MODELO DE DETERIORAÇÃO DE ESTRUTURAS BASEADO EM CADEIAS DE MARKOV APLICADO AO BANCO DE DADOS DO DNIT

STRUCTURES DETERIORATION MODEL BASED ON MARKOV CHAINS APPLIED TO THE DNIT DATABASE

Paulo Fernando Matos de Santana - pfmsdemolay@gmail.com - https://orcid.org/0000-0002-6312-9931

Breno Hvala de Figueiredo - brenofig@gmail.com - https://orcid.org/0000-0001-7357-4353

Rafael Salles Pereira - rafasallesp@gmail.com - https://orcid.org/0000-0002-5749-8263

Jorge Martins Sarkis - jmsarkis@gmail.com - https://orcid.org/0009-0006-3100-6415

Cintia Adriana Azevedo de Liz Anhaia - cintializ@engefoto.com.br - https://orcid.org/0000-0003-4859-3960

RESUMO: O Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais (SGO) do DNIT contempla, atualmente, funcionalidades de consulta, cadastro de OAEs e registro de inspeções. No contexto da gerência de estruturas, o conhecimento da taxa de deterioração e a capacidade de previsão do estado de condição futuro dos ativos auxilia na tomada de decisão quanto ao planejamento das atividades de manutenção, visando atender aos requisitos de desempenho estabelecidos pela administradora do parque de obras. Considerando a inexistência de um modelo de deterioração de estruturas implantado no SGO, este trabalho visa apresentar, de forma prática, os resultados da aplicação do modelo de deterioração baseado na teoria estocástica das Cadeias de Markov aos dados do referido sistema. Dois ciclos de inspeções foram utilizados para compor inicialmente o modelo. São apresentadas as etapas de checagem dos dados, aferição da acurácia do modelo por meio da variância do método de Markov e uma validação com base em estudos de referência na literatura. A aplicação do modelo de deterioração aos dados do DNIT apresentou bons resultados preditivos para o estado de condição do parque de obras, ainda que certos fatores afetem a acurácia do modelo. O estudo de validação apontou importantes semelhanças entre as curvas de deterioração estimadas, sobretudo com relação à idade das obras. Conclui-se, portanto, que a acurácia do modelo de deterioração tem relação direta com a dimensão do banco de dados de avaliação das estruturas, tendendo a aperfeiçoar-se conforme ocorra o enriquecimento de informações no banco de dados com novas inspeções.

PALAVRAS-CHAVE: estruturas; modelo de deterioração; cadeias de Markov; gerência de estruturas.

ABSTRACT: *The bridge management system of the National Department of Transport Infrastructure (DNIT) called SGO currently includes query functionalities, structures, and inspection registration. In the context of structure management, knowing the bridge's deterioration rate and being able to predict the assets' future condition state help in decision-making regarding the maintenance activities planning, aiming to meet the agency's performance requirements. Considering the non-existence of a deterioration model implemented in the SGO, this paper aims to present, in a practical way, the application results of the deterioration model based on the stochastic theory of Markov Chains. Two cycles of inspections were used to initially compose the model. The stages of data checking, model*

Submetido em 26/05/2023 e aceito em 14/08/2023.

https://doi.org/10.70859/2764-9539.v2.n2.45

accuracy measurement through the variance of the Markov method, and validation based on reference studies in the literature are presented. The application of the deterioration model to the DNIT database showed good predictive results for the bridge's stock condition state, even though certain factors affect the model's accuracy. The validation study pointed out important similarities between the estimated deterioration curves, especially concerning the age of the structures. It is concluded, therefore, that the accuracy of the deterioration model is directly related to the size of the database for evaluating structures, tending to improve as new inspection data arrive.

KEYWORDS*: *structures; deterioration model; Markov chains; structures management.

1 INTRODUÇÃO

O gerenciamento de Obras de Arte Especiais (OAEs) é um processo abrangente que associa atividades de planejamento, inspeção, avaliação e manutenção de estruturas aos recursos anuais disponíveis e objetivos a longo prazo para manter e ampliar o parque de obras existente, considerando, ainda, as necessidades dos usuários (Austroads, 2018).

Um sistema de gerenciamento de estruturas é, portanto, uma ferramenta computacional que auxilia a coleta e o armazenamento de dados (inventário e avaliação), dotada de funcionalidades analíticas e de apoio à tomada de decisão. Com esta ferramenta, um gestor pode realizar análises técnicas de priorização das atividades de manutenção, ampliação e reconstrução de estruturas de forma sistemática e, sempre que possível, automatizada.

No âmbito do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), em 1993 foi desenvolvido o Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais (SGO). Nos anos subsequentes, foram registradas as inspeções e avaliações de 1.000 OAEs localizadas em importantes rodovias federais do Brasil. Atualizações posteriores no sistema gerenciador de banco de dados, linguagem de programação, recursos de multimídia e geoprocessamento tornaram o SGO uma ferramenta ágil e prática para o cadastro de estruturas, inspeções e consultas de natureza técnica e gerencial (Melo *et al*., 2004).

