



Desenvolvimento de Ferramenta Computacional para Sistemas de Gestão de Pontes, Viadutos e Passarelas

Pedro Henrique Gama Neiva¹, Gabriella Darold Vieira², Leandro Pantoja Paranhos³, André Luís da Silva Batista⁴, Sandoval José Rodrigues Junior⁵

¹Universidade Federal do Pará/ Instituto de Tecnologia - ITEC / bending.ufpa@gmail.com

²Universidade Federal do Pará/ Instituto de Tecnologia - ITEC / gabriella_darold@hotmail.com

³Universidade Federal do Pará/ Instituto de Tecnologia - ITEC / leandroparanhos1@globo.com

⁴Universidade Federal do Pará/ Instituto de Tecnologia - ITEC / andrebatista.ufpa@gmail.com

⁵Universidade Federal do Pará/ Instituto de Tecnologia - ITEC / srodrigues@ufpa.br

Resumo

Sistemas de Gestão de Obras de Arte Especiais (OAE) tem como objetivo serem ferramentas de auxílio a decisões por parte das entidades gestoras desse tipo de estrutura. As funções principais desse tipo de sistema são receber todos os dados oriundos de inspeções e vistorias realizadas em uma OAE, avaliar seu estado de conservação a partir de modelos de deterioração dos materiais, por exemplo, e buscar otimizar as decisões referentes à sua manutenção, considerando os recursos financeiros disponíveis para realização desses serviços e a necessidade de reparos, de modo a não reduzir a capacidade operacional da estrutura ou comprometer a segurança dos usuários. Um importante componente de um sistema de gestão é o modelo de deterioração, responsável por estimar os estados de condição futuros das estruturas integrantes da rede de OAEs, baseado no histórico de inspeções registrados no banco de dados do sistema e realizado através de uma análise probabilística. O objetivo do presente trabalho foi desenvolver um algoritmo em MatLab que faça previsão de desempenho para um sistema de OAEs através de processos de Markov em tempo discreto, tendo como dados de entrada informações referentes ao histórico de inspeções das estruturas e seus estados de condição atuais. O programa gera como resultados gráficos e tabelas descrevendo a previsão da deterioração das OAEs para o tempo fornecido pelo usuário. Apesar de ter se mostrado uma ferramenta útil, o ideal para gestão de OAEs no Brasil seria um programa baseado em processos de Markov em tempo contínuo, visto que no país não há o hábito de realizar inspeções periódicas nas estruturas.

Palavras-chave

Sistema de Gestão de Obras de Arte Especiais; Pontes; Viadutos; Passarelas; MatLab; Processos de Markov em Tempo Discreto.

Introdução

Pontes, viadutos e passarelas são Obras de Arte Especiais (OAE) que estão sujeitas à ação de diversas manifestações patológicas. Isso se dá, como corrobora VITÓRIO (2002), a partir do momento que a estrutura é posta em funcionamento, iniciando um



ciclo de vida cuja duração dependerá de diversos fatores relacionados com as condições de uso e conservação ao longo do tempo.

O crescente número de OAEs em estado de degradação avançado tem gerado uma grande preocupação com a necessidade de manutenção e conservação dessas estruturas, frente à importância que as mesmas exercem na malha viária das cidades. Sendo estas atividades complexas e dispendiosas, tornou-se indispensável a criação de bases de dados com informação atualizada sobre o estado das OAEs, surgindo assim os sistemas de gestão de obras, que têm por objetivo, segundo SOUSA (2008), disciplinar a tomada de decisões e manter o estado das obras sob um controle de qualidade, para a obtenção de um resultado otimizado.

No Brasil, a gestão e a manutenção de pontes é uma prática quase inexistente. As rodovias federais, estaduais e municipais que compõem a malha rodoviária brasileira não contam (com raras exceções) sequer com procedimentos sistemáticos para inspeção e manutenção (VITÓRIO, 2002). Isso se reflete no estado de conservação dessas estruturas, como mostra uma pesquisa divulgada pelo Tribunal de Contas da União (TCU), em que cerca de 75% das pontes rodoviárias não concessionadas encontram-se em estado precário de conservação.

Com base no exposto, o presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para estimativa do desempenho futuro de uma OAE a partir de um modelo de deterioração baseado em processos markovianos em cadeia.

