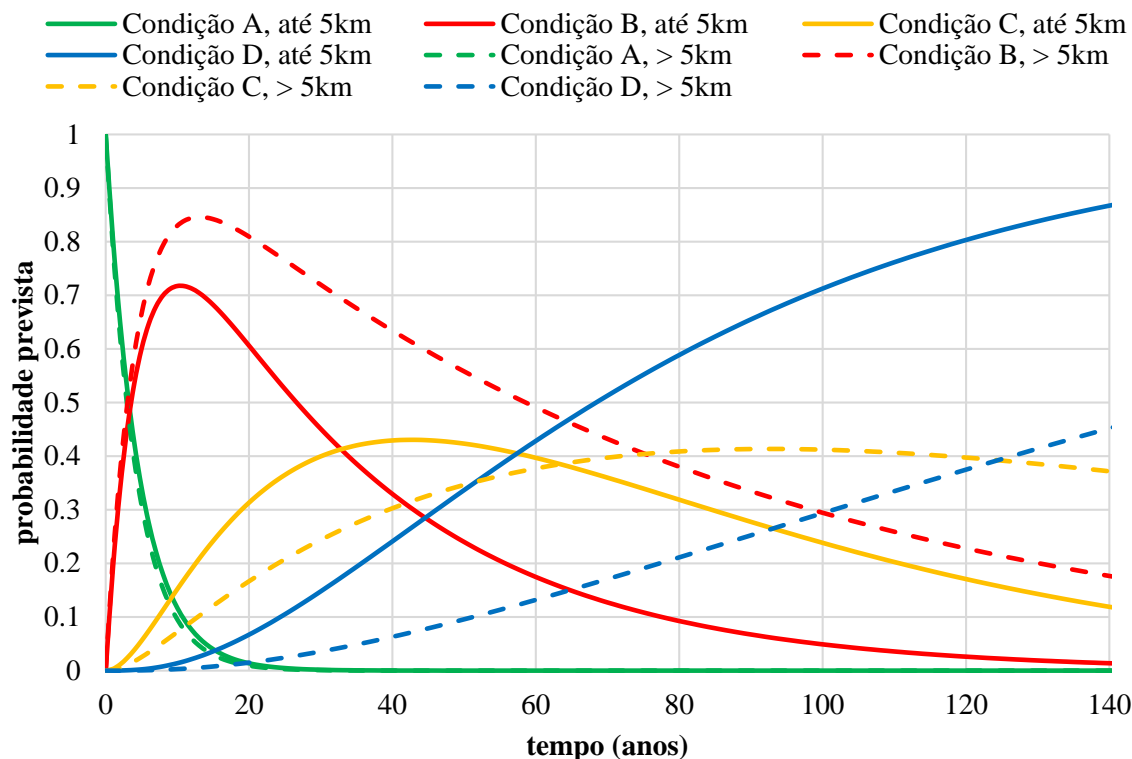


Figura 7. Distribuição probabilística da condição da degradação ao longo do tempo em função da proximidade do mar

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na “Tabela 4”, apresenta-se a probabilidade de cada revestimento de pedra natural pertencer a cada condição de degradação em função das variáveis consideradas. Os resultados obtidos são coerentes e fisicamente credíveis, obtendo-se as seguintes conclusões principais:

- os revestimentos em granito apresentam uma probabilidade de 94,4% de pertencerem às condições de degradação mais favoráveis (A e B), com uma probabilidade nula de pertencer à condição D; os revestimentos em mármore são os que apresentam menor probabilidade de pertencer às condições mais favoráveis e uma maior probabilidade de possuírem a condição de degradação mais desfavorável; estes dados confirmam os resultados obtidos em estudos anteriores, que indicam que os revestimentos em granitos são os mais duráveis, atingindo o fim da vida útil mais tarde, seguidos dos revestimentos em calcário e dos revestimentos em mármore (cujo limite máximo de degradação é atingido mais cedo);