Segundo Woodward *et al*. (2001), os principais objetivos do gerenciamento de Obras de Arte Especiais são: garantir a segurança de todos os usuários da rede viária e de terceiros; assegurar um determinado nível de serviço para cada estrutura; e assegurar a conservação do patrimônio a longo prazo. A garantia da segurança é obtida por meio do planejamento otimizado das atividades de manutenção. Assegurar um determinado nível de serviço para um parque de obras e a conservação deste patrimônio a longo prazo envolve o conhecimento dos fatores que influenciam no processo de deterioração dos materiais constituintes das obras.

Entende-se por deterioração em estruturas o processo de degradação dos materiais de construção, medido por indicadores que comparam as condições atuais da estrutura com os seus requisitos de funcionamento, determinados pelo órgão administrador. No caso do DNIT, as premissas para a atribuição da Nota Técnica, principal indicador de estado de condição das estruturas nas inspeções, são dispostas na Norma DNIT 010-PRO (2004).

O decaimento do estado de condição de uma estrutura ao longo do tempo pode ocorrer devido à ação do tráfego e/ou do meio ambiente, assim como por mudanças físicas e/ou químicas nas

propriedades mecânicas dos componentes da estrutura. Desse modo, o conhecimento das taxas de deterioração e a previsão de estados futuros podem fornecer subsídios fundamentais para a tomada de decisão dos gestores de obras de infraestrutura de transportes.

Na gestão desses ativos, saber quando programar as intervenções que serão necessárias no futuro depende da habilidade em predizer tais ações. Essa estimativa pode ser baseada no conhecimento empírico e na experiência de profissionais da área ou em modelos matemáticos de deterioração de estruturas. Evidentemente, os modelos matemáticos se destacam, uma vez que suas rotinas podem ser sistematizadas e teorias matemáticas são capazes de lidar com características aleatórias e temporais com maior precisão, se comparados à capacidade de generalização advinda da experiência de trabalho de um profissional.

O uso de dados experimentais é a característica principal dos modelos de deterioração de estruturas de natureza empírica, enquanto modelos mecanicistas são desenvolvidos a partir de teorias matemáticas (Oliveira, 2019). Dentre esses, classificam-se em determinísticos, estocásticos e de inteligência artificial (Setunge; Hasan, 2011).

Os modelos determinísticos se utilizam de teorias estatísticas como a regressão, ou mínimos quadrados, que procuram descrever tendências a partir de dados históricos do inventário de obras. Dentre os modelos de regressão, a aproximação linear é a mais simples. No entanto, a depender do comportamento das variáveis do problema, o modelo pode não apresentar extrapolações acuradas. As regressões não lineares, como polinomial, exponencial e logarítmica, podem apresentar resultados mais aderentes se comparadas às saídas do modelo de regressão linear.

Por outro lado, segundo Oliveira (2019), os modelos estocásticos, ou probabilísticos, são alimentados com variáveis randômicas de entrada, atribuindo-se probabilidades da ocorrência de determinado estado de condição no universo amostral. A autora destaca ainda que os modelos probabilísticos produzem uma previsão futura do índice de condição das estruturas que melhor representa as incertezas inerentes aos processos de deterioração, sendo esta a principal causa da prevalência da sua adoção nos sistemas de gerenciamento de OAEs, em detrimento do uso de modelos determinísticos. Outras metodologias utilizam processos de inteligência artificial (algoritmos genéticos, redes neurais, entre outros).

No conjunto de modelos estocásticos, destacam-se as Cadeias de Markov, pela sua utilização na implantação de modelos de deterioração de estruturas em *softwares* de gerenciamento de OAEs na América do Norte e Europa, como *AASHTOWare* (*Pontis*), *Bridgit*, *Ontario Bridge Management System* (OBMS) e GOA, respectivamente, em decorrência dos bons resultados na sua aplicação (Golabi e Shephard, 1997; Elbehairy, 2007).

Sendo assim, considerando a inexistência de um modelo de deterioração de estruturas implantado no SGO que viabilize análises preditivas acerca do estado de condição futuro do parque de obras do DNIT, este trabalho visa apresentar, com base em registros de inspeções do SGO, a estruturação necessária aos dados de entrada, aplicação e resultados do modelo de deterioração, baseado na teoria estocástica das Cadeias de Markov. As curvas de deterioração são analisadas à luz de pesquisas correlatas ao tema, de modo a validar a proposição de

utilização de um modelo probabilístico no estudo em questão.

2 METODOLOGIA

Os registros de inspeções cadastrais e rotineiras de um universo de 6.833 OAEs cadastradas no SGO foram extraídos do banco de dados para o preparo e posterior seleção da amostra a ser analisada. As inspeções selecionadas fizeram parte dos dois últimos ciclos de inspeções do DNIT, ocorridos entre os anos de 2018 e 2021, devido à regularidade dos dados de avaliação quando comparados aos dados de anos anteriores.

O modelo de deterioração baseado nas Cadeias de Markov leva em consideração as contagens de transições de estado ocorridas anualmente em todas as OAEs do parque e dentro do período de análise definido. Portanto, a primeira etapa do trabalho consistiu na obtenção dos dados de entrada para o modelo, que correspondem às Notas Técnicas das OAEs por ano, de 2018 a 2021.