Estrutura de um sistema de gestão de obras de arte especiais

Sistemas de Gestão de OAEs tem como objetivo serem ferramentas de auxílio a decisões por parte das entidades gestoras desse tipo de estrutura. A função principal desse tipo de ferramenta é receber todos os dados oriundos de inspeções e vistorias realizadas em uma OAE, avaliar seu estado de conservação a partir de modelos de deterioração dos materiais, por exemplo, e buscar otimizar as decisões referentes à sua manutenção, considerando os recursos financeiros disponíveis para realização desses serviços e a necessidade de reparos, de modo a não reduzir a capacidade operacional da estrutura ou comprometer a segurança dos usuários.

Segundo ALVES e COSTA (2004), a maioria dos sistemas de gestão de OAEs são do tipo modulares e são compostos de 5 módulos principais: inspeção e inventário, sistema central de gestão, avaliação, otimização e resultados, uma esquematização das partes componentes de um sistema de gestão é feita na Figura 1. A seguir, cada um será explicado de forma mais detalhada.



Figura 1 – Estrutura de um Sistema de Gestão de Obras de Arte Especiais (ALVES e COSTA, 2004).

Módulo de inspeção e inventário

É nessa parte do sistema em que são feitos os registros de todas as informações que podem servir como identificação da estrutura, tais como: localização, instituição gestora, projetos, ano de inauguração e capacidade de tráfego. Também é possível inserir informações referentes às inspeções realizadas nas estruturas, tais informações podem estar em formato de texto ou audiovisual, além de armazenar informações específicas a respeito dos danos encontrados em cada elemento da estrutura.

A partir das informações registradas sobre os danos identificados na estrutura, é possível efetuar o cálculo do grau de risco (também conhecido como índice de estado ou estado de condição), sendo essa uma outra função desse módulo. O grau de risco é uma nota calculada normalmente utilizando como parâmetros o tipo de dano, sua extensão, intensidade e a importância do elemento estrutural afetado e representa o estado de conservação da estrutura e a necessidade de manutenção. O grau de risco e as demais informações referentes às inspeções devem ficar disponíveis no sistema para consulta, além de serem utilizadas pelo módulo de avaliação para analisar o desempenho de cada estrutura separadamente e fazer a modelagem da deterioração.

Sistema central de gestão

O sistema central de gestão serve para armazenar toda a informação inserida no módulo de inventário e inspeção, além de fazer o fluxo dessas informações para os demais módulos, ou seja, esse módulo seria o banco de dados do sistema.

Módulo de avaliação

É nesse módulo que são realizadas avaliações a respeito da capacidade resistente da estrutura e de seus elementos componentes, modelagem do grau de deterioração futuro

das OAEs, baseado nos registros dos estados de condição ao longo do tempo e utilizando de modelos probabilísticos de natureza estocástica e que, geralmente, recorrem a processos markovianos em cadeia para previsão do resultado (SOBREIRO, 2011). Também é feita a avaliação dos custos do ciclo de vida, tendo como referência as estratégias de manutenção existentes.

Módulo de otimização

Consiste em um algoritmo que determina a melhor estratégia de manutenção a ser adotada, considerando a deterioração das estruturas no presente e sua previsão de desempenho no futuro, os custos associados a cada estratégia em estudo e os fundos disponíveis para realizar as ações de manutenção.



Figura 2 – Fluxograma exemplificando a organização de um Sistema de Gestão de Obras de Arte Especiais (POÇAS, 2009).

Previsão de desempenho de OAEs através de processos de Markov

Os processos estocásticos, que podem ser caracterizados como coleções de variáveis aleatórias que, em geral, são utilizadas para estudar a evolução de fenômenos observados ao longo do tempo, têm sido muito utilizados para a modelagem da deterioração de estruturas, como pontes e estradas, ao longo do tempo.

Atualmente, o processo estocástico mais utilizado é o de Markov em cadeia. Ele simula a evolução do estado de conservação das pontes, de modo a se ter uma previsão do desempenho futuro de pontes existentes, além de ser utilizado na elaboração de sistemas de gestão dessas obras de arte especiais. Esse processo, como já exposto, será abordado ao longo desse trabalho.

Matriz Probabilística de Markov

Nessa matriz, cada elemento P_{ij} representa a probabilidade de transição de um estado de condição i para um j . É importante destacar que a matriz não contempla a possibilidade para $i > j$, tendo os elementos nessa condição seu valor igual a zero. Isso se explica pelo

fato da matriz modelar a evolução da deterioração de uma estrutura, processo em que naturalmente se registram estágios de degradação crescentes à medida que o tempo avança. O contrário só se mostra verdadeiro quando existem intervenções de manutenção na estrutura, melhorando seu estado de condição.