- os revestimentos com placas pétreas de médias dimensões têm menor probabilidade de pertencer a condições de degradação mais graves quando comparados com revestimentos com placas pétreas de grandes dimensões; confirmando assim a tendência de os revestimentos com placas pétreas de grandes dimensões apresentarem índices de degradação mais elevados, devido a uma maior concentração de tensões no sistema de revestimento, aliado a um peso próprio mais elevado (Silva et al., 2012);
- os revestimentos com exposição alta à humidade têm maior probabilidade de pertencer à condição mais elevada de degradação ($P = 14,3\%$, por oposição a $P = 9,2\%$ para revestimentos com exposição baixa); os revestimentos com exposição alta também apresentam maior probabilidade (ainda que pouco significativa) de pertencer a condições mais favoráveis (A e B);
- os revestimentos localizados a mais de 5 km do mar têm maior probabilidade de pertencer às condições de degradação A e B ($P = 68,6\%$, por oposição a $51,9\%$ para revestimentos a menos de 5 km); os revestimentos em zonas costeiras têm uma probabilidade de pertencer à condição mais grave de degradação de $P = 26\%$, substancialmente maior do que a dos revestimentos longe da costa ($P = 2,5\%$), revelando assim que, tal como seria esperado, os revestimentos mais próximos da zona costeira apresentam níveis de degradação mais acentuados.

Tabela 4. Probabilidade de pertencer a cada condição de degradação em função das variáveis consideradas

Variáveis consideradas		Probabilidade de pertencer a cada condição de degradação			
		Condição A	Condição B	Condição C	Condição D
Tipo de pedra	Calcário	4,2%	45,8%	38,9%	11,1%
	Granito	5,6%	88,9%	5,6%	0%
	Mármore	3,9%	42,9%	33,8%	19,5%
Dimensão da placa pétrea	Médias	6,2%	65,1%	24,8%	3,9%
	Grandes	1,4%	40,5%	33,8%	24,3%
Exposição à humidade	Alta	6,0%	60,7%	19,0%	14,3%
	Baixa	3,4%	52,9%	34,5%	9,2%
Proximidade do mar	Até 5km	7,8%	44,2%	22,1%	26,0%
	> 5km	2,5%	66,1%	28,9%	2,5%

Os limites superior e inferior das condições C e D correspondem, respectivamente, ao limite máximo de degradação admissível, assumido no presente estudo como correspondendo ao fim da vida útil dos revestimentos de fachada. Assim sendo, a máxima probabilidade de transição entre a condição C e a condição D marca o instante com maior probabilidade de ser atingido o fim da vida útil dos revestimentos pétreos. Para a amostra global, a máxima probabilidade de transição entre as condições C e D ocorre entre os anos 103 e 104. No que diz respeito ao tipo de pedra, a maior probabilidade de transição entre as condições C e D ocorre: por volta do ano 109, para os revestimentos em calcário; entre os anos 77 e 78, para os revestimentos em mármore; e entre os anos 131 e 132 para os revestimentos em granito. Os resultados indicam que os granitos são o tipo de pedra mais durável, seguidos dos calcários e dos mármore; esta conclusão vem ao encontro de um estudo realizado por Schouenborg et al. (2007), que analisa 200 edifícios, testando a resistência mecânica da pedra natural, através de ensaios laboratoriais e *in situ*, e obtendo resultados semelhantes. Os