Como os ciclos de inspeções são realizados segundo as diretrizes da Norma DNIT 010-PRO (2004), que especifica o intervalo de realização das inspeções rotineiras para cada dois anos, são identificados os anos em que uma dada OAE não teve um registro atribuído no SGO, ou seja, nos períodos entre ciclos.

Após a organização das notas por ano, realizou-se uma etapa de estruturação desses dados por meio de uma rotina de preenchimento dos dados faltantes, de acordo com regras pré-estabelecidas. Em seguida, procedeu-se à etapa de seleção da amostra e aplicação da metodologia para obtenção das curvas de deterioração, bem como a geração de cenários futuros para prever o estado de condição do parque de obras, caso não haja intervenção, ou seja, se as estruturas não receberem atividades de manutenção, o que permitiria o avanço dos processos de deterioração ao longo dos anos.

Dessa maneira, a checagem dos dados de previsão se dá em duas etapas. A primeira etapa consiste na comparação entre os dados previstos e observados para o último ano do período de análise, semelhante à metodologia adotada por Oliveira (2019). A segunda etapa, também como forma de verificar a acurácia do modelo, consiste na comparação das curvas de deterioração obtidas com outras curvas estabelecidas em estudos de referência na literatura internacional.

2.1 CADEIAS DE MARKOV

Os processos de Markov são processos estocásticos, isto é, caracterizam o comportamento de um sistema no tempo sob determinadas condições probabilísticas (Almeida, 2013). Com relação à variável tempo, os processos de Markov podem se caracterizar como discretos, sendo $X(t);\ t = 0, 1, 2, \ldots$, ou contínuos, sendo $X(t);\ t > 0$.

Apesar de a deterioração em estruturas possuir um caráter contínuo, a utilização dos índices de condição como dados discretos é um procedimento largamente utilizado para mensurar a condição da estrutura ao longo dos anos, reduzindo a complexidade da monitoração contínua desse processo (Madanat *et al*., 1995).

Morcous (2006) acrescenta que a técnica das Cadeias de Markov é capaz de mensurar a dependência com o tempo e a incerteza dos processos de deterioração das estruturas, além da sua fácil implementação computacional e simplicidade de uso nos sistemas de gerenciamento de OAEs

Segundo Oliveira (2019), as Cadeias de Markov são aplicadas para deterioração de pontes rodoviárias, considerando o conceito de dano cumulativo e probabilístico, no qual é esperado o decréscimo da Nota Técnica dos

elementos após vários períodos de transição. Elas são ditas de primeira ordem quando consideram que o estado futuro de um elemento estrutural depende apenas do seu estado atual, sob a hipótese que os estados no futuro e no passado são independentes.

Apesar das vantagens na aplicação do método, existem limitações intrínsecas à teoria das Cadeias de Markov, a citar: dificuldade em incorporar múltiplos fatores relevantes que impactam no processo de deterioração, tais como clima, tráfego, tipo de rota e propriedades dos materiais; inaptidão para prever o desempenho de estruturas que passaram por atividades de reparo ou manutenção; e característica estacionária, prevendo que a probabilidade de transição entre estados será constante ao longo do tempo (Wu *et al*., 2017).

As probabilidades de uma OAE transitar de estado são representadas por uma matriz $(n \times n)$, sendo $"n"$ a quantidade de estados de condição possíveis. Essa matriz é denominada Matriz de Probabilidade de Transições (MPT). Por ser oriunda de um processo estacionário, a MPT é constante para qualquer tempo, sendo a mesma utilizada entre $t = 0$ e $t = 1$ ou entre $t = 9$ e $t = 10$. As probabilidades de um elemento transitar do estado *"i"* no instante inicial t para um estado *"j"* num dado instante $t + \Delta t$ e de um elemento permanecer no mesmo estado *"i"* são dadas pelas Equações 1 e 2, respectivamente, a seguir. A estrutura da MPT é descrita na Equação 3, na sequência.

$$P_{(\Delta t)ij} = P_r(X_{t+\Delta t} = j \mid X_t = i) \quad (1)$$

$$P_{(\Delta t)ij} = P_r(X_{t+\Delta t} = i \mid X_t = i) \quad (2)$$

$$P = [p_{ij}] = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Cada elemento p_{ij} da matriz representa a probabilidade de a Nota Técnica passar do estado *"i"* para o estado *"j"* durante um determinado intervalo de tempo Δt. A matriz de probabilidade de Markov possui propriedades que devem ser consideradas para a aplicação nos modelos de deterioração de estruturas, a saber:

- $0 \leq p_{ij} \leq 1$; com *i, j = 1, 2, ..., n*; e
- $\sum_j^n p_{ij} = 1$; com *i = 1, 2, ..., n*.