A seguir, apresenta-se o formato de uma matriz probabilística de Markov:

$$P_{\Delta t} = \begin{matrix} & P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} \\ & 0 & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} \\ P_{\Delta t} = & 0 & 0 & P_{33} & P_{34} & P_{35} \\ & 0 & 0 & 0 & P_{44} & P_{45} \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{55} \end{matrix} \quad (1)$$

Outro aspecto importante nas matrizes de Markov é o fato das mudanças de estado serem sempre de um passo. Isso significa que mesmo que para uma matriz P com determinado Δt ocorra uma transição do estado 2 para o 4, antes de se atingir o fim do respectivo intervalo de tempo, a ponte terá passado pelo estado de condição 3 por um determinado período de tempo.

Além disso, de acordo com SOBREIRO (2011), as matrizes de Markov apresentam as seguintes propriedades:

- Os estados de condição são discretos, isto é, depois de realizadas as inspeções são atribuídos números inteiros igualmente espaçados dependendo do sistema de gestão utilizado;
- Os modelos são probabilísticos, ou seja, a previsão do desempenho futuro de uma ponte ou conjunto de pontes segue uma distribuição de probabilidades;
- Pode-se utilizar um elevado número de elementos no modelo, pois o processo pode ser executado computacionalmente;
- Outra importante propriedade diz respeito a “falta de memória” dessas matrizes, em que o desempenho futuro de determinada ponte depende apenas do estado de condição inicial e não dos seus registros passados.

Essa última propriedade gera algumas deduções importantes. A primeira delas diz respeito ao fato dessas matrizes serem independentes do tempo, por usarem probabilidades de transição constantes, de modo que dependam apenas do intervalo de tempo entre inspeções e não da idade da ponte.

Vetores de probabilidade de estados de condição

Dois vetores merecem destaque, o vetor de probabilidades para o estado inicial e para o estado final. No vetor de probabilidades para o estado inicial (t_i) será registrado o estado de condição da ponte para o estado atual.

$$p_{ti} = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_5] \quad (2)$$

Já no vetor de probabilidades para o estado final (p_{tf}) estarão registradas as probabilidades dos estados de condição da ponte para um tempo final. Para se obter esse vetor é necessário conhecer o vetor de probabilidades para um tempo inicial (t_i) e a matriz probabilística de Markov para um intervalo de tempo $\Delta t = t_f - t_i$.

$$p_{tf} = p_{ti} * P_{\Delta t} \quad (3)$$

Estado de condição médio

Para determinar o estado de condição médio para um determinado tempo (t) é necessário saber o vetor de probabilidades correspondente a esse tempo (p_t), como pode ser observado abaixo:

$$C_{méd} = p_t * \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Processos de Markov em tempo discreto

Estimativa da matriz probabilística de Markov: Método da previsão da percentagem

Para determinar cada elemento não-nulo da matriz $P_{\Delta t}$ para um intervalo de tempo $\Delta t = t_f - t_i$ utiliza-se a seguinte formulação:

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (5)$$

A fórmula acima estima a probabilidade de uma ponte evoluir de um estado de condição i para um estado j , em um intervalo Δt . Para estimar esse valor é necessário dispor de um inventário com registros de pelo menos duas inspeções consecutivas, de modo a se ter uma matriz probabilística de qualidade e confiável.

A partir desse inventário serão extraídos os valores n_{ij} e n_i , os quais correspondem, respectivamente, à quantidade de pontes que transitaram do estado de condição i para o estado j no intervalo de tempo considerado e à quantidade de pontes que se encontravam no estado i no tempo t_i .

Previsão do desempenho

Para estimar o estado de condição de uma determinada ponte para anos futuros, a partir de uma matriz probabilística de Markov, é necessário ter um ponto de partida: o estado de condição da ponte no presente. A partir do estado de condição atual da ponte obtém-

se de maneira simples o vetor de probabilidade dos estados de condição para o tempo inicial.

