

**DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DE TAXAS DE DETERIORAÇÃO
DE PONTES RODOVIÁRIAS DO BRASIL**

Caroline Buratto de Lima e Oliveira

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**“DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DE TAXAS DE DETERIORAÇÃO DE
PONTES RODOVIÁRIAS DO BRASIL”**

Caroline Buratto de Lima e Oliveira

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Doutor em Engenharia de Estruturas”.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Greco
DEES-UFMG (Orientador)

Prof. Dr. Hermes Carvalho
DEES - UFMG

Prof. Dr. Sebastião Salvador Real Pereira
DEES - UFMG

Prof. Dr. Túlio Nogueira Bittencourt
USP/SP

Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
UFRGS

Belo Horizonte, 20 de fevereiro de 2019

O48d

Oliveira, Caroline Buratto de Lima e.
Determinação e análise de taxas de deterioração de pontes rodoviárias do Brasil [manuscrito] / Caroline Buratto de Lima e Oliveira. - 2019.
xiii, 153 f., enc.: il.

Orientador: Marcelo Greco.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 127-153.

Bibliografia: f. 118-126.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Markov, Processos de - Teses.
3. Pontes - Teses. I. Greco, Marcelo. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 624(043)

À Deus porque tudo d'Ele vem, ao meu
marido Leonardo, aos meus filhos
Helena e Miguel que são a minha
motivação e à minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todos os momentos de aprendizado vividos, pelo fortalecimento da minha família, pelos amigos dessa jornada, pela saúde e todo o suporte na condução dessa etapa.

Ao meu marido Leonardo Oliveira pelo constante apoio em todos os momentos e fases desse trabalho, possibilitando sua realização através do seu esforço e companheirismo.

Ao Professor Marcelo Greco por ter aceitado a orientação dessa pesquisa, realizando-a com demasiado zelo, empenho e contribuindo sobremaneira com a sua experiência ao estudo.

Aos demais pesquisadores do grupo, doutorandas e estatísticas Juliane Venturelli, Livia Dutra, à mestrande e geógrafa Camila Romeiro Esteves, ao Professor João Francisco de Carvalho Neto, à Engenheira Cintia Pereira dos Santos e ao mestre em Engenharia de estruturas Rafael Aredes Couto.

Ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) pelo apoio ao trabalho, proporcionando condições para minha dedicação à pesquisa. À Agência de Transportes de São Paulo – ARTESP e à Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT pelos esforços para disponibilização dos dados usados. Em especial agradeço ao Analista de Infraestrutura Thales Carvalho da ANTT pelo empenho e importante apoio.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (PROPEES/UFMG), aos professores e profissionais da secretaria em especial ao Professor Felício Bruzzi Barros e à secretária Juliana Castro pelo suporte ao longo de todo o período da pesquisa.

Aos meus pais, familiares e aos amigos Luciana Las Casas Costa Cordeiro, Janaina Ferreira e Barbosa, Altamir Augusto Costa e Danilo de Sá Viana Rezende. Ao estimado Engenheiro Dr. Álvaro Campos de Carvalho, durante seu período de administração da Superintendência Regional do DNIT em Minas Gerais, pela confiança no trabalho de pesquisa e por torná-lo possível.

RESUMO

Colapsos, rupturas e danos estruturais de pontes rodoviárias são constantemente associados às falhas na gestão de manutenção dessas obras e têm sido divulgados com maior frequência, pressionando a engenharia em todo o mundo para oferecer respostas que permitam um controle adequado do comportamento dessas estruturas. No entanto, a realização de inspeções e de obras necessárias estão constantemente restringidas por orçamentos limitados, fato que impulsiona as pesquisas do setor para a investigação de metodologias mais analíticas e eficazes de gestão, especialmente na administração de grandes parques de obras. Nesse contexto, após a ciência da condição das pontes através da sua inventariança e de inspeções de rotina, é especialmente importante estimar a deterioração dessas estruturas no tempo, contribuindo para a percepção dos riscos envolvidos, sendo indispensável para um planejamento adequado dos serviços de restauração, reabilitação e de substituição de curto, médio e longo prazo. A pesquisa realizada na presente tese contribui para o conhecimento das taxas de deterioração de pontes de concreto brasileiras pertencentes a trechos rodoviários federais. Foram reunidos numerosos relatórios de inspeções em pontes produzidos por diferentes empresas administradoras de rodovias no Brasil, totalizando na análise de 1.707 obras vistoriadas em um período médio de sete anos. Através de estudo de pesquisas internacionais e a partir das características próprias das metodologias de inspeção de pontes adotadas no Brasil, a pesquisa apresenta os resultados de taxas de deterioração de obras em 16 trechos rodoviários analisados, baseando-se em uma metodologia original que se utiliza do método das Cadeias de *Markov*. Estabelecem-se assim critérios particulares de filtragem dos dados, rotinas para lançamento e registro das informações e definições de verificação e validação dos resultados. Após a análise verificou-se a acurácia do procedimento para previsões das condições de grupos de pontes - prognóstico básico para o gerenciamento dessas obras na abordagem “*top-down*” - obtendo maior precisão para os conjuntos com maior número de registros históricos de inspeções. Ao reunir e avaliar a documentação existente no país, a pesquisa, além de verificar as taxas de deterioração de significativo volume de obras e sua relação com os possíveis agentes de degradação, também contribui para o conhecimento das práticas de inspeção realizadas no Brasil e da eficácia da sua utilização para a administração das pontes rodoviárias nacionais, evidenciando os próximos desafios para o desenvolvimento do setor.

Palavras-chave: Pontes; Gestão; Modelos de Deterioração; Cadeias de *Markov*.

ABSTRACT

Collapses, cracks, and structural damages are usually associated with an inadequate maintenance strategies and they have been occurred more often, enforcing the engineering to understand these structures performance to provide a more suitable management. In order to guarantee bridges in service is required regular inspections and a routine repair work - usually restricted by limited resources. This scenario encourages researches in the area to provide more analytical and efficient management methodologies, especially important in large stocks administration. In this context, predict the future condition of the bridge stock is the most crucial knowledge to develop reliable management programs. This could assist to estimate cost and activities of maintenance, repair and reinforcement (MR&R actions) required in short, medium and long term, also, it is basilar in risk assessment. This research collected and registered inspection reports performed by Brazilian road owners sum up to 1.707 bridges over seven years in 16 road segments. These reports were dispersed and were not registered on a common base or on specific bridge management software (BMS). The data was suited to enable stochastic simulations based in Markov Chains method with particular approaches in order to estimate Brazilian bridges deterioration rates. To this end, a specific data filtering criteria was created and were established specific routine for data entry and information recording using the “R” – a statistical computing language. Finally, this thesis proposed a method to compare the results of diverse rates results and to determine the deterioration model accuracy. The results demonstrated good predictions for short-term, although the limited data and it was confirmed its highly dependence to the number of inspection history data cycles. In addition, the results were compared with possible degradation agents not related in data. The collection of Brazil bridge inspections contributed to promote the inventory of these structures and enables to identify these most basilar characteristics. Further, the thesis presents the current management practices and its diversity in Brazil, the efficacy of their utilization and suggests future challenges to provide efficient management of national bridges.

Keywords: *Bridges; Infrastructure Management; Deterioration Models; Markov Chains.*

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 4.1 - Níveis de análises de gestão | 7 |
| Figura 5.1 - Comportamento de uma ponte submetida a intervenções ao longo do tempo..... | 14 |
| Figura 5.2 - Fluxo do processo com modelos de deterioração..... | 15 |
| Figura 5.3 - Índice de Condição adotado nas províncias de Quebec e Ontario..... | 18 |
| Figura 5.4 - Divisão das notas em grupos de pontes segundo Bu..... | 22 |
| Figura 6.1 - Estrutura de uma Matriz de Transição de Probabilidades..... | 31 |
| Figura 6.2- Matriz de <i>Markov</i> e curvas de degradação de pontes de concreto Orcesi-Cremona | 38 |
| Figura 6.3 - MPT de <i>Markov</i> e curvas de degradação de 456 pontes de aço segundo Cesare <i>et al.</i> ... | 39 |
| Figura 6.4 - MPT de <i>Markov</i> e curvas de degradação de 214 pontes de viga de concreto bi-apoiadas | 39 |
| Figura 6.5 - MPT de <i>Markov</i> e curvas de degradação de 54 pontes de viga de múltiplos vãos..... | 40 |
| Figura 6.6 - MPT de <i>Markov</i> e curvas de degradação de 36 pontes de concreto protendido..... | 40 |
| Figura 6.7 - Matriz de <i>Markov</i> e curvas de degradação das 850 pontes segundo Cesare <i>et al.</i> (1992). | 40 |
| Figura 6.8 - Mecanismo do BPM. Fonte: Adaptado de: Bu et al. (2013) | 42 |
| Figura 6.9 - Matriz de <i>Markov</i> e curvas de degradação das 9.678 pontes de estudo segundo Morcou | 43 |
| Figura 7.1 - Exemplo dos filtros existentes no sistema SGO..... | 47 |
| Figura 8.1 – Trechos rodoviários das pontes da pesquisa..... | 59 |
| Figura 8.2 - Tela do programa para lançamento do campo "Comentários gerais"..... | 61 |
| Figura 8.3 - Tela do programa para lançamento do campo "Anomalias". | 61 |
| Figura 8.4 – Gráficos individuais de distribuição do IC ao longo do período avaliativo observado em pontes de um mesmo grupo do banco de dados da pesquisa..... | 65 |
| Figura 9.1 – Transições totais de IC versus transições de IC usadas no cálculo das MPT | 80 |
| Figura 9.2 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-116/SP/MG..... | 82 |
| Figura 9.3 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-040/MG/RJ..... | 83 |
| Figura 9.4 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-116/RJ..... | 83 |
| Figura 9.5 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-381/MG/SP..... | 84 |
| Figura 9.6 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-101/RJ..... | 84 |
| Figura 9.7 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-101/SC | 85 |
| Figura 9.8 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-116/PR | 85 |
| Figura 9.9 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-376/PR..... | 86 |
| Figura 9.10 - Curvas de deterioração e MPT das Rodovia BR-116/PR/SC..... | 86 |
| Figura 9.11 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-116/SP/PR..... | 87 |
| Figura 9.12 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-393/RJ..... | 87 |
| Figura 9.13 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-153/SP..... | 88 |
| Figura 9.14 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-116/BA | 88 |
| Figura 9.15 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-324/BA | 89 |
| Figura 9.16 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-116/RS | 89 |
| Figura 9.17 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-392/RS | 90 |
| Figura 9.18 – Gráfico do tempo em anos estimado para transições entre IC | 91 |
| Figura 9.19 – Curvas de deterioração das partes das pontes da BR-116/SP/RJ..... | 93 |
| Figura 9.20 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-040/MG/RJ..... | 93 |
| Figura 9.21 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-116/RJ | 93 |
| Figura 9.22 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-381/MG | 94 |
| Figura 9.23 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-101/RJ | 94 |