A primeira propriedade observa que a probabilidade de transição é um valor decimal que varia de 0 a 1. Já a segunda propriedade exige que o somatório de todas as probabilidades para uma mesma linha da MPT deve ser igual a 1. O modelo da matriz é triangular inferior, ou seja, os elementos acima da diagonal principal são iguais a zero, representando a exclusão dos casos de transições positivas entre notas (que podem indicar ações de melhoramento ou de manutenção na estrutura).

Para a construção de uma MPT, o banco de dados disponível com o inventário e a avaliação das obras é tratado com o objetivo específico para cada estudo. Em pequenos bancos de dados, a probabilidade pode ser calculada seguindo a abordagem de frequência (Jiang, 1990). Sendo p_{ij} a probabilidade de transição da estrutura passar do estado $"i"$ para o estado $"j"$, n_{ij} o número de transições ocorridas e n_i o total de estruturas no estado *"i"* antes da deterioração, então tem-se o cálculo da estimativa por meio da Equação 4:

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (4)$$

A aplicação da metodologia, portanto, permite basicamente a saída de dois tipos de informações: a previsão em nível gerencial do estado de condição de um parque de obras e a previsão do valor esperado de um dado estado de condição após passados t anos. Sendo $N(t)$ e N_0 os vetores que representam a contagem de obras

para cada estado de condição no tempo t e no ano inicial de análise, respectivamente, o cálculo da previsão do estado de condição para um parque de obras é determinado por meio da Equação 5.

$$N(t) = N_0 \times MPT^t \quad (5)$$

Para estimar o valor esperado de um dado estado de condição para um horizonte de t anos, parte-se: do vetor de estado atual E_{c0}, concebido conforme a Tabela 1, a seguir; da MPT correspondente ao período decorrido entre o estado atual e o previsto; e, por fim, do vetor de estados de condição possíveis E_{cp}, também apresentado na Tabela 1. O cálculo vetorial que determina o valor esperado $E(t)$ é mostrado na Equação 6, a seguir.

$$E(t) = E_{c0} \cdot (MPT)^t \cdot E_{cp} \quad (6)$$

Tabela 1 – Vetores de estado utilizados no cálculo do valor esperado $E(t)$

E_{cp}	E_{c0}
1	1 0 0 0 0
2	0 1 0 0 0
3	0 0 1 0 0
4	0 0 0 1 0
5	0 0 0 0 1

Fonte: Elaboração própria

2.2 ESTRUTURAÇÃO DOS DADOS

Da base de dados do SGO, foi selecionada uma amostra contendo 6.383 OAEs. Foram excluídas as pontes de madeira, pontilhões, OAEs inservíveis, túneis e passagens de pedestres. Cada uma dessas estruturas possui diferentes processos de deterioração que devem ser analisados separadamente do parque de obras, ou que não devem fazer parte da análise de deterioração do parque de obras em serviço (Almeida, 2013).

Após a seleção da amostra, procedeu-se com a organização dos dados de avaliação das estruturas por ano, de 2018 a 2021. Em seguida, foi necessária a estruturação desses dados mediante rotina de preenchimento dos dados faltantes nos anos entre ciclos de inspeções, uma vez que as transições entre estados de condição são contabilizadas anualmente. As respectivas etapas de organização e estruturação dos dados com preenchimento das notas faltantes é mostrada a seguir, para uma situação hipotética, na Tabela 2.

Tabela 2 – Estruturação dos dados de avaliação faltantes nos anos entre ciclos de inspeções

OAE	ANTES				DEPOIS			
	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021
1		4		4	4	4	4	4
2		3		3	3	3	3	3
3		4		1	4	4	2	1
4				4			4	4
5	5	4	4		5	4	4	4
6		1	4		1	1	4	4
7	5		3		5	4	3	3
8		5		4	5	5	4	4

Fonte: Elaboração própria

A rotina de preenchimento dos dados considerou cinco regras pré-estabelecidas para a conjectura das notas em cada ano do período base (2018-2021). Nesse sentido, são tomadas as ações correspondentes de modo a utilizar, sempre que possível, os dados de avaliação

registrados no SGO. Além disso, o processo de preenchimento inicia-se no primeiro ano do intervalo, para cada OAE, procedendo da mesma forma até o último ano do período base. Os cinco regramentos da rotina são:

- **Caso 1**: Ter a nota no ano;
- **Caso 2**: Não ter a nota no ano **(E)** Não ter a nota no(s) ano(s) vizinho(s);
- **Caso 3**: Não ter a nota no ano **(E)** Ter a nota nos anos vizinhos;
- **Caso 4:** Não ter a nota no ano **(E)** Ter a nota no ano posterior; e
- **Caso 5**: Não ter a nota no ano **(E)** Ter a nota no ano anterior.

Uma vez realizado o preenchimento das notas faltantes, são contabilizadas as transições entre os estados de condição, inclusive os casos de manutenção da Nota Técnica. A Tabela 3, a seguir, apresenta um resumo de todas as contagens de transições consideradas no período base e para todas as OAEs da amostra.