O vetor de probabilidades e, subsequentemente, o estado de condição médio para o tempo final são obtidos através de procedimentos já descritos anteriormente. Para prever o desempenho de intervalos de tempo múltiplos daquele que gerou a matriz $P_{\Delta t}$, utiliza-se da seguinte relação:

$$p_{t_f} = p_{t_i} * P^n \quad (6)$$

Onde P é uma matriz probabilística correspondente a um intervalo de tempo inicial Δt_0 e n é a razão entre o intervalo de tempo Δt , múltiplo de Δt_0 e que representa a variação do tempo de um instante inicial t_i em que se conhece a condição de estado da ponte, para um instante t_f , correspondente ao tempo onde se deseja estimar a condição da mesma estrutura.

Implementação computacional da ferramenta para Previsão de desempenho em pontes, viadutos e passarelas

Com base no exposto, o objetivo desse trabalho foi desenvolver uma ferramenta computacional que permita estimar os estados de condição futuros para uma determinada OAE, a partir de informações que o usuário deve obter de um banco de dados robusto com registros dos estados de condição ao longo do tempo das estruturas semelhantes que estejam dentro da mesma rede de OAEs. A previsão de desempenho é feita através de Processos de Markov em tempo discreto, de modo que as informações inseridas no programa devem ser de inspeções realizadas em intervalos de tempo discretos (Ex: dois em dois anos).

Basicamente, o programa necessita das seguintes informações para executar a previsão de desempenho: intervalo de tempo (em anos) entre inspeções; para cada possível transição de estado, a quantidade de OAEs que sofreram tal transição; para cada estado de condição i , a quantidade de pontes que sofreram alguma transição de estado e no tempo inicial se encontravam com estado de condição i ; o tempo (em anos) até onde o usuário deseja que o programa faça a previsão do desempenho; e o estado de condição inicial.

O programa foi implementado no ambiente de programação MatLab, devido à facilidade em realizar operações matriciais, por ser um ambiente de programação mais simples se comparado a outras linguagens utilizadas no meio acadêmico e pelas ferramentas disponíveis na plataforma para criação de interfaces gráficas (*Graphic User Interface – GUI*). Foi desenvolvida uma interface gráfica para facilitar a tarefa dos usuários de inserir os dados de entrada do programa (Figura 3). O programa se chama *OAEPerformTool*.

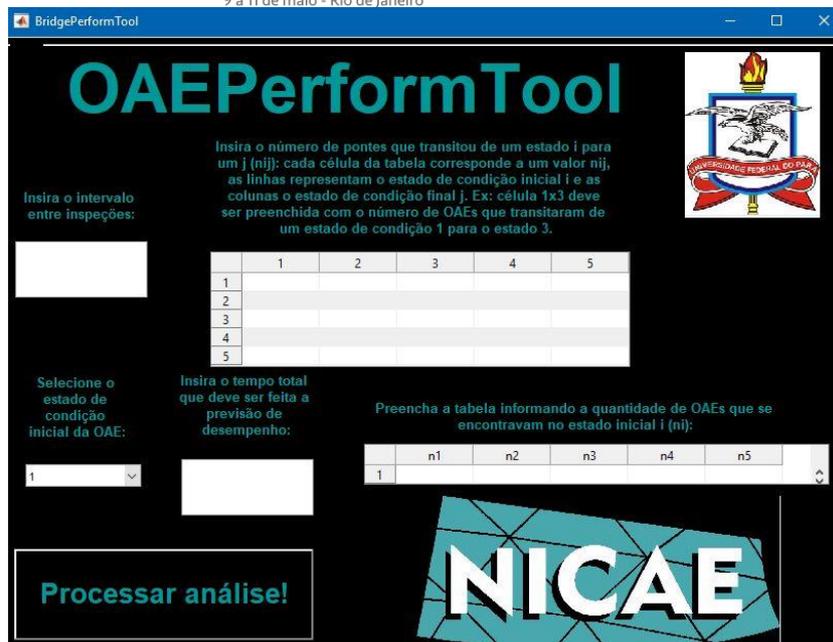


Figura 3 – Interface gráfica do programa *OAEPerformTool*.

Após a inserção dos dados de entrada, através da interface gráfica, o usuário deve apertar no botão “*Processar análise!*” para que o programa inicie sua rotina de cálculo. O algoritmo de cálculo do *OAEPerformTool* é composto por duas funções principais, uma é a que calcula a matriz probabilística de Markov através do método da previsão de percentagem, utilizando como dados de entrada a matriz contendo a quantidade de OAEs que sofreram transição de um estado i para um estado j , com i e j variando de 1 a 5, e o vetor contendo a quantidade de pontes que ao transitarem de estado estavam em um estado de condição inicial i . A outra função é a que faz efetivamente a previsão de desempenho, utilizando como dados de entrada a matriz probabilística de Markov, calculada pela função principal explicada anteriormente, o estado de condição inicial da OAE e o intervalo de tempo total que será feita a análise de desempenho.