| | |
|---|-----|
| Figura 9.24 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-101/SC..... | 94 |
| Figura 9.25 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-116/PR..... | 95 |
| Figura 9.26 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-376/PR..... | 95 |
| Figura 9.27 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-116/PR/SC..... | 95 |
| Figura 9.28 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-116/PR/SP | 96 |
| Figura 9.29 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-393/RJ | 96 |
| Figura 9.30 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-153/SP | 96 |
| Figura 9.31 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-116/BA | 97 |
| Figura 9.32 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-324/BA | 97 |
| Figura 9.33 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-116/RS..... | 98 |
| Figura 9.34 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-392/RS..... | 98 |
| Figura 9.35 – Localização dos trechos rodoviários de estudo sobre base climática <i>Nimer</i> | 106 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 5.1 - Índices de Condição de Pontes utilizados nos Estados Unidos..... | 17 |
| Tabela 5.2 - IC considerado na Alemanha. Fonte: Adaptado de USDOT, 2008. | 17 |
| Tabela 5.3 - Classificação dos Índices de Condição pelo IQOA. | 18 |
| Tabela 6.1 - MPT exemplo no estudo de Thompson. | 35 |
| Tabela 7.1 - Instruções para atribuição de notas de avaliação. | 47 |
| Tabela 7.2 - Exemplo de quadro para distribuição de IC em trecho sob exploração rodoviária (Fonte:ANTT,2016)..... | 49 |
| Tabela 7.3 - Exemplo de comparativo de IC em dois anos consecutivos em trecho sob exploração rodoviária. (Fonte:ANTT,2016)..... | 50 |
| Tabela 8.1 - Dados eletrônicos de inspeções em pontes fornecidos pela ARTESP em 2017 | 55 |
| Tabela 8.2 - Dados eletrônicos de inspeções em pontes fornecidos pela ANTT em 2017 | 56 |
| Tabela 8.3 - Relação dos contratos de concessão das rodovias consideradas na pesquisa..... | 58 |
| Tabela 8.4 – Metodologias de inspeções de pontes por ano e por trecho rodoviário..... | 60 |
| Tabela 8.5 – Planilha de dados para análise da viabilidade do estudo pelo método de regressão polinomial | 64 |
| Tabela 8.6 – Exemplos da distribuição de IC por pontes ao longo do período avaliativo | 65 |
| Tabela 8.7 – Data das inspeções realizadas nas pontes de estudo, por trecho rodoviário..... | 68 |
| Tabela 8.8 – Pontes com inspeções cadastrais por tipo de estrutura..... | 69 |
| Tabela 8.9 – Pontes com inspeções cadastrais padronizadas por comprimento e data da construção. . | 70 |
| Tabela 8.10 – Pontes sem inspeções cadastrais de acordo com as normas brasileiras ou em sem registros das inspeções cadastrais, por tipo de estrutura. | 71 |
| Tabela 8.11 – Pontes sem inspeções cadastrais de acordo com as normas brasileiras ou em sem registros das inspeções cadastrais, por comprimento das obras. | 71 |
| Tabela 9.1 – Transições entre estados registradas nas pontes da pesquisa, por trecho rodoviário..... | 81 |
| Tabela 9.2 – Tempo médio esperado para a transição entre IC das pontes da pesquisa | 91 |
| Tabela 9.3 – Período em anos para a transição entre IC para as diferentes regiões das pontes. | 99 |
| Tabela 9.4 – Período em anos para a transição entre IC para as diferentes regiões das pontes dos trechos rodoviários BR-116/RS, BR-293/RS, BR-392/PR. | 100 |
| Tabela 9.5 – Resultados das previsões de número de pontes por IC e do cálculo da variância da previsão da deterioração para as pontes de estudo. | 101 |
| Tabela 9.6 – Tempo total de transição entre IC máximo e mínimo e classificação dos trechos rodoviários da pesquisa de acordo com a base climática <i>Nimer</i> | 108 |
| Tabela 9.7 – Tempo total de transição entre IC máximo e mínimo e dados de volume de tráfego anual dos trechos rodoviários da pesquisa no ano de 2016..... | 109 |

LISTA DE ABBREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------------|--|
| AASHTO | American Association of State Highway and Transportation Officials |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ANN | Artificial Neural Network - ANN |
| ANTT | Agência Nacional de Transporte |
| ARTESP | Agência de Transporte do Estado de São Paulo |
| BCI | Bridge Condition Index (Denominação do IC utilizado no Canadá) |
| BMS | Bridge Management Systems (Sistemas de Gestão de Pontes) |
| BPM | Backward Prediction Model |
| BRIDGIT | BMS com maior utilização na Europa. |
| CBR | Case-based Reasoning Models |
| CR | Condition Rating (denominação do IC nos Estados Unidos da América) |
| DNIT | Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre |
| ECR | Empresas com contratos de Concessão Rodoviária. |
| FHWA | Federal Highway Administration |
| GGPLOT2 | Pacote gráfico da linguagem de programação "R" |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IC | Índice de Condição (Condition Index), denominação usada na Alemanha |
| IPR | Instituto de Pesquisas Rodoviárias |
| IQOA | Image de la Qualité des Ouvrages d'Art (denominação do IC usado na França) |
| J-BMS | The Bridge Management System in Japan |
| LCA | Life-Cycle Assesment (Gestão do Ciclo de Vida) |
| LCCA | Life-Cycle Costs Analysis (Análise de custo de vida) |
| LSM | Level-of-Service Method (Método do nível de serviço) |
| MT | Ministério dos Transportes (MT), |
| MPT | Matriz de Probabilidades de Transição de Estados |
| NBI | National Bridge Inventory (Inventário de Pontes Norte-Americano) |
| NCHRP | National Cooperative Highway Research Program |

| | |
|---------------|---|
| NT | Nota Técnica (IC no Brasil) |
| OAE | Obra de arte especial |
| PER | Programa de Exploração Rodoviária (PER) |
| PMS | Paviment Management System |
| PONTIS | BMS com maior utilização na América do Norte e Europa, sistema ASHTOO |
| PROART | Programa de Manutenção e Reabilitação de Estruturas |
| R | Software livre de linguagem estocástica desenvolvido por HADLEY WICKHAM |
| RNO | <i>Regression-based Nonlinear Optimization</i> |
| SGO | Sistema de Gestão de Obras Especiais do DNIT |
| USDOT | United States Department of Transportation |
| VBA | Visual Basic for Applications |
| VMD | Volume Médio Diário de Rodovias |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 JUSTIFICATIVA | 3 |
| 3 OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO..... | 5 |
| 4 GESTÃO DE PONTES..... | 6 |
| 4.1 Características de um Sistema de Gestão de Pontes | 8 |
| 5 MODELOS DE DETERIORAÇÃO | 12 |
| 5.1 Índice de Condição..... | 16 |
| 5.2 Os tipos de modelos de deterioração de pontes..... | 19 |
| 6 CADEIAS DE MARKOV | 29 |
| 7 GESTÃO DE PONTES NO BRASIL | 44 |
| 7.1.1 Administração das pontes das rodovias federais brasileiras sob regime de Concessão Rodoviária | 49 |
| 7.1.2 Administração das pontes das rodovias paulistas brasileiras sob regime de Concessão Rodoviária | 51 |
| 7.1.3 Pesquisas brasileiras sobre na área de inspeção de pontes..... | 51 |
| 8 METODOLOGIA..... | 54 |
| 8.1 Seleção dos dados..... | 54 |
| 8.2 Registro e descrição geral dos dados do estudo | 58 |
| 8.3 Filtragem dos dados | 62 |
| 8.4 Desenvolvimento da metodologia para determinação das taxas de deterioração de pontes rodoviárias da pesquisa..... | 63 |
| 8.5 Tratamento dos dados..... | 75 |
| 8.6 Verificação da acurácia dos resultados | 76 |
| 9 RESULTADOS | 80 |
| 9.1 Matrizes de Probabilidades de Transição dos Trechos | 82 |
| 9.2 Matrizes de Probabilidades de Transição por região das pontes..... | 92 |
| 9.3 Cálculo do desvio das previsões dos modelos | 101 |
| 9.4 Avaliação das taxas de deterioração de acordo com a região climática..... | 105 |
| 9.5 Considerações Finais..... | 105 |
| 10 CONCLUSÕES | 114 |
| 11 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 117 |

1

INTRODUÇÃO

A gestão da infraestrutura rodoviária busca obter o retorno máximo das intervenções de Manutenção, Restauração e Reforço (MR&R) com base no uso do mínimo custo associado ou a partir de determinado orçamento disponível ou delimitado. A atividade de gerenciar e programar inspeções de pontes com devido registro dos dados para posterior análise e definição de ações de manutenção é conhecida como gestão de pontes ou *bridge management* (HURT e SCHROCK, 2016). É uma atividade que pode ser vista como um tipo complexo de otimização.

A limitação orçamentária na gestão de pontes depara-se com os altos custos associados às obras de MR&R (HEYWOOD et al, 2017). Para superar este entrave, exige-se um planejamento minucioso com o desenvolvimento de abordagens sistemáticas, visando a otimização das ações de MR&R em pontes através de avançadas ferramentas gerenciais. Essas abordagens devem estar baseadas em análises de desempenho, com foco na redução do custo do ciclo de vida e na extensão da vida útil das estruturas, com níveis de segurança, confiabilidade e manutenção apropriados.

As pontes rodoviárias são sistemas estruturais complexos que se deterioram com o tempo, com taxas diferenciadas de degradação, sujeitas à presença de diversos fatores, tais como: desgaste, fadiga, agentes ambientais agressivos, aumento das cargas de tráfego, programas de manutenção insuficientes, problemas construtivos e projetos inadequados. Além disso, a interação entre esses fatores pode acelerar consideravelmente a taxa de degradação dessas estruturas (MORCOUS, 2000).

Neste sentido, o Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes (DNIT) conduziu no período de 2013 a 2015 a inventariança e a inspeção de pontes da malha rodoviária federal sob sua administração, utilizando o “Sistema de Gestão de Pontes” - SGO (DNIT 2016) desenvolvido pelo Órgão. Os resultados obtidos classificaram 1.780 obras no estado de “observação” de um total de aproximadamente 6.000 pontes sob a jurisdição da Autarquia, apresentando significativos desafios tecnológicos e econômicos para as próximas décadas.

Um gerenciamento eficaz de pontes da infraestrutura rodoviária depende do conhecimento acurado das condições atuais dessas obras, da qualidade ou da precisão do levantamento dessa condição, da estimativa do seu comportamento deteriorativo ao longo dos anos e, finalmente, dos custos associados aos serviços de intervenção. O conhecimento das taxas de deterioração das pontes e, portanto, a previsão de seu comportamento futuro pode fornecer subsídios fundamentais para a tomada de decisão dos gestores de rodovias.