revestimentos com placas pétreas de médias dimensões transitam entre os níveis C e D substancialmente mais tarde (entre os anos 121 e 122) do que os revestimentos com placas de grandes dimensões (entre os anos 73 e 74). Quanto à exposição à humidade, a transição entre as condições C e D tem maior probabilidade de ocorrência entre os anos 65 e 66 para revestimentos com exposição alta e entre os anos 118 e 119 para revestimentos com exposição baixa, confirmando assim a tendência dos revestimentos com exposição alta se degradarem mais rapidamente. No que concerne à proximidade do mar, para revestimentos em zonas costeiras, a transição entre as condições B e C tem maior probabilidade de ocorrência entre os anos 32 e 33, enquanto a transição entre as condições C e D tem maior probabilidade de ocorrência entre os anos 57 e 58. Já os revestimentos afastados da costa (a mais de 5 km) têm maior probabilidade de transição entre as condições B e C entre os anos 75 e 76 e uma maior probabilidade de transição entre as condições C e D entre os anos 124 e 125. Os revestimentos em zonas costeiras são mais propensos a possuírem índices de degradação mais severos devido à exposição a ventos que contêm sais marinhos nocivos à pedra natural.

A distribuição de probabilidade da condição de degradação dos revestimentos pétreos ao longo do tempo pode também ser interpretada como uma avaliação do risco de as fachadas não actuarem como seria esperado devido ao processo de degradação. Deste modo, ao definir o limite de risco aceitável, qualquer interveniente / decisor no processo construtivo pode visualizar a necessidade de reparação baseada na análise probabilística de um conjunto de dados. Para ilustrar este conceito, pode-se considerar que a “alta”, “média” e “baixa” probabilidade de pertencer a uma dada condição corresponde a um “alto”, “médio” e “baixo” risco associado às consequências das anomalias detectadas e ao custo de reparação, fornecendo assim uma indicação da urgência das acções de manutenção e reparação. Considera-se que um risco baixo (nenhuma acção é necessária para além da monitorização da evolução da degradação da fachada) corresponde a $P > 75\%$ de pertencer às condições A ou B. Considera-se que um risco alto (necessita de uma reparação generalizada) corresponde a $P > 25\%$ de pertencer à condição “D” e um risco médio corresponde às situações intermédias. A partir da interpretação dos resultados obtidos e em função dos pressupostos assumidos anteriormente, podem ser feitas algumas recomendações: i) os revestimentos pétreos devem ser monitorizados antes dos 20 anos; ii) devem realizar-se trabalhos de reparação antes dos 70 anos; iii) a partir dos 70 anos deve começar a ser considerada a substituição dos revestimentos.

7. CONCLUSÃO

Em modelos de previsão da vida útil, é relevante conhecer a taxa de transição entre estados de degradação, antevendo o comportamento do elemento em estudo e prevendo o momento a partir do qual ele será incapaz de dar resposta às exigências para as quais foi projectado.

No presente estudo, o desempenho futuro dos revestimentos pétreos é previsto através da utilização das cadeias de Markov, correspondendo a um modelo estocástico amplamente empregue no domínio da modelação da durabilidade, que necessita de pouca informação na sua calibração. Os modelos propostos no presente estudo são capazes de fornecer indicações relativas a um processo complexo como é a degradação das fachadas, dando informação relativa à sinergia entre os agentes de degradação (como é o caso das condições de exposição ambiental) e as condições ou níveis de degradação. Além disso, o presente estudo fornece informação relativa à distribuição probabilística da condição dos revestimentos ao longo do tempo (e em função das suas características mais relevantes), assim como o conhecimento do tempo médio de permanência em cada condição de degradação até à transição para a condição seguinte e a indicação dos efeitos da degradação na durabilidade dos revestimentos pétreos. Esta informação é útil na definição (de forma racional e tecnicamente informada) de um conjunto de estratégias de manutenção ao longo do ciclo de vida do

edifício. Quando este tipo de informação está disponível para vários componentes do edifício, é possível definir estratégias conjuntas de manutenção para as diferentes partes do edifício. Modelos estocásticos, como as cadeias de Markov, fornecem informação crucial no contexto das apólices de seguro, uma vez que permitem a avaliação do risco de falha dos revestimentos, permitindo avaliar o instante mais provável para a rotura dos elementos da construção de acordo com as suas características.

8. REFERÊNCIAS

- 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., Grell, 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.