Tabela 3 – Contagem de transições após estruturação dos dados

5–5	5–4	5–3	5–2	5–1	4–4	4–3	4–2	4–1	3–3	3–2	3–1	2–2	2–1	1–1
66	77	3	0	0	8.640	308	16	2	4.861	124	8	1.898	63	369
Total de transições: 16.435														

Fonte: Elaboração própria

Observa-se que somente os registros de decaimento e permanência da Nota Técnica foram considerados na contagem de transições. Desse modo, desconsideram-se os casos de melhoramento do estado de condição.

3 RESULTADOS

Como resultado do processo de contagem das transições entre Notas Técnicas das OAEs no período definido, têm-se nas Equações 7 e 8, a seguir, as matrizes de contagem e de probabilidade de transições para um período de um ano, esta última obtida conforme a Equação 4, apresentada anteriormente.

$$MCT = \begin{bmatrix} 369 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 63 & 1898 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 124 & 4861 & 0 & 0 \\ 2 & 16 & 308 & 8640 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 77 & 66 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$MPT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}0321 & 0{,}9679 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}0016 & 0{,}0248 & 0{,}9736 & 0 & 0 \\ 0{,}0002 & 0{,}0018 & 0{,}0344 & 0{,}9636 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}0205 & 0{,}5274 & 0{,}4521 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Da MPT apresentada na Equação 8, observa-se que uma OAE Nota 5, em um determinado ano, tem uma probabilidade igual a 45,21% de permanecer na mesma nota no ano seguinte, enquanto a probabilidade de ter sua nota degradada para a Nota 4 no ano seguinte é igual a 52,74%. Com base nos dados inseridos no modelo, essa mesma OAE tem, ainda, uma probabilidade igual a 2,05% de transitar da Nota 5 para a Nota 3 no intervalo de 1 ano. Similarmente, são inferidas as probabilidades para os demais estados de condição.

Dado um horizonte de 50 anos para uma análise de deterioração do parque de obras e obtidas as MPTs correspondentes para este período, determina-se, com base na Equação 6, os valores esperados para cada estado de condição ao longo dos anos. A Tabela 4, a seguir, apresenta a previsão da Nota Técnica para o período de 50 anos.

Tabela 4 – Valores esperados para as Notas Técnicas ao longo dos anos

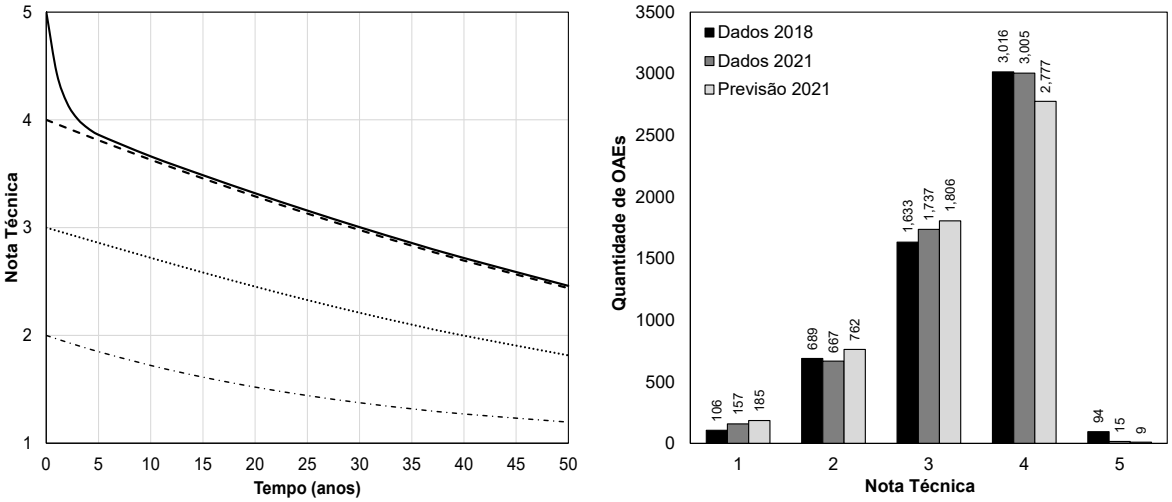
***t* (em anos)**	**2**	**3**	**4**	**5**
0	2	3	4	5
1	1,97	2,97	3,96	4,43
2	1,94	2,94	3,92	4,15
3	1,91	2,92	3,89	4,01
4	1,88	2,89	3,85	3,92
5	1,85	2,86	3,81	3,86
10	1,72	2,72	3,63	3,66
15	1,61	2,58	3,46	3,49
20	1,52	2,45	3,29	3,32
25	1,44	2,33	3,13	3,16
30	1,38	2,21	2,98	3,00
35	1,32	2,10	2,83	2,86
40	1,27	2,00	2,69	2,72
50	1,20	1,81	2,44	2,46

Fonte: Elaboração própria

Assim, tem-se a construção das curvas de deterioração por Nota Técnica, considerando o grupo de 6.383 OAEs analisadas no período entre 2018 e 2021. Além dos resultados em termos de curvas do comportamento da Nota Técnica em função do tempo, outra saída do modelo é a previsão do estado de condição do parque de obras para a hipótese de não haver intervenções nas estruturas.