Como resultado de interações ambientais e das condições de uso, as propriedades dos materiais constituintes de quaisquer estruturas mudam com o tempo. Os custos de reparo, manutenção e reposição de estruturas por falhas nos materiais influenciam fortemente nos investimentos na infraestrutura, com extensão de seus impactos inclusive para a utilização dos recursos existentes na construção de novos empreendimentos necessários (MEHTA, 2008). A manutenção do patrimônio rodoviário exige conhecimento do estado atual da malha rodoviária, dos processos deteriorativos aos quais está sujeita e dos custos envolvidos para o planejamento das ações necessárias para a sua preservação.

A investigação na área de gestão de pontes também encontra causa no elevado nível de responsabilidade associado a esse tipo de obras de infraestrutura. O registro de acidentes trágicos após ruptura de pontes em alguns países do mundo e com ampla divulgação pela mídia internacional direcionou os esforços da comunidade científica para o estudo da degradação dessas estruturas, visando compreender os riscos associados a essas obras e buscando garantir a segurança desses cruciais componentes da infraestrutura.

2

JUSTIFICATIVA

A principal motivação dessa pesquisa foi a investigação da deterioração das pontes através dos registros existentes de inspeções conduzidas em obras da rede rodoviária nacional. O estudo possui sua importância fundamentada em quatro fatores principais: o contínuo envelhecimento das pontes da infraestrutura brasileira, a singularidade dos processos de deterioração de pontes, a inexistência de pesquisas acadêmicas de taxas de deterioração de pontes reunindo dados de inspeções em obras nacionais e, finalmente, a ausência de uma metodologia de determinação dessas taxas adequada às normas e procedimentos de inspeções em pontes no Brasil.

O Parque de obras do Brasil encontra-se envelhecido, tendo na sua maioria obras construídas durante a década de 1970. A crise econômica vivenciada até o final do milênio promoveu um lapso dos investimentos no setor rodoviário, situação que culminou em ausência de serviços de manutenção necessários nas pontes rodoviárias, bem como falta da sua adequação de capacidade estrutural frente ao aumento de peso do trem-tipo (de 24t, passando por 36t, culminando em 45t em 2003). O inventário realizado pelo DNIT de 2013 a 2015 de acordo com a norma DNIT-010/2004-PRO (DNIT, 2004) resultou na classificação do estado de 7 obras como "críticas", 195 como "problemáticas" e 1.780 obras "em observação".

Cada país possui características específicas de clima e posição geográfica, com normas diversas de cálculo estrutural e de materiais. A utilização das rodovias também se diferencia em cada país, com variáveis associadas às características dos carros, dos veículos de carga, do tipo de transporte, da velocidade, entre outros. Assim sendo, a análise das características dos processos de degradação exige a tratativa particular dessa gestão por cada país.

Não existem estudos no país que reúnam os dados de inspeções de pontes da malha rodoviária brasileira e avalie a efetiva contribuição das metodologias adotadas para a eficiente gestão dessas obras, focando sobretudo nos subsídios da construção do seu módulo basilar de análise, a descrição do comportamento deteriorativo dessas estruturas.

Somente a partir da análise dos registros obtidos das inspeções em pontes realizadas pelos administradores de rodovias brasileiras é possível verificar uma metodologia apropriada para a mensuração das taxas de deterioração dessas estruturas e contribuir de forma conclusiva para futuras investigações nessa área do conhecimento.

Como fator agravante do cenário nacional, atualmente o Brasil enfrenta fortes restrições orçamentárias no setor de infraestrutura devido à atual crise econômica. Urge a necessidade da eficiente administração das intervenções a serem realizadas nesse parque de obras, com vistas a promover a segurança da população e do patrimônio público, através de decisões baseadas em critérios técnicos e econômicos, de modo a fazer o uso racional das verbas direcionadas para o setor.

A priorização técnica das intervenções nas pontes do país, seguida da correta definição dos serviços essenciais e necessários para cada obra crítica possibilitarão utilizar de forma racional e responsável o restrito orçamento nacional (*budget*). Soma-se ainda a responsabilidade com as futuras gerações, administrando as obras existentes de forma a não onerar demasiadamente os cidadãos nas próximas décadas, ou mesmo promover a pobreza face a tomada de decisões equivocadas sem subsídios técnicos.

3

OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho determinar taxas de deterioração de pontes a partir do desenvolvimento de metodologia sensível às características específicas dos dados disponíveis de inspeções brasileiras, contribuindo para a compreensão do processo deteriorativo dessas estruturas no país. Foram recolhidos, tratados e lançados os dados históricos das inspeções realizadas no Brasil em rodovias federais de acordo com metodologia proposta na pesquisa, adequando as pesquisas científicas atuais existentes aos específicos procedimentos utilizados nas inspeções de pontes rodoviárias nacionais. O trabalho também tem o objetivo de organizar as informações das inspeções, atualmente dispersas e em bases individualizadas para trazer ao conhecimento as características das pontes nacionais pertencentes a trechos sob regime de exploração rodoviária, agregando aos dados recolhidos no recente inventário nacional de pontes realizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes (DNIT).

A partir do conhecimento dos resultados de taxas de deterioração de pontes rodoviárias, a pesquisa contribui para possíveis ajustes nos procedimentos de inspeção de pontes realizados no Brasil identificando os dados relevantes para futuras calibrações das taxas de deterioração encontradas, bem como para a correlação dos resultados obtidos aos diversos agentes de deterioração associados a esse tipo de construção.

4

GESTÃO DE PONTES

A manutenção e a conservação de pontes compreendem ações ou estratégias que previnem, atrasam ou reduzem a deterioração das pontes ou de seus elementos, restauram a função das pontes existentes, mantêm pontes em uma boa condição e aumentam sua vida útil. A manutenção dessas obras pode ser dividida em três principais atividades: inspecionar, avaliar e manter (HURT & SCHROCK, 2016).

A inspeção é o fundamental para a manutenção e conservação das pontes. As inspeções iniciais que compõem o inventário são cruciais para a caracterização do parque de obras e as inspeções de rotina alertam os administradores quanto as mudanças nas condições dessas estruturas, indicando necessidades de intervenções. Ao combinar as informações disponíveis nos registros de inventários de pontes com aquelas coletadas em inspeções rotineiras ao longo do tempo, o administrador é capaz de prever as taxas de deterioração dessas estruturas e antecipar futuras necessidades e serviços.

Gestão de Pontes ou *Bridge Management* pode ser definida como a administração do processo de manutenção e conservação de pontes, consistindo na programação de inspeções e avaliações de pontes, no registro e manipulação desses dados com finalidade na elaboração das recomendações e ações de engenharia.

A gestão de pontes pode ser classificada de acordo com o tipo de análise realizada para a administração em três níveis: a análise a nível do elemento ou *element level*, a nível de projeto ou *Project level* e a nível de rede ou *network level*. Esses níveis de análise interagem, sendo os primeiros níveis sempre basilares para os próximos. A análise a nível do elemento se utiliza do modelo de deterioração e de uma lista possível de serviços de intervenções, propondo ao gestor diversas opções de ações de MR&R com o objetivo de eliminar o dano detectado em inspeções. A análise em termos de projeto utiliza as alternativas geradas na análise em termos de elemento para a proposição de alternativas de planejamento de ações de MR&R em períodos futuros, com estratégias focadas na manutenção da ponte em operação. Essa ferramenta de análise

utiliza os modelos de custos iniciais e de custo associados a vida-útil das pontes (*lyfe-cycle costs*) para a avaliação das alternativas de projeto propostas.

A análise em termos de rede utiliza as análises de projeto em diversas pontes para selecionar os serviços a serem realizados em cada uma das pontes do inventário ou em partes das pontes para enquadrar as ações de MR&R em orçamento delimitado ou para o atendimento de um desempenho mínimo gerencialmente definido para o conjunto em análise. A Fig. 4.1 apresenta as interações entre os três níveis de análise.

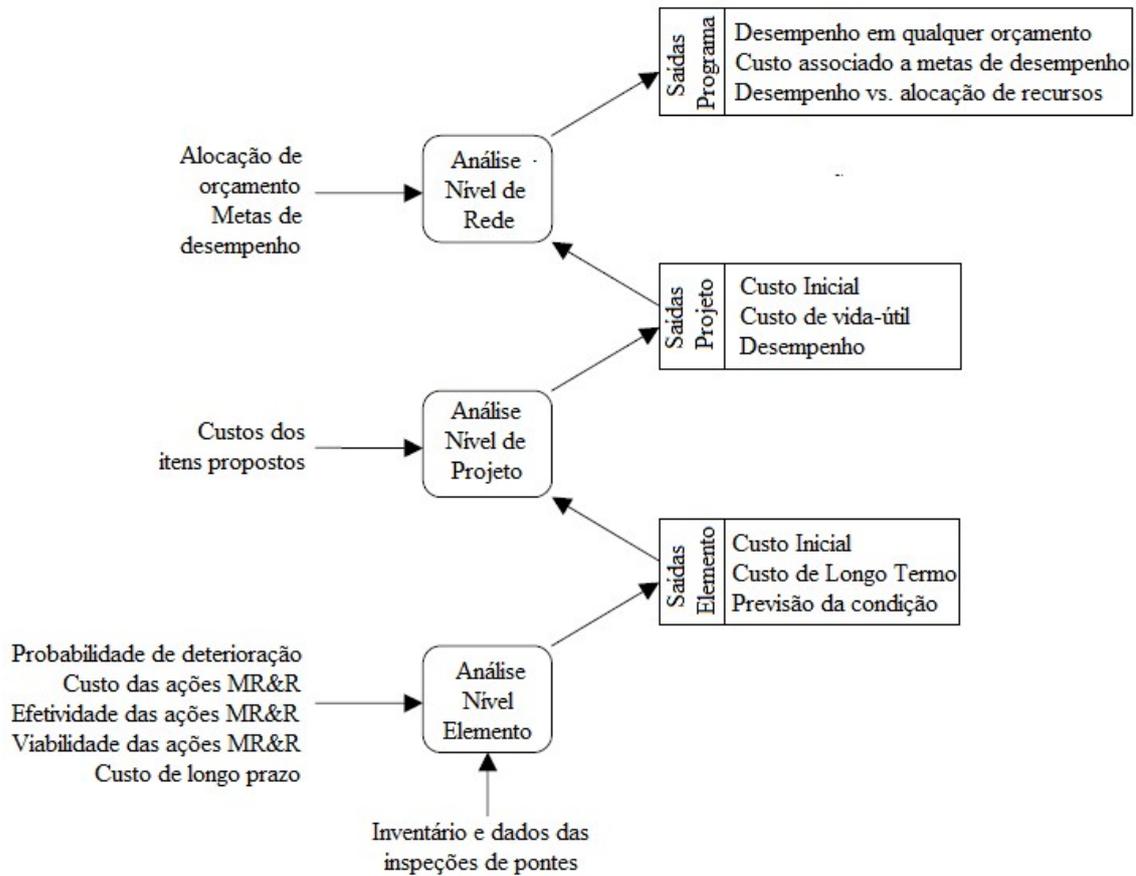


Figura 4.1 - Níveis de análises de gestão. (Fonte: Adaptado de THOMPSON *et al.*, 2003)

A gestão de pontes também pode ser classificada de acordo com a metodologia usada na administração. Existem metodologias que consideram apenas as necessidades específicas de cada uma das pontes e metodologias que combinem e comparem as necessidades individuais das obras com as necessidades do sistema. No caso dessas últimas, mais utilizadas, existem duas formas diferentes de abordagem da otimização: a aproximação do topo para a base e da base para o topo (*top-down* e *bottom-up*). Na abordagem do topo para a base é feita a definição dos objetivos principais para o conjunto de obras, são selecionadas as obras para intervenção e

definidas as ações a executar em cada uma dessas obras. Para a otimização a partir de uma aproximação da base para o topo é analisado o ciclo de vida útil de cada obra, escolhido o melhor tipo de atuação para cada uma das obras e atribuídas prioridades aos projetos de acordo com os objetos gerais do programa.