A análise de desempenho é feita calculando-se o vetor de probabilidades de estados de condição final para um ano inicial através da equação (6), então faz-se o processo de cálculo citado acima a cada n anos, sendo n o intervalo de tempo entre inspeções (estipulado pelo usuário), até que se atinja o tempo T , estabelecido pelo usuário como o intervalo de tempo total para a análise. Ao final, monta-se uma tabela formada pela união de todos os vetores de probabilidade de estados calculados para cada ano, onde cada linha representa um ano e cada coluna um estado de condição, de modo que um elemento dessa tabela na posição $i \times j$ representa a probabilidade da OAE atingir o estado de condição j no ano i .

De posse dos vetores de probabilidade de estados de condição, a função efetua o cálculo do estado de condição médio da OAE para cada ano, através da equação (4). Posteriormente, o programa gera uma tabela com os estados de condição médios para todos os anos analisados e um gráfico ilustrando os estados de condição médios ao longo dos anos analisados, ou seja, demonstrando a evolução da deterioração da

estrutura. Na Figura 4 é exibido um fluxograma que esquematiza o processo de funcionamento do programa.

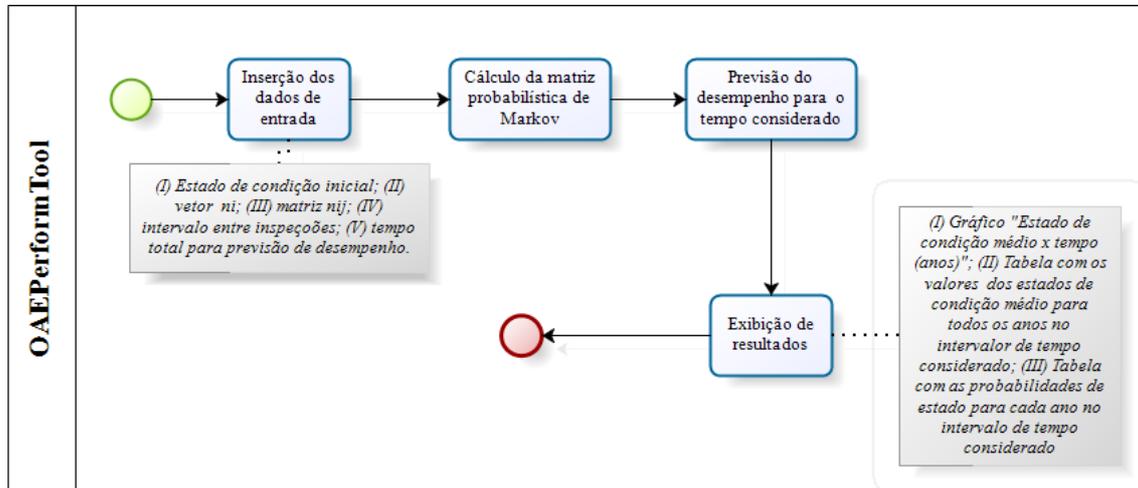


Figura 4 – Fluxograma esquematizando o funcionamento do programa OAEPerformTool.

A seguir, são apresentados nas Figuras 5, 6 e 7 os resultados finais da análise gerados pelo programa *OAEPerformTool*. A equipe que desenvolveu a ferramenta encontra-se trabalhando no desenvolvimento de um programa de previsão de desempenho mais completo, através da implementação de um algoritmo de previsão de desempenho baseado em processos de Markov em tempo contínuo, que possibilita fazer as análises para intervalos de tempo não-discretos, o que se encontra mais condizente com a realidade da gestão de OAEs no Brasil, visto que não costumam ser feitas inspeções rotineiras nas estruturas.

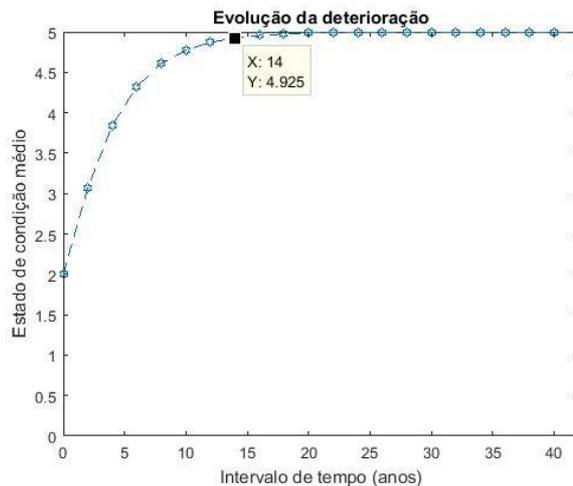


Figura 5 – Gráfico gerado pelo programa OAEPerformTool demonstrando a evolução da deterioração de uma OAE ao longo do tempo.