A Figura 1, a seguir, apresenta as curvas de deterioração obtidas por meio das Cadeias de Markov e a comparação entre as quantidades de OAEs, em função da Nota Técnica, nos anos inicial e final do período base. As quantidades previstas são comparadas àquelas obtidas após a etapa de estruturação dos dados, exposta anteriormente, no item 2.2.

Figura 1 – Saídas do modelo de deterioração para a amostra contendo 6.383 OAEs: (a) Curvas de deterioração; (b) Previsão do estado de condição futuro do parque de obras



(a) (b)

Fonte: Elaboração própria

Nesta análise (Figura 1b), partiu-se da distribuição de frequência de obras em cada estado de condição no ano de 2018 e realizou-se a previsão para o ano de 2021. De acordo com Oliveira (2019), a mensuração da acurácia do modelo somente a partir da comparação dos

dados previstos com os dados observados, ou reais, não é obtida de forma direta. Desse modo, por meio do cálculo da variância do método de Markov tal como proposto pela autora, conforme a Equação 9, a seguir, tem-se então a verificação da acurácia do modelo de previsão, conforme mostrado na Tabela 5, logo após.

$$Var(N_t) = N_0 \times [(MPT)^t \cdot (1 - (MPT)^t)] \qquad (9)$$

Tabela 5 – Resultados das previsões de número de pontes por Nota Técnica e do cálculo da variância do método de Markov para as OAEs estudadas

Ano	Número de OAEs por Nota Técnica				
	1	2	3	4	5
Dados 2018	106	689	1.633	3.016	94
Dados 2021	157	667	1.737	3.005	15
Previsão 2021	185	762	1.806	2.777	9
Variância	73	188	386	297	8

Fonte: Elaboração própria

3.1 VALIDAÇÃO COM ESTUDOS DE REFERÊNCIA

Com o objetivo de comparar e validar a proposta de utilização do modelo de deterioração de estruturas, baseado nas Cadeias de Markov, como ferramenta matemática para a previsão do estado de condição futuro do parque de obras do DNIT, foram realizadas buscas na literatura por estudos que tenham utilizado a mesma metodologia e aplicação a um banco de dados de avaliação de OAEs.

Um dos estudos consultados para tal comparação foi realizado por Almeida (2013), o qual foi um estudo de referência para o desenvolvimento da fundamentação técnica e científica do Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais de Portugal, nomeado como GOA. Dentre os diversos estudos relacionados pela autora que mencionam a aplicação de modelos de deterioração em sistemas de gerenciamento de estruturas, foi selecionado o trabalho de Devaraj (2009) para o estudo de validação da metodologia proposta.

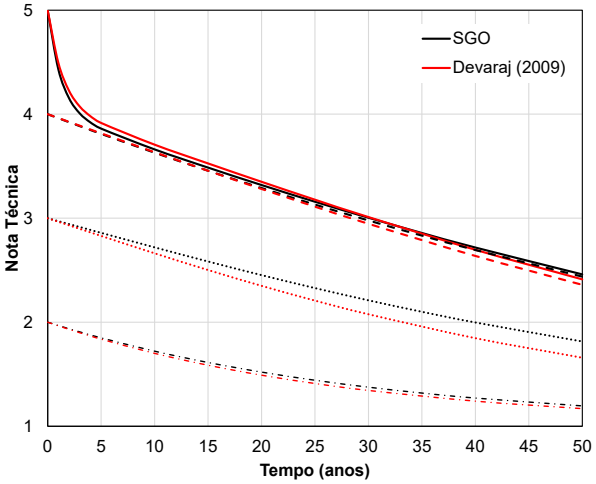
Dinesh Devaraj utilizou dados coletados de uma base de dados com 4.400 pontes (não apenas de concreto armado) no estado norte-americano de Michigan. O modelo desenvolvido teve como objetivo propor uma estimativa da degradação com base em matrizes de Markov não-homogêneas, diferenciadas por grupos distintos de idade das obras. A escala de avaliação de OAEs indicada pela *Federal Highway Administration* (FHWA) e utilizada no estudo de Devaraj (2009) contém sete níveis e, por esse motivo, Almeida (2013) realizou uma transformação nos dados do autor de modo a trabalhar com uma matriz de cinco níveis, semelhante àqueles utilizados na ABNT NBR 9452 (2019) e na Norma DNIT 010-PRO (2004). As matrizes propostas pelo autor dividem o universo de obras em três grupos selecionados com base na idade das obras: com até 20 anos; de 20 a 40 anos; e com 41 ou mais anos.

Tem-se que até a década de 80 houve uma rápida e expressiva ampliação da malha rodoviária no Brasil, dando origem, por consequência, à construção de muitas obras de arte especiais. Após esse período, o país teve uma redução na expansão da malha rodoviária, com novas OAEs surgindo em virtude da duplicação de trechos já existentes, além da implantação de algumas novas rodovias. De acordo com o banco de dados do SGO, a maior parte das OAEs em rodovias federais brasileiras possuem idade superior a 40 anos (63,40% de um total de 4.112 obras com idade registrada).