A aproximação do topo para a base é menos onerosa e rápida frente a exigência de análise e projetos mais elaborados para as obras escolhidas da abordagem base para o topo. Na abordagem do topo para a base não são abordados os itens pormenorizados das intervenções a serem realizadas na globalidade da obra, pois a atenção está focada no conjunto priorizado de obras selecionadas podendo por um lado ignorar-se a execução de serviços simples de baixo custo e rapidez de execução, aumentando a performance do conjunto e de outro incorrer no erro de não promover a intervenção de obras com taxas individuais altas de deterioração impactando na segurança e no orçamento futuro. No entanto, a aproximação da base para o topo é normalmente utilizada para pequenos sistemas pois a otimização desse procedimento para grandes parques de obras pode ser demasiadamente onerosa, morosa e de difícil execução, não retirando com isso o seu caráter ideal (FLAIG *et al.*, 2000).

4.1 Características de um Sistema de Gestão de Pontes

Em 1980 os administradores de rodovias nos Estados Unidos da América possuíam diversos ciclos de inspeções de pontes de acordo com normas daquele país e também registros de inspeções com metodologias próprias tomadas nas primeiras décadas. Estes dados permitiram aos gestores na época observarem como diferentes tipos de pontes e de elementos – com diferentes materiais constitutivos – resistiam à deterioração e aos desafios do meio ambiente e do tráfego. A partir de uma decisão no âmbito federal iniciou-se a criação de uma grande base de dados nacional para utilização, com registros padronizados e uniformes de acordo com normas e procedimentos. Em 1980, a Carolina do Norte e outros estados iniciaram o uso *dos Bridge Management Systems (BMS)* para a gestão desses dados. O desenvolvimento dos *BMS Pontis e BRIDGIT* levou a significativas mudanças nas práticas de inspeção de pontes (HURT e SCHROCK, 2016).

Os BMS podem ser definidos como ferramentas computacionais auxiliares para a definição de políticas, processos e procedimentos necessários para atingir ou manter um desejado nível de

desempenho, de segurança e de durabilidade das pontes de um determinado conjunto de obras sob um orçamento disponível. O objetivo dos atuais BMS vai além do simples armazenamento de informações das pontes, consistindo-se em uma única plataforma que abrange desde a entrada dos dados até o suporte avançado para a tomada de decisões gerenciais (MORE, 2017).

Os BMS devem ser compreendidos como ferramentas de suporte para a avaliação das políticas possíveis através de análises como "e se..." e não de decisão da melhor opção ou da escolha entre duas possíveis opções, tendo em vista que as Obras de Arte Especiais (OAE) não podem ser administradas sem o conhecimento prático e a experiência do gestor (AASHTO, 2013).

Existem diferentes tipos de BMS desenvolvidos, com distintos critérios para as coletas e gestão das informações. As abordagens de cada BMS são resultantes da adaptação de metodologias usadas de um país para o outro, sendo usualmente desenvolvidos sob a orientação das práticas próprias de cada país ou região, visando automatizar procedimentos já realizados pelas entidades de engenharia nacionais e pelas agências de exploração rodoviárias na administração do parquet de obras (MIRZAEI *et al.*, 2015).

Os BMS são divididos em três módulos de base sendo: o banco de dados, as inspeções periódicas e avaliações e, finalmente, as ferramentas de suporte à decisão e gestão. O banco de dados é implementado no sistema através do registro do inventário das obras, contendo todos os dados disponíveis de construção e de projeto (materiais, sistema construtivo, capacidade de carga, dimensões entre outros). No módulo das inspeções e avaliações são inseridos os dados periódicos relativos ao estado dessas obras coletados em inspeções e possíveis mudanças de dados do inventário tais como: alteração volume de tráfego, modificações relativas às obras, entre outros. Apesar do banco de dados ser item comum aos BMS, cada sistema tem seu próprio formato de armazenamento com dados distintos e específicos (BRANCO e BRITTO, 2003).

O desenvolvimento dos BMS mostrou que as informações coletadas nas inspeções podem ser usadas como base para a realização de análises para tomadas de decisão ao nível de rede. Ao incluir o módulo de modelos de deterioração no software os gerenciadores são capazes de prever futuras necessidades e serviços para a rede de pontes e modelar diferentes cenários de manutenção e reforço que irão afetar a condição das estruturas da rede.

Nas últimas décadas, a área de pesquisa de gestão de pontes vem crescendo, acrescentando, além da meta inicial de assegurar a segurança das estruturas a meta de maximizar a eficácia da aplicação dos recursos financeiros disponíveis. A próxima etapa para além da minimização dos custos de investimentos na segurança dessas obras será de tornar possível o cálculo do retorno dos investimentos em pontes. Ações de limitação de cargas para pontes em serviço podem ser utilizadas, bem como manter pontes obsoletas estruturalmente em serviço podem resultar na redução da capacidade de tráfego de algumas vias. Justificar os investimentos na infraestrutura pública, tais como rodovias federais, é mais fácil quando os benefícios são quantificados.

Para as análises gerenciais e de suporte na tomada de decisões, os BMS utilizam-se da ferramenta de análise de custo de vida ou *Life-Cycle Costs Analysis* (LCCA). A principal abordagem do LCCA é considerar não somente os custos iniciais das edificações tais como projetos, construção e execução, mas também os custos de longo prazo, tais como operação, manutenção, reparos e reabilitação (RYALL, 2001). Os dados resultantes das inspeções são a entrada para os modelos de análise. Os modelos de análise são divididos em três partes sendo o módulo custo, o módulo de degradação e o módulo de otimização. A Fig. 4.2 mostra a estrutura típica de um BMS.

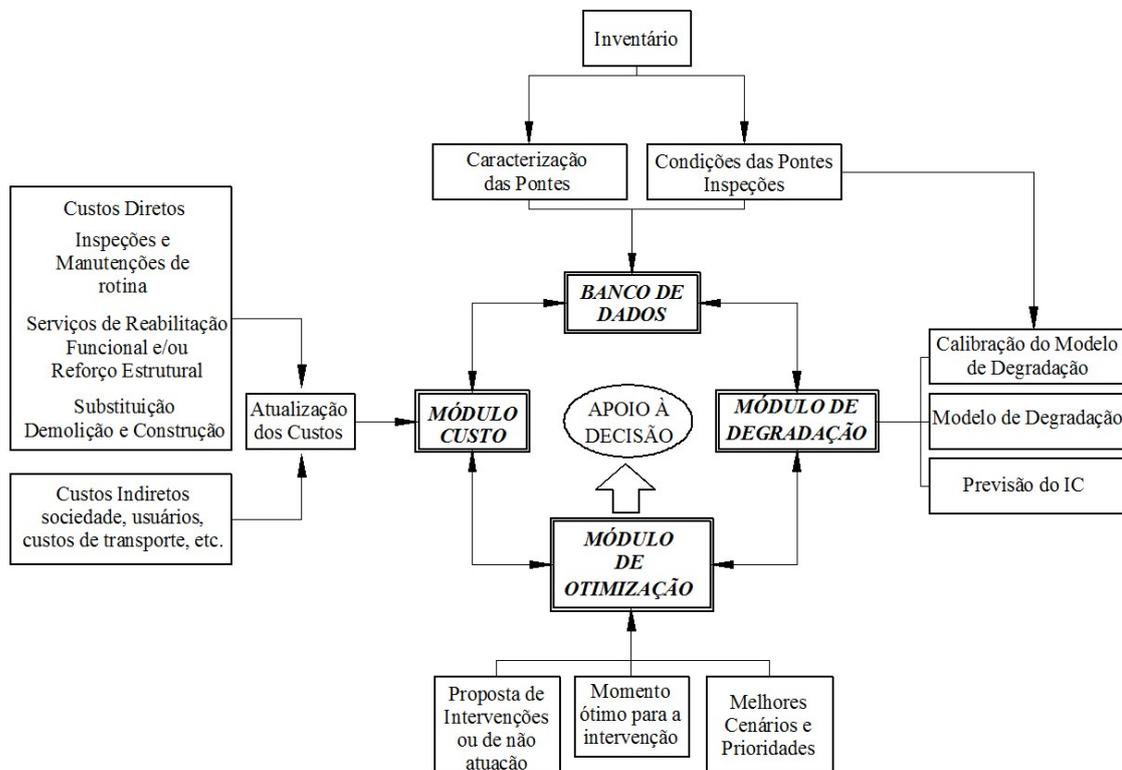


Figura 4.2 - Estrutura Típica de um BMS

Os modelos de deterioração e as ferramentas analíticas de otimização possibilitam avaliar o desempenho das pontes e mensurar riscos, prever e planejar as intervenções, determinar prioridades, calcular os custos envolvidos nas obras e planejar orçamentos otimizando a destinação dos recursos. Tendo em vista ser o objeto da pesquisa, os modelos de deterioração serão definidos e apresentados mais detalhadamente no capítulo 5.

O módulo custo determina os custos de ciclo de vida, com foco em um período determinado da fase de serviço das pontes e de um determinado parquet de obras. Os custos são bastantes dependentes das características econômicas de cada país e de cada região, devendo ser estudados e determinados parâmetros específicos para a estimativa de custos para determinado conjunto de obras (ALMEIDA, 2013).

Os métodos de otimização selecionam um grupo de pontes de forma a obter o máximo retorno possível do investimento aplicado, diminuindo custos do administrador e dos usuários. Outra parte fundamental do BMS é a potencialidade de determinar as prioridades e otimizar a alocação das verbas disponíveis em um plano definido no tempo, com intervenções de curto e longo prazo.