MATLAB Variable: Cmed
02/03/2018

	1
1	2
2	3.0714
3	3.8461
4	4.3264
5	4.6102
6	4.7750
7	4.8703
8	4.9252
9	4.9569
10	4.9751
11	4.9856
12	4.9917
13	4.9952
14	4.9972
15	4.9984
16	4.9991
17	4.9995
18	4.9997
19	4.9998
20	4.9999
21	4.9999
22	5.0000

(6)

MATLAB Variable: Desemp
02/03/2018

	1	2	3	4	5
1	0	1	0	0	0
2	0	0.2449	0.5000	0.1939	0.0612
3	0	0.0600	0.2794	0.4151	0.2455
4	0	0.0147	0.1177	0.3941	0.4735
5	0	0.0036	0.0443	0.2904	0.6617
6	0	8.8090e-04	0.0157	0.1909	0.7925
7	0	2.1573e-04	0.0054	0.1184	0.8761
8	0	5.2832e-05	0.0018	0.0711	0.9271
9	0	1.2938e-05	5.8975e-04	0.0419	0.9575
10	0	3.1686e-06	1.9162e-04	0.0245	0.9753
11	0	7.7598e-07	6.1745e-05	0.0142	0.9857
12	0	1.9004e-07	1.9773e-05	0.0082	0.9917
13	0	4.6540e-08	6.3028e-06	0.0048	0.9952
14	0	1.1397e-08	2.0021e-06	0.0028	0.9972
15	0	2.7912e-09	6.3425e-07	0.0016	0.9984
16	0	6.8356e-10	2.0052e-07	9.1698e-04	0.9991
17	0	1.6740e-10	6.3296e-08	5.2913e-04	0.9995
18	0	4.0997e-11	1.9956e-08	3.0530e-04	0.9997
19	0	1.0040e-11	6.2857e-09	1.7614e-04	0.9998
20	0	2.4588e-12	1.9784e-09	1.0162e-04	0.9999
21	0	6.0215e-13	6.2237e-10	5.8631e-05	0.9999
22	0	1.4746e-13	1.9570e-10	3.3826e-05	1.0000

(7)

Figuras 6 e 7 – Tabelas geradas pelo programa *OAEPerformTool*. (6) Exibição dos estados de condição médios para cada ano e (7) das probabilidades de estados de condição (colunas) para cada ano (linhas).

Conclusões

Com base no que foi apresentado, o programa proposto mostra-se uma ferramenta útil para auxiliar na gestão das OAEs no Brasil, visto que há a necessidade de um aperfeiçoamento na forma como tais estruturas são geridas atualmente.

O programa ainda se encontra em desenvolvimento e aperfeiçoamento e tem como principal limitação para seu uso o fato de que o processo markoviano em tempo discreto se aplica apenas para bancos de dados em que as inspeções são realizadas em intervalos de tempo discretos, o que é uma condição difícil de ser verificada na prática, visto que no Brasil não há o hábito de se realizar inspeções periódicas nas estruturas. Uma forma de contornar essa limitação, e que já vem sendo desenvolvido, é a implementação de um algoritmo que faça previsão de desempenho através de processos de Markov em tempo contínuo.

Referências

- ALVES, M. D.; COSTA, J. M. (2004). Estratégias de gestão de obras de arte baseada numa análise de risco segundo a FMEA. Congresso Nacional da Construção. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- POÇAS, R. (2009). Gestão do Ciclo de Vida de Pontes. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho.
- SOBREIRO, F.J.N. (2011). Modelos de Previsão de Deterioração de Pontes Existentes: Processos de Markov. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- SOUSA, C.M.V. (2008). Aplicação de um Sistema de Gestão de Pontes a um Conjunto de Pontes Portuguesas. 2008. 157 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- VITÓRIO, J.A.P. (2002). Pontes rodoviárias: fundamentos, conservação e gestão. Recife, CREA-PE.