Sendo assim, a Figura 2, a seguir, apresenta a compilação das curvas de deterioração obtidas com os dados de avaliação das 6.383 OAEs do SGO e as curvas extraídas do estudo de Devaraj (2009) para a classe de obras com idade superior a 40 anos. Na sequência, a Figura 3 apresenta as curvas de deterioração obtidas com os dados do SGO e as curvas respectivas a cada grupo de faixa etária presentes no estudo de Devaraj (2009). Observa-se, de fato, uma maior semelhança entre as curvas das OAEs com idade superior a 40 anos e as curvas de deterioração para esta mesma faixa etária apresentadas por Devaraj (2009).

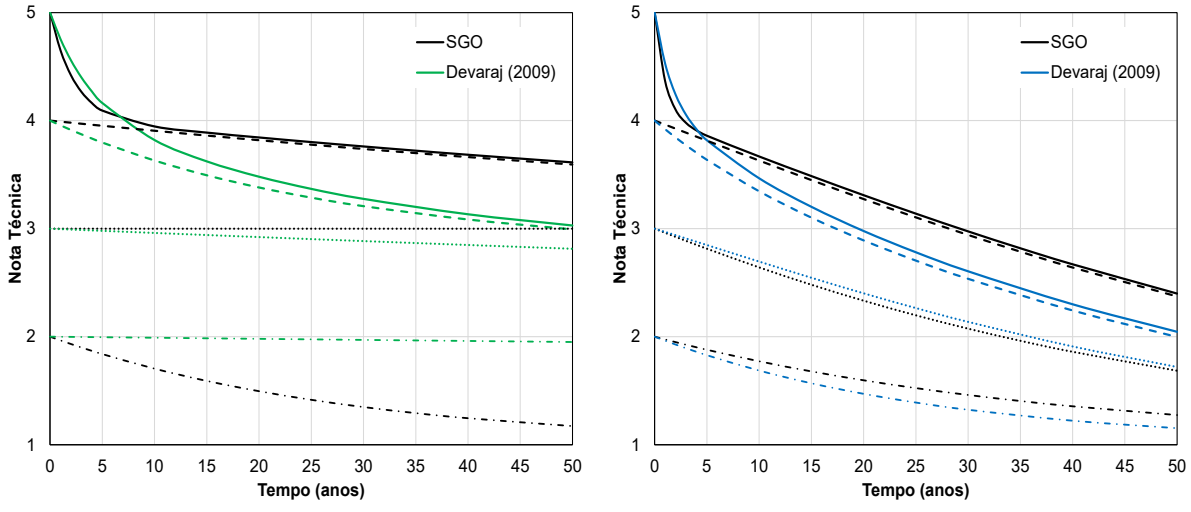
Similar à estratégia utilizada por Almeida (2013), de avaliar modelos de deterioração disponíveis na literatura e/ou já empregados em outros países para compor o modelo a ser implementado no sistema de gerenciamento de pontes em Portugal, esta etapa de validação das curvas obtidas com os dados do DNIT e o estudo de Devaraj (2009) se faz importante para que seja possível, a partir de uma curva existente tratada estatisticamente com uma amostra robusta, conseguir corrigir alguns possíveis erros nas curvas geradas no futuro, com a contínua chegada de dados de inspeções nas OAEs do parque de obras sob administração do DNIT.

Figura 2 – Validação das curvas de deterioração com o estudo de Devaraj (2009)

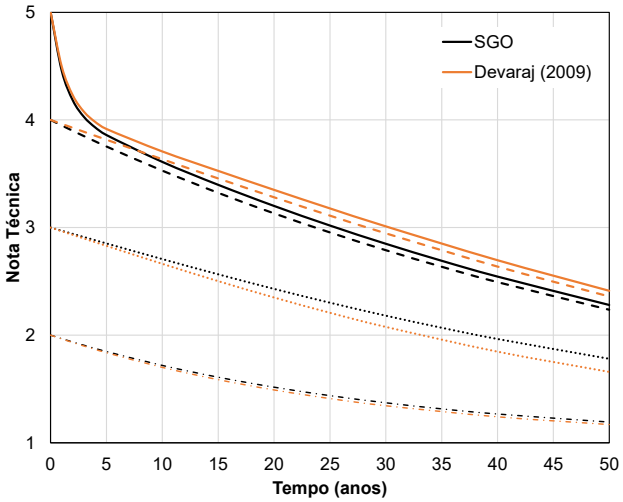


Fonte: Elaboração própria

Figura 3 – Curvas de deterioração por grupo de OAEs: (a) OAEs com até 20 anos de idade; (b) OAEs com idade entre 20 e 40 anos; (c) OAEs com 41 ou mais anos de idade



(a) (b)



(c)

Fonte: Elaboração própria

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta, de forma prática, os resultados da aplicação de um modelo de deterioração de estruturas, baseado na teoria estocástica das Cadeias de Markov, aos dados provenientes de dois ciclos de inspeções realizados entre os anos de 2018 e 2021 em um universo de 6.383 obras de arte especiais brasileiras.

O Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais (SGO) do DNIT contempla, atualmente, funcionalidades de consulta, cadastro de OAEs e registro de inspeções. Com base nesses dados, foi possível avaliar a aplicação de um modelo de deterioração de estruturas em nível de rede, que favorece a implementação da funcionalidade de previsão do estado de condição do parque de obras ao longo do tempo. Tais resultados podem ser utilizados no contexto da Gerência de Estruturas para planejar as atividades de manutenção, visando atender aos requisitos determinados pela agência em termos de desempenho do parque de obras.

Os modelos de deterioração baseados em probabilidade produzem uma previsão futura do estado de condição das obras que melhor representa as incertezas inerentes aos processos de deterioração. Por essa razão, observa-se na literatura a prevalência da sua adoção nos sistemas de gerenciamento de estruturas, em detrimento do uso de modelos empíricos e determinísticos.

Os resultados apresentados na Figura 2 mostraram uma satisfatória capacidade de previsão do modelo de deterioração, levando em consideração que o banco de dados de avaliação das OAEs foi restrito aos dois últimos ciclos de inspeções em obras administradas pelo DNIT. Em contrapartida, a acurácia do modelo é afetada por fatores como a subjetividade do inspetor, que pode causar flutuações irreais de nota, melhoramentos de nota não registrados no sistema e a falta de uniformidade na realização dos ciclos de inspeções.

Além disso, o estudo de validação da metodologia apontou semelhanças entre as curvas estimadas para as obras do SGO e as apresentadas no estudo de Devaraj (2009), conforme a Figura 3, tanto na totalidade da amostra como para aquelas selecionadas com base no tempo de construção. As previsões do modelo são diretamente relacionadas à dimensão do banco de dados de avaliação, ou seja: quanto mais dados de inspeções forem registrados, mais

transições são contabilizadas. Portanto, com a entrada de novos dados, provenientes de inspeções futuras, será possível aproximar a Matriz de Probabilidade de Transições ao desempenho real do parque de obras.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e ao Consórcio Engefoto-Pavesys, que, por meio do Contrato PP-00.0506/2021-00, permitiram o desenvolvimento dos estudos que possibilitaram a produção científica aqui apresentada.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. M. M. R. M. O. **Sistema de gestão de pontes com base em custos de ciclo de vida**. Tese (Doutorado em Engenharia). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9452: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento**. 4. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

AUSTROADS. **Guide to Bridge Technology Part 7: Maintenance and Management of Existing Bridges**. 2. ed. ISBN 978-1-925451-92-4. Feb. 2018.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). **Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias**. Publicação 709, 2. ed. Rio de Janeiro, 2004.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). **NORMA DNIT 010/2004 – PRO: Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido – Procedimento**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). Brasil, 2004. 18p.

DEVARAJ, D. **Application of non-homogeneous Markov chains in bridge management systems**. PhD Thesis. Wayne State University. Detroit, Michigan. 2009.

ELBEHAIRY, H. **Bridge management system with integrated life-cycle cost optimization**. PhD Thesis. University of Waterloo. Waterloo, Ontario, Canada. 2007.

GOLABI, K.; SHEPHARD, R. Pontis: a system for maintenance optimization and improvement of US bridge networks. **Journal Interfaces**, v.1, p. 71-78, 1997.

MADANAT, S.; MISHALANI, R.; IBRAHIM, W. H. W. Estimation of infrastructure transition probabilities from condition rating data. **Journal of Infrastructure Systems**. v. 1 (2), p. 120-125, 1995.

MELO, Consórcio Pontis/Maia (Org.). **Implantação e operação em âmbito nacional do Sistema de Gerenciamento de Pontes - 3ª Fase: Relatório Final**. Brasília, 2004. 82p.

MORCOUS, G. Performance prediction of bridges deck systems using Markov chains. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 20 (2), p. 146-155, 2006.

OLIVEIRA, C. B. L. **Determinação e análise de taxas de deterioração de pontes rodoviárias do Brasil**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2019. 153p.

ROELFSTRA, G. **Modele d'evolution de l'etat des ponts-routes en beton**. These nº 2310 - Grade de Docteur ès Sciences Techniques. Techniques, École Polytechnique Fédéral de Lausanne. 2001.

SETUNGE, S.; HASAN, M. S. **Concrete bridge deterioration prediction using Markov chain approach**. RMIT University, Melbourne, Australia, p. 3-4, 2011.

WOODWARD, R. J.; CULLINGTON, D. W.; DALY, A. F.; VASSIE, P. R.; HAARDT, P.; KASHNER, R.; ASTUDILLO, R.; VELANDO, C.; GODART, B.; CREMONA, C.; MAHUT, B.; RAHARINAIVO, A.; LAU, D. R.; MARKEY, I.; BEVC, L.; PERUS, I. **Deliverable D14: Final report**. Brime Project (Bridge Management in Europe), Contract Nº RO-97-SC.2220. Mar. 2001.

WU, D.; YUAN, C.; KUMFER, W.; LIU, H. A life-cycle optimization model using a semi-Markov process for highway bridge maintenance. **Applied Mathematical Modelling**, v. 43, p. 45-60, 2017.