O sistema precisa considerar as restrições de orçamento ou ausência delas. Se diversos recursos estão disponíveis é possível determinar o período ótimo que as alternativas selecionadas podem ser programadas. Quando não há orçamento disponível para manter um desejado nível de serviço, o BMS pode calcular as consequências econômicas do baixo nível de serviço e retornar itens objetivos de prioridades para que o impacto para o administrador e para os usuários possa ser minimizado.

Alguns pesquisadores da área apontam fraquezas nesses sistemas associadas à ausência de registro de características de riscos ao comportamento das pontes, por vezes desconhecidas ou de alto custo para serem determinadas ao denominado nível de elemento. Por exemplo, para aferir-se o risco de falhas à fadiga podem existir detalhes que os administradores de pontes usualmente não apontam nas inspeções de rotina. Assim sendo, determinar o nível de risco de um grupo de pontes e como alocar recursos para a sua redução necessariamente envolveriam o levantamento de variáveis importantes e a qualidade desses apontamentos, contribuindo para tornar esses sistemas de gestão de pontes sensíveis ao maior número de fatores de risco associados (THOMPSON, 2016).

5

MODELOS DE DETERIORAÇÃO DE PONTES

A deterioração de uma ponte é definida como um processo de declínio na condição de classificações a partir das condições normais de operação, devido às mudanças físicas e químicas dos componentes da ponte (ABED-AL-RAHIM e JOHNSTON, 1995). Essas alterações são frequentemente interpretadas como danos ao sistema estrutural e podem exigir ações de MR&R, encontrando correntemente dificuldades para quantificar com precisão a quantidade de alterações sofridas e seus efeitos no sistema estrutural. Os modelos de deterioração compensam esses desafios levando em conta toda ou a maior parte do inventário, usando uma abordagem estatística para investigar as tendências gerais do desempenho estrutural em elementos individuais.

A previsão acurada do estado futuro de um elemento de uma ponte é um fator crucial para uma gestão eficiente dessas estruturas (MORCOUS *et al.*, 2002b). A chave para a programação de quando as intervenções serão necessárias no futuro depende da habilidade em prever a condição futura dos elementos das pontes. Essa estimativa pode estar baseada na experiência de profissionais da área ou baseados em cálculos matemáticos de modelos de deterioração de pontes. Finalmente, a parametrização do processo deterioração é muito importante, uma vez que uma compreensão do comportamento da ponte e uma previsão precisa das suas condições futuras pode levar a decisões oportunas de gerenciamento e manutenção para garantir a segurança e evitar grandes catástrofes (ADARKWA e ATTOH-OKINE, 2016).

O histórico de inspeções para qualquer estrutura pode ser usado para verificar a deterioração dos seus componentes ao longo da sua vida. Para qualquer grupo de pontes, a taxa de deterioração e a estimativa da sua vida útil poderá ser estimada utilizando seus dados históricos de avaliação do Índice de Condição. Os registros das informações das inspeções no sistema têm resultado em uma base de dados das condições das pontes através das décadas em diversos países do mundo. Este procedimento possibilita aos administradores de rodovias a oportunidade de mapear as taxas de deterioração dos elementos ao longo do tempo e como elas variam com

os materiais, tipos construtivos, volume de tráfego, entre outros. Esta base de dados é a base para os modelos numéricos de deterioração de pontes. As pesquisas conduzidas na área constaram que as inspeções em pontes, cujo objetivo inicial era o de verificar danos nas estruturas e garantir a segurança aos usuários possuíam grande potencial de fornecer dados para a eficaz administração dos investimentos públicos (HURT e SCHROCK, 2016).

A fim de vincular uma variável de inspeção a uma medida de classificação de condição de ponte, muitas pesquisas foram conduzidas investigando o efeito de variáveis individuais (BEN-AKIVA e GOPINATH, 1995; MAUCH e MADANAT, 2001; MORCOUS e HATAMI, 2011). A seleção apropriada de variáveis explicativas também é importante, pois a inclusão de variáveis adicionais em um modelo ou BMS pode resultar apenas em melhoria da precisão geral. (CHANG *et al.*, 2017).

O planejamento das ações sobre um conjunto de pontes deve ser elaborado com vistas a aumentar a vida útil dessas estruturas. Assim, a compreensão do fenômeno de deterioração nas pontes é de grande importância na engenharia de transportes dada sua consequência de redução da vida útil e segurança dessas estruturas, sendo este último relacionado à perda sua capacidade de carga (KUMAR *et al.*, 2015). Assim, as decisões gerenciais são geralmente tomadas a partir do conhecimento do estado atual da OAE e na previsão de seu estado no futuro.

Um modelo de deterioração representa o padrão do processo deteriorativo e determina com qual velocidade esse processo acontece em determinado estoque de pontes, denominada taxa de deterioração. A Fig. 5.1 mostra o comportamento ao longo do tempo de uma ponte hipotética considerando a vida útil de projeto, a evolução da deterioração a partir de um modelo e a determinação de um desempenho mínimo estimado. O gráfico ilustra o formato de gráficos com curvas de deterioração, tendo o seu eixo horizontal representando o tempo e o eixo vertical indicando o IC de acordo com a escala numérica usada. No gráfico da Fig. 5.1 podemos observar que a ponte tem uma performance esperada acima da estimativa do seu projeto. Contudo, devido a degradação do material, cargas acima de projeto, falhas na estrutura e na construção, erros de projeto e outros, sua performance é menor do que aquela esperada. Em determinado T1 o dano existente demanda uma intervenção, após o período T2 o reparo realizado prevê alteração de capacidade de carga. A partir desses períodos, é possível traçar uma projeção de estimativa do desempenho esperado da obra, a partir da definição do seu nível de serviço. Este comportamento ilustra o desempenho comum para pontes sob gestão de

manutenção. A vida útil das estruturas pode ser estendida de acordo com as intervenções adotadas de reabilitação e manutenção. O decaimento ou inclinação das curvas no gráfico do Índice de Condição (IC) *versus* tempo descreve a velocidade do processo deteriorativo, ou seja, a taxa de deterioração da ponte no tempo.

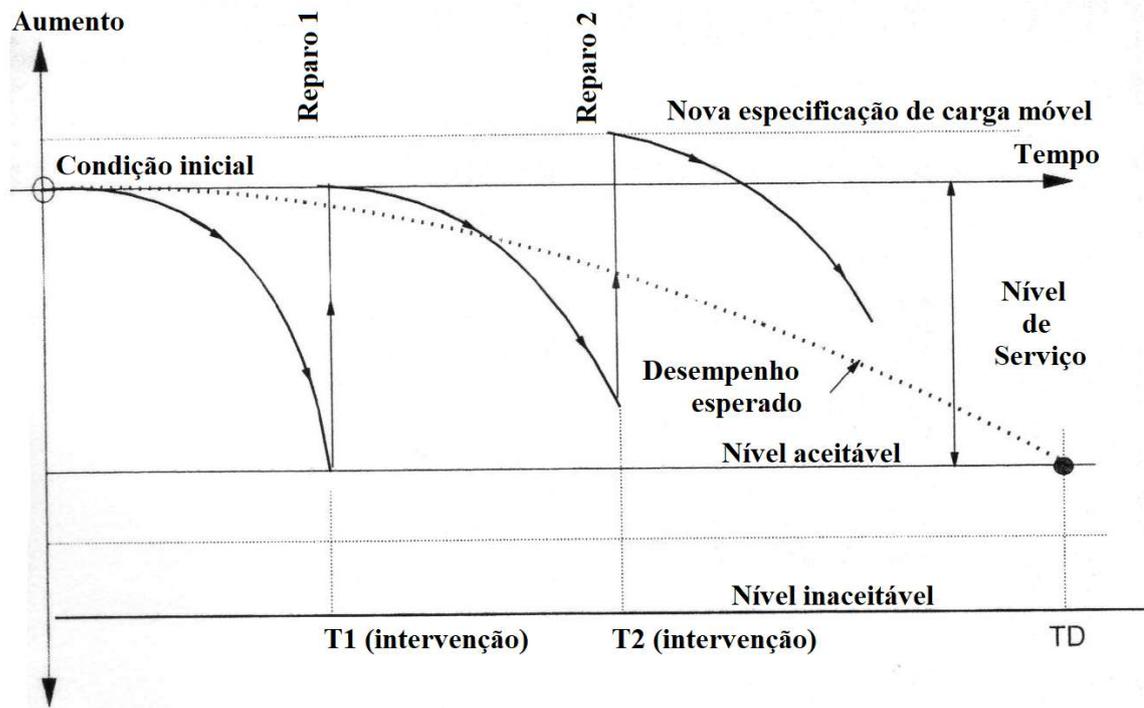


Figura 5.1 - Comportamento de uma ponte submetida a intervenções ao longo do tempo. (Adaptado de RYALL, 2001)

Os modelos de deterioração usam vários ciclos de estado para detectar tendências, extrapolando-as no tempo. De acordo com o *Manual for Bridge Evaluation - 2* (AASHTO, 2013) é necessário um mínimo de três a quatro ciclos de dados de vistorias para o desenvolvimento de um modelo de deterioração. Como uma alternativa, os administradores de rodovias podem utilizar-se da experiência de engenheiros e inspetores de pontes para estimar modelos.

Para uma extrapolação acurada da deterioração das pontes, é necessário conhecer e identificar os fatores que tenham maior influência nas condições dos elementos através do tempo. O tipo do elemento, o material constituinte, as condições de exposição, a idade, o histórico de manutenção e o meio no qual a obra está localizada são exemplos de fatores importantes que afetam as taxas de deterioração. Outros fatores podem prevalecer em certos elementos ou específicas regiões. Por exemplo, o volume de tráfego e a presença de sais na atmosfera são conhecidos pela importância nas taxas de deterioração da estrutura.

O modelo de deterioração se situa entre o conhecimento do estado da estrutura e os processos de análise gerenciais, de acordo com o fluxo apresentado na Fig. 5.2. Sua utilização é considerada a base para a análise LCCA, tendo em vista que na abordagem de custos de vida os custos de manutenção e dos usuários são funções do tempo dependentes do estado da ponte, também dependente do tempo (ZAYED, 2002; WELLALAGE, 2014).

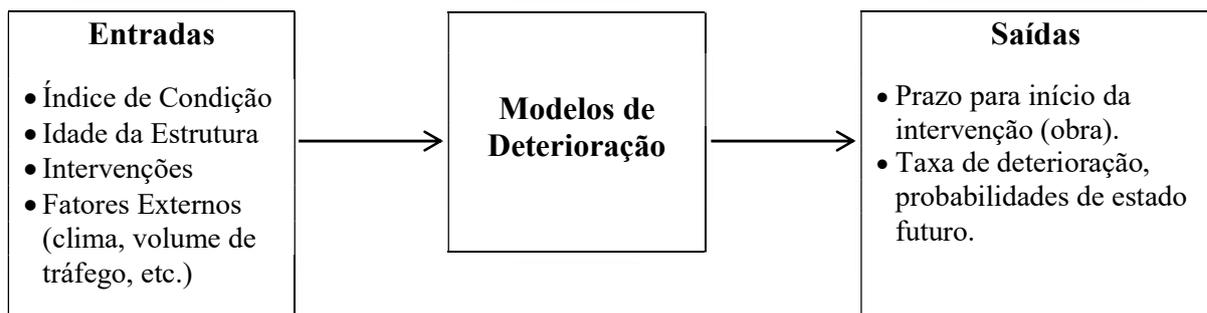


Figura 5.2 - Fluxo do processo com modelos de deterioração.

Cada elemento da ponte pode ter materiais distintos e estar submetido a diferentes demandas de carga, por exemplo, as juntas de dilatação são construídas de material polimérico e estão submetidas a cargas de impacto de cada veículo que atravessa a ponte, os Guarda-corpos são de concreto armado e estão sujeitos a carga apenas em raras ocasiões. O Índice de Condição geral é suficiente para alertar a existência de diferenças graves, mas não é sensível para mensurar as velocidades de deterioração de elementos individuais. Assim, elementos diferentes possuem distintas funções, taxas de deterioração e necessidades de manutenção. As formas de quantificar e mensurar os danos para subsidiar a determinação dos trabalhos de manutenção e sua prescrição divergem de acordo com o tipo elemento da ponte.

Também é necessário abordar diferentemente os danos sofridos nos diferentes elementos estruturais. De acordo com os códigos norte-americanos, esses elementos possuem cinco níveis de escala de dano, refletindo os processos mais comuns da deterioração sendo: protegido, exposto, atacado, danificado ou falhado. No caso da laje de uma ponte de concreto, os danos são quantificados através de fissuras e delaminações (AASHTO, 2013).

Importante contribuição do estudo desses processos, mais recentemente, a partir do mais aprofundado conhecimento das diferentes taxas de deterioração dessas estruturas, as pesquisas internacionais iniciaram uma nova abordagem denominada de inspeção de pontes baseadas na

teoria da confiabilidade - *Reliability-based bridge inspection*. A partir dessa abordagem, ao conhecer os riscos associados para cada uma das pontes do seu parque de obras, o administrador pode ajustar os intervalos das inspeções, podendo ser redefinido abaixo dos 12 meses previstos nas normas como mínimo ou até no máximo 72 meses, dependendo do histórico das pontes e das suas condições do momento da análise. O objetivo da abordagem é permitir uma alocação mais eficiente dos recursos de inspeção e concentrar esses recursos em áreas de maior preocupação quanto à segurança da população (RYALL, 2001).

A metodologia é baseada em três pilares: o risco, a falha de um elemento de ponte e a confiabilidade. O risco é definido como a probabilidade da ocorrência de um evento (no caso, a probabilidade de falha de um elemento da ponte) e a consequência da ocorrência desse evento. A falha de um elemento é definida como o estado no qual o elemento possui sua função comprometida e, finalmente, a confiabilidade é definida como a probabilidade da falha não ocorrer durante um período determinado. Assim, a confiabilidade irá mensurar o período em que o elemento exerce sua função conforme especificações de projeto, para um determinado período de tempo dado, ou seja, ele não sofre deterioração ou dano suficientes para perder sua funcionalidade. Essa probabilidade é função do projeto inicial, da construção dos elementos individuais, da carga e do ambiente no qual o elemento está exposto, a partir da sua condição no começo do período avaliativo.

5.1 Índice de Condição

Os programas de gestão de pontes existentes, internacionais ou nacionais, estão fundamentados em análises dos Índices de Condição ou Nota Técnica (IC). O IC é um índice numérico aferido em uma inspeção do desempenho de uma determinada ponte. O IC pode ser atribuído por elemento, por conjunto de elementos ou para a totalidade da obra e reflete o resultado final da avaliação do estado da obra. Frequentemente, o IC agrega uma atribuição subjetiva da condição estrutural da ponte, relacionando o valor à segurança da obra sendo, portanto, o principal dado utilizado para as decisões gerenciais sobre as ações necessárias de intervenção. A mensuração do estado estrutural da ponte pode ainda ser destacada, fazendo uso da escala do IC para a qualificação das condições de funcionalidade e de durabilidade isoladamente. Dessa forma, mais de um IC pode ser atribuído para uma mesma ponte.

As denominações dos IC e sua escala variam de acordo com o país. Nos Estados Unidos da América o IC é denominado “*Condition Rating - CR*” e possui 10 níveis, iniciando do valor 0 (fora de serviço) até 9 (excelente condição), conforme Tab. 5.1 elaborada pelo Departamento de Transportes (*United States Department of Transportation - USDOT*) e pela Administração de Rodovias Federal (*Federal Highway Administration – FHWA*) (FHWA, 1995). Além dos níveis constantes da Tab. 5.1, os Estados Unidos da América utilizam outras tabelas com a descrição dos danos para cada CR por elemento da estrutura, padronizando o índice no intuito de diminuir a subjetividade da avaliação. Essa metodologia foi utilizada no inventário nacional norte-americano (*National Bridge Inventory – NBI*) (USDOT, 2008).

Tabela 5.1 - Índices de Condição de Pontes utilizados nos Estados Unidos “*Condition Rating*”

| IC | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|------------------|-----------|-----------|-----|--------------|------------|--------------|-------|---------|------------------|-----------------|
| Descrição | Excelente | Muito Bom | Bom | Satisfatório | Suficiente | Insuficiente | Grave | Crítico | Ruptura iminente | Fora de Serviço |

Na Alemanha o BMS utilizado é o programa SIB-Bauwerke. O programa permite selecionar condições pré-determinadas de 0 a 4 para três parâmetros: estabilidade estrutural, segurança e durabilidade. Após a entrada desses dados o programa gera o IC denominado *Condition Index* (IC) de acordo com a Tab. 5.2.

Tabela 5.2 - IC considerado na Alemanha. Fonte: Adaptado de USDOT, 2008.

| IC | 1.0-1.4 | 1.5-1.9 | 2.0-2.4 | 2.5-2.9 | 3.0-3.4 | 3.5-4.0 |
|------------------|-------------------------------------|----------------------------|--|--|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Descrição | Excelente Condição Estrutural | Boa Condição Estrutural | Satisfatória Condição Estrutural | Condição Estrutural Insatisfatória | Crítica Condição Estrutural | Condição estrutural inadequada |

O IC usado no Canadá, especialmente pelas províncias de Quebec (Ministério dos Transportes de Quebec - MTQ) e de Ontario é denominado *Bridge Condition Index* (BCI) e possui escala de 1 a 6, de acordo com a severidade dos danos. A severidade do dano leva em conta o tipo de elemento afetado e sua extensão, sendo a condição 1 para condições de danos muito severas e 6 para o estado “como novo”, conforme mostra a Fig. 5.3.

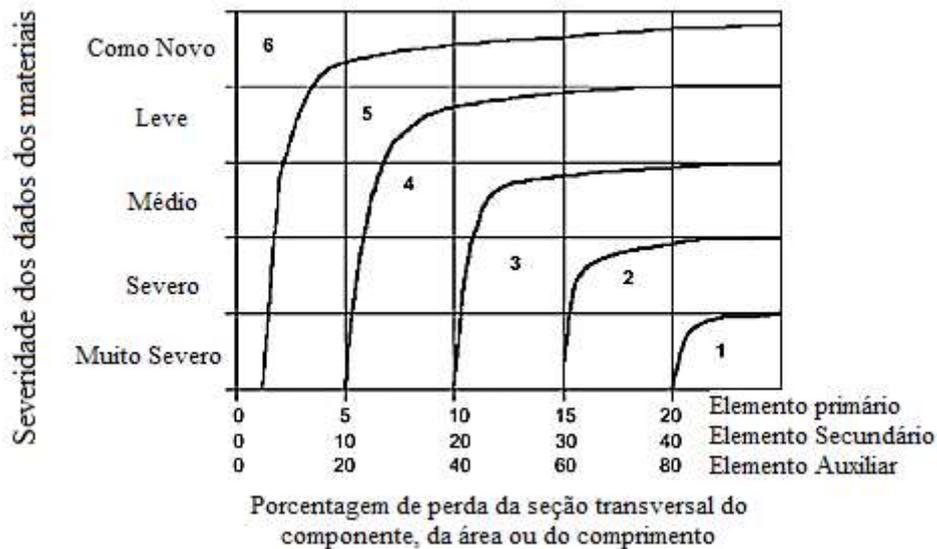


Figura 5.3 - Índice de Condição adotado nas províncias de Quebec e Ontario.
Fonte: Morcous (2002b)

Na Suíça, o BMS desenvolvido é denominado “KUBA-MS” e possui IC de 1 a 5, sendo 1 para melhor condição e 5 para a pior condição (HAJDIN, 2008). Na Finlândia, no programa denominado "FINNRA", também são utilizados 5 níveis para os elementos estruturais, sendo 0 para condições de novo e 4 para a condição muito ruim - "very poor" (USDOT, 2008). A França utiliza o IC com 5 níveis estipulados pelo *Image de la Qualité des Ouvrages d'Art* IQOA, variando de 1 a 3E como mostrado na Tab. 5.3:

Tabela 5.3 - Classificação dos Índices de Condição pelo IQOA.
Fonte: Odent *et al.* (2008).

| IC | Descrição |
|----|---|
| 1 | Bom estado geral. |
| 2 | 2 Falhas ou pequenos danos estruturais. Manutenção não é de caráter emergencial. |
| | 2E Falhas ou pequenos danos estruturais. É necessária a manutenção urgente para impedir a rápida propagação dos danos na estrutura. |
| 3 | 3 A estrutura possui danos estruturais e necessita de reparos. O caráter não da intervenção não é emergencial. |
| | 3E A estrutura possui danos estruturais e necessita de reparos. A capacidade portante da estrutura é insuficiente ou a velocidade de evolução dos danos levarão a insuficiência em curto prazo. Os serviços de intervenção possuem caráter emergencial. |

No Japão o IC é classificado em cinco grupos: 0-19, 20-39, 40-59, 60-79 e 80-100. Estes grupos são classificados como “risco”, “pequeno risco”, “moderado risco”, “praticamente seguro” e

“seguro” (MIYAMOTO, 2009). Os valores são resultantes de equações que levam em conta principalmente o tipo de elemento e o tipo do dano atribuído, entre outros fatores.

Usualmente na gestão das OAEs, o tempo para as intervenções de pontes rodoviárias é definido através da adoção de um valor mínimo para o IC, também podendo ser entendido com um mínimo desempenho aceito para o grupo de obras. Desta forma, no instante em que a ponte é avaliada com o IC mínimo definido, as intervenções são programadas para imediata execução. Estudos conduzidos por YOON e HASTAK (2016) buscaram otimizar este método de intervenção ao considerar o IC por elemento de uma mesma região. No artigo, Yoon e Hastak (2016) procuraram verificar uma prática também comumente utilizada de se considerar como IC da região ou do elemento de ponte o IC mínimo atribuído a algum dano de seus constituintes. Como resultado, o estudo revelou que a programação das intervenções apenas pelo IC, sem a consideração do comportamento do dano ao longo do tempo, leva a intervenções desnecessárias com reflexo direto nos custos. Esta abordagem somente é possível nos procedimentos de inspeção de pontes com classificação de IC por elemento e registro do dano.

5.2 Os tipos de modelos de deterioração de pontes

Os primeiros modelos de deterioração criados no setor de infraestrutura rodoviária foram desenvolvidos para implementação nos sistemas de gestão de pavimentos - *Pavement Management Systems* (PMS). (MORCOUS e HATAMI, 2011). Os processos de deterioração de pavimentos rodoviários se diferenciam dos processos de deterioração de pontes rodoviárias devido aos diferentes tipos de materiais empregados e ao específico comportamento estrutural.

Existem diversos métodos de determinação de modelos de deterioração de pontes. Os modelos de deterioração podem ser de natureza empírica ou mecanicista. Os modelos empíricos se utilizam de dados experimentais, enquanto os modelos mecanicistas são desenvolvidos a partir de modelos teóricos associados aos mecanismos de degradação.

Apesar das diferentes abordagens, esses métodos podem ser classificados em modelos de deterioração determinísticos, estocásticos e de inteligência artificial (SETUNGE, 2011). Os modelos de deterioração determinísticos são obtidos através de modelos estatísticos e de regressão, os quais procuram descrever tendências a partir de dados históricos de deterioração

das estruturas. As funções resultantes desses modelos consideram que a obra se inicia com o valor de 100% e termina sua vida-útil com o valor zero.

Nos modelos de deterioração estocásticos os estados de condição são compreendidos como variáveis randômicas de entrada, atribuindo-se probabilidades da ocorrência de determinado estado no universo amostral. Os modelos de deterioração utilizando inteligência artificial procuram encontrar relações entre o Índice de Condição e variáveis internas e externas às pontes. As variáveis internas às pontes são aquelas decorrentes da estrutura e suas características (tamanho dos vãos, idade da ponte, sistema construtivo, entre outras). As variáveis externas às pontes representam os agentes externos que podem afetar na sua deterioração, tais como o volume de tráfego, o tipo de tráfego, o clima da região e sua respectiva agressividade. (MORCOUS e LOUNIS, 2005)

Para o desenvolvimento dos modelos determinísticos podem ser realizadas regressões lineares, não lineares, extrapolações lineares e ajustes de curva. O método procura verificar a relação entre o processo de deterioração das pontes e outras variáveis que podem influenciar esse processo tais como a idade da obra, o sistema construtivo, o clima e a sua agressividade, entre outras. São gerados parâmetros após a regressão estatística gerando funções com suas respectivas propriedades (médias, desvio padrão e erros). O resultado da aplicação das funções descritivas da deterioração resultantes de modelos determinísticos são valores que representam a média da condição de estado prevista, nos quais nenhuma probabilidade é mensurada (MORCOUS, 2011).

A extrapolação linear é o método mais simples de se predizer um estado futuro, devendo ser realizada considerando determinado volume de tráfego, carga e histórico de manutenção. Para sua utilização o método requer no mínimo dois pontos do IC, podendo o primeiro ser considerado na construção e o segundo o oriundo de inspeção posterior. Apesar desse método possuir acurácia para pequenos intervalos de tempo ele possui grandes erros na determinação de longos períodos. Além disso, a extrapolação linear não determina a taxa de deterioração de novas obras ou obras que tenham sofrido diversos tipos de manutenção ou reforço.

A regressão é normalmente utilizada para aferição da existência de correlação entre duas ou mais variáveis e seu grau de interdependência (covariância), podendo cada variável ser descrita de acordo com sua média, variância e desvio-padrão.

Como exemplo de modelo determinístico, destaca-se o modelo de deterioração do sistema de gestão de pontes do Japão, *The Bridge Management System in Japan (J-BMS)*. O modelo japonês se utiliza de uma função biquadrática para a curva de deterioração convexa representada pela capacidade de carga (MIYAMOTO, 2009), determinada pela equação:

$$I = b_L - a_L t^4 \quad (5.1)$$

sendo b_L o índice de condição inicial, a_L uma constante experimental determinada experimentalmente e t a idade da ponte. A condição inicial é aquela aferida logo após a abertura ao tráfego, sendo $CI=100$ e $b_L = 100$. O *J-BMS* também utiliza a estimativa de deterioração por elementos e sugere funções adaptáveis a partir de dados originados de novas inspeções. A estimativa do índice de condição baseado em cada inspeção possibilita aos engenheiros definirem os parâmetros b_L e a_L estabelecendo a curva de deterioração para cada elemento. A grande vantagem desse modelo é que a deterioração em curva convexa possibilita definir a deterioração baseada em apenas em um dado de inspeção visual. É importante calibrar os parâmetros da função da curva após cada novo registro de inspeções ou de ciclo de inspeções, atividades executadas pelo sistema integrado ao *J-BMS*, denominado *BREX*.

Outro método de regressão foi desenvolvido para análise de taxas de deterioração de pontes em Queensland, Austrália (BU *et al.*, 2013 e JIANG, 2010). Semelhante a diversos métodos análise de deterioração dessas estruturas, as pontes sem alteração do IC são separadas do conjunto de dados bem como as pontes com melhoria do IC, ilustrado para um elemento em particular na Fig. 5.4. Apenas as pontes com decaimentos do IC são submetidas a uma regressão polinomial de terceira ordem:

$$IC_i = \beta_0 + \beta_1 t_j + \beta_2 t_j^2 + \beta_3 t_j^3 \quad (5.1)$$

sendo IC a nota da ponte $i = 1, \dots, 34$, e t o tempo $j = 1, \dots, 7$.

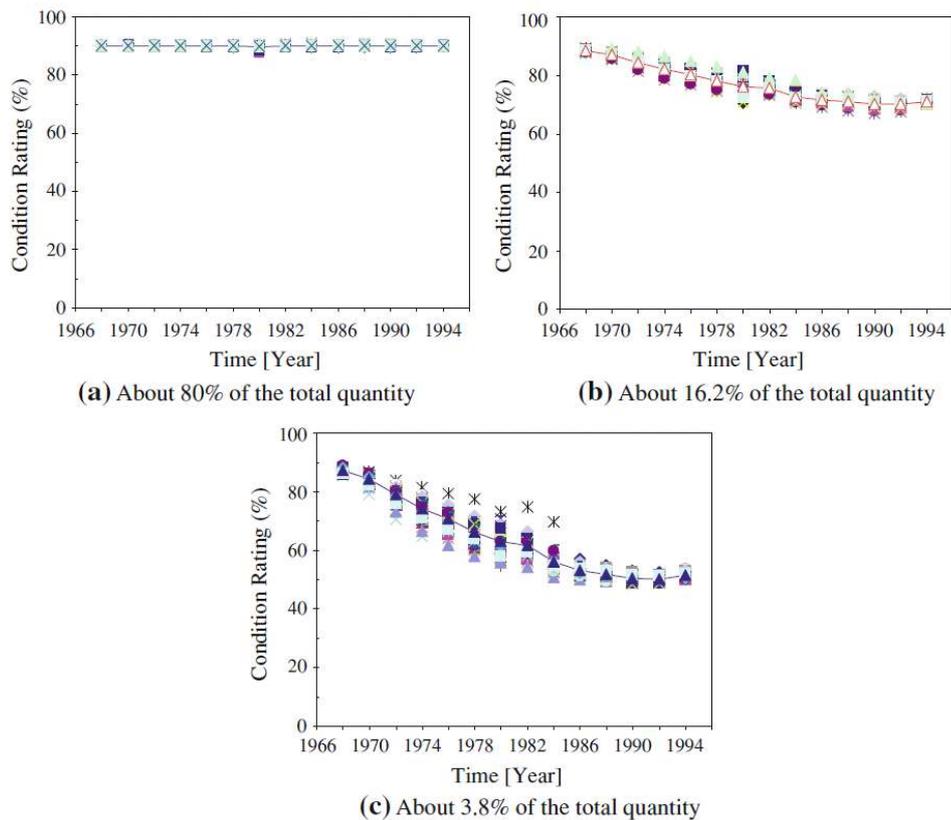


Figura 5.4 - Divisão das notas em grupos de pontes segundo Bu. Fonte: Lee (2013)

As curvas de regressão, neste contexto, serão utilizadas apenas como forma descritiva de tendências. Para a utilização de regressão como forma inferencial algumas suposições devem ser observadas, como independência entre as observações, normalidade e variância constante. A suposição de independência é claramente violada, pois os dados de uma mesma ponte são claramente dependentes entre si. Como os dados têm uma estrutura longitudinal, um modelo inferencial deve levar em conta a estrutura de dependência existente em uma mesma ponte.

Os modelos de deterioração estocásticos produzem uma previsão probabilística do IC no futuro, melhor representando as incertezas inerentes aos processos de deterioração, sendo a principal causa da prevalência da sua adoção em detrimento ao uso de modelos de deterioração determinísticos.

A abordagem probabilística considera que a deterioração ao longo do tempo é desconhecida e atribui probabilidades para que ela ocorra de acordo com determinada relação ou função. Nesse modelo os ICs formam as variáveis aleatórias de entrada para a análise estatística. O processo de deterioração é de natureza estocástica, ou seja, qualquer que seja a condição de uma ponte

no presente a previsão do seu futuro segue uma distribuição de probabilidades, enquanto que no modelo determinístico esse estado futuro é assumido como um valor certo, ou seja, a ponte se deteriora de acordo com uma função (MORCOUS, 2002b).

Os principais modelos estocásticos dividem-se em Modelos de *Markov*, Modelos Semi-*Markov*, Modelos de Sobrevivência *Weibull*, Modelos Híbridos *Markov-Weibull*, Modelos de Deterioração por Processo *Gamma* (ASTROADS, 2015; THOMAS *et al.*, 2016).

Os Modelos Semi-*Markov* procuram contornar a limitação em não relacionar a degradação no tempo, como encontrados nos Modelos de *Markov*. Os Métodos de Regressão são utilizados em conjunto com os Processos de *Markov*, determinando a Matriz de Probabilidades de Transição ou *Matrix of Probability Transition* (MPT) a cada período de transição e procurando utilizar dados históricos que não possuam intervalos de tempo regulares, condição para a aplicação do Modelo de *Markov* (MADANAT, 1995).

Nos Modelos de Sobrevivência *Weibull* a mensuração da deterioração é abordada sobre a perspectiva da vida remanescente da estrutura, seja por previsão de colapso ou pela suposição que a ponte chegou em determinado IC considerado para pontes "fora de serviço". O método procura diminuir a queda abrupta do IC encontrada nos Modelos de *Markov* especificamente nos primeiros anos (SOBANJO e THOMPSON, 2011).

Modelos de Deterioração por Processo *Gamma* são normalmente utilizados os processos de corrosão, erosão do concreto, ou desgaste dos materiais. O método utiliza a abordagem da deterioração acumulada no tempo, seguindo uma Função de distribuição de probabilidades (ASTROADS, 2015).

Dentre todas as técnicas de modelos estocásticos, destacam-se as Cadeias de *Markov* pela sua grande utilização para a formulação de modelos de deterioração de pontes. As Cadeias de *Markov* utilizam as probabilidades de transição periódicas entre os diferentes níveis de IC, permitindo a previsão da evolução desse parâmetro ao longo do tempo. O método é usado em nos principais BMS da América do Norte e Europa, *Pontis* e *Bridgit* respectivamente, em decorrência dos bons resultados na sua aplicação (GOLABI, 1997). A técnica é capaz de mensurar a dependência com o tempo e a incerteza dos processos de deterioração das pontes, além da sua fácil implementação computacional e simplicidade de uso (MORCOUS, 2006).

Para melhor compreensão, a Tab. 6.1 apresenta as vantagens e desvantagens do uso dos métodos para construção de modelo de deterioração de pontes mais citados na bibliografia científica da área de pesquisa.

Tabela 6.1 - Vantagens e limitações de diversos modelos de deterioração de pontes

| Modelos baseados em Índices de Condição | | |
|--|--|--|
| Modelos Determinísticos | | |
| Método | Vantagens | Limitações |
| <i>Average Time to Failure</i> | <ul style="list-style-type: none"> •Determina a média matemática do tempo para que ocorra a falha, possuindo valor único como resposta e de fácil implementação. | <ul style="list-style-type: none"> •Necessita de dados estatisticamente representativos por elemento da ponte, conseqüente utiliza filtros que limitam o banco de dados. |
| Modelos Lineares | <ul style="list-style-type: none"> •Fácil utilização e compreensão. | <ul style="list-style-type: none"> •Assumem que a taxa de deterioração não muda com o tempo. |
| Modelo de Regressão | <ul style="list-style-type: none"> •Amplamente utilizado e facilmente compreendido por engenheiros •Considera o histórico de deterioração das pontes. | <ul style="list-style-type: none"> •Apenas a média do IC pode ser previsto •Incertezas inerentes à deterioração de pontes são negligenciadas •Difícil atualização do modelo a partir de novos dados. |
| Modelos Estocásticos | | |
| Método | Vantagens | Limitações |
| Cadeias de <i>Markov</i> Tempo contínuo | <ul style="list-style-type: none"> •Considera a influência do tempo na deterioração •Mensuração da incerteza de diversos dados | <ul style="list-style-type: none"> •Complexa análise, com restrições à comportamentos com funções de distribuições de probabilidades conhecidas. •Complexa atualização dos dados. •A natureza da deterioração não é aferida |
| Cadeias de <i>Markov</i> Tempo discreto | <ul style="list-style-type: none"> •Usado para pontes e elementos de pontes •Estados discretos •Mensuração da incerteza de diversos dados •Previsão do IC futuro com base no atual IC •Eficiente implementação computacional e de uso simples | <ul style="list-style-type: none"> •Tempos discretos com intervalos regulares •IC subjetivo, baseados apenas da análise dos inspetores •A MPT desconsidera a influência do tempo •A natureza da deterioração não é aferida |

| Modelos baseados em Índices de Condição | | |
|---|---|--|
| Modelos Estocásticos | | |
| Método | Vantagens | Limitações |
| <i>Ordered probit model</i> | <ul style="list-style-type: none"> •Correlação entre a deterioração e suas causas prováveis •Estados discretos | <ul style="list-style-type: none"> •Complexa análise analítica •Não aborda relações entre elementos •Difícil modelagem hierárquica da ponte •Difícil atualização com novos dados |
| <i>Weibull Survival Model</i> | <ul style="list-style-type: none"> •Ameniza queda abrupta do IC observado nas cadeias de <i>Markov</i> nos primeiros anos através de distribuição de probabilidades conhecida. •Seu principal resultado é a probabilidade de falha da estrutura a partir da sua idade. | <ul style="list-style-type: none"> •Utilização deve ser realizada em conjunto com as Cadeias de <i>Markov</i>. |
| <i>Semi-Markov</i> | <ul style="list-style-type: none"> •MPT dependentes do tempo •Ameniza queda abrupta do IC observado nas cadeias de <i>Markov</i> nos primeiros anos. | <ul style="list-style-type: none"> •Necessita de dados de pontes que não tiveram melhorias, devido à utilização de regressão linear nos primeiros anos, restringindo sua utilização. |
| <i>Binary probit model</i> | <ul style="list-style-type: none"> •Correlação entre a deterioração e suas causas prováveis •Estados discretos •Consideração da natureza da deterioração •Melhor possibilidade de atualização quando comparado ao método "<i>Ordered probit model</i>". | <ul style="list-style-type: none"> •Complexa análise analítica •Não aborda relações entre elementos •Difícil modelagem hierárquica da ponte •Difícil atualização com novos dados |
| Abordagem Bayesiana | <ul style="list-style-type: none"> •Consideração e utilização de conhecimento de especialistas •Melhor aproximação de custo | <ul style="list-style-type: none"> •Trabalhosa atualização dos dados •Limitações semelhantes às Cadeias de <i>Markov</i> •Não aborda relações entre elementos |
| Processos Contínuos Gamma e Gaussian | <ul style="list-style-type: none"> •Aproxima a deterioração de uma distribuição conhecida, diminuindo erros devido à subjetividade. •Intervalos de tempo contínuos •A deterioração pode ser representada por porcentagem de degradação. | <ul style="list-style-type: none"> •Não aborda relações entre elementos •Difícil implementação computacional •Trabalhosa atualização dos dados |

| Modelos de Inteligência Artificial | | |
|------------------------------------|---|---|
| Método | Vantagens | Limitações |
| Redes Bayesianas | <ul style="list-style-type: none"> •Relacionam dependências entre sistemas complexos •Aplicáveis em sistemas complexos •Atualização otimizada dos dados •Aceita diversos tipos de dados •Modelo intuitivo e racional | <ul style="list-style-type: none"> •Difícil implementação computacional e trabalhoso processamento •Necessita de dados detalhados ao considerar todos os contribuintes como variáveis com distribuição de probabilidades. •Não aborda relações entre elementos |
| <i>Fault Tree</i> | <ul style="list-style-type: none"> •Demonstra graficamente as inter-relações entre os componentes do sistema •Análise qualitativa e quantitativa da deterioração | <ul style="list-style-type: none"> •Difícil construção e dispendiosa •Os eventos principais devem ser independentes •Estados binários •Difícil implementação e atualização |
| <i>Case-based Reasoning (CBR)</i> | <ul style="list-style-type: none"> •Decomposição hierárquica dos componentes da ponte •Mensuração das inter-relações entre elementos e incertezas. | <ul style="list-style-type: none"> •Fortemente dependente do conhecimento dos especialistas e dos dados disponíveis •Resultados sem abordagem probabilística •Incertezas não mensuráveis explicitamente. |
| <i>Artificial Neural Network</i> | <ul style="list-style-type: none"> •Modelagem de sistemas com variáveis complexas, com interações multidimensionais e não-lineares. | <ul style="list-style-type: none"> •Atualização devido a novos dados trabalhosa. •Resultados sem abordagem probabilística •Necessita de grande banco de dados |

A deterioração de elementos estruturais e o comportamento das estruturas de engenharia também são objetos de pesquisas através dos sistemas de monitoramento contínuo ou *Structural Health Monitoring (SHM)*, nos quais são utilizados sensores e equipamentos de aquisição de dados para instrumentação dessas obras. o diagnóstico real da estrutura considerando suas características particulares, tais como tipo estrutural, idade, materiais constituintes, geometria, ambiente inserido, patologias existentes e aos reais carregamentos atuantes, sendo uma técnica potencial de inspeção e para o planejamento de sua manutenção. De forma complementar são utilizados modelos numéricos e ensaios complementares não-destrutivos, bem como a utilização da teoria da confiabilidade (ZHOU *et al.*, 2017).

A técnica de monitoramento estrutural baseia-se na análise dinâmica, com ênfase principalmente na análise das frequências captadas por acelerômetros instalados nas estruturas (COLOMBO, 2016). A análise dinâmica possui três propriedades fundamentais: os modos

naturais de vibração, as taxas de amortecimento e as frequências naturais da estrutura. Esta frequência é função direta da rigidez e inversa da massa da estrutura e sua unidade mais comum é o Hertz (ciclo por segundo) (BOLINA *et al.*, 2014). Uma estrutura possui diversas frequências naturais relevantes para análise. A frequência natural mais importante é a primeira, menor entre todas, designada por fundamental. A natureza das cargas ou das tensões sofridas pelos materiais possuem natureza aleatória sendo, portanto, utilizadas técnicas estatísticas para a análise das informações. Com a utilização da transformada de Fourier, a resposta transiente aleatória (irregular e não periódica) registrada no tempo pode ser representada por combinações de funções mais bem definidas, como funções trigonométricas, com diferentes amplitudes e comprimentos de onda no domínio da frequência. O resultado normalmente é a apresentação como função de densidade espectral de potência ou *Power Spectral Density (PSD) function* (BISHOP e SHERRATT, 2000).

As análises utilizam técnicas teóricas e experimentais que possibilitam a construção de um modelo matemático representativo do comportamento dinâmico do sistema em estudo, a fim de determinar seus parâmetros nodais. A Inspeção baseada na análise da vibração tem o objetivo de verificar o comportamento dinâmico da estrutura durante sua vida útil para identificar possíveis danos que comprometam a saúde e vida útil da ponte. Mudanças na frequência natural das pontes são os principais indicadores de danos à estrutura, sendo amplamente utilizados por dois motivos principais: as frequências naturais são determinadas com certa facilidade e são sensíveis a danos globais ou locais, com alteração dos seus valores (ANDERSEN, 1997). É importante ainda que as frequências naturais da estrutura não estejam próximas das frequências de excitação provocadas pelo tráfego de veículos e outras ações externas.

A avaliação da degradação por fadiga em sistemas em concreto armado é recorrente, uma vez que as pontes estão sob carregamentos transientes, levando ao aumento progressivo de microfissuras ou a sua propagação, sendo o principal fator da ruptura sendo a fadiga a principal causa do seu colapso (WIGHT e MACGREGOR, 2012).

Utiliza-se ainda de inferências Bayesianas de calibração, com possíveis mensurações na teoria da Confiabilidade. Os resultados são capazes de diagnosticar a saúde da estrutura, verificando se os valores de tensão reais obtidos se aproximam dos valores previstos pelas normas vigentes, como no estudo realizado por Souza *et al.* (2014) em ponte rodoviária, onde concluiu-se que a

ponte em estudo apresentava comportamento normal com bom estado de conservação, não apresentando riscos à segurança no período analisado.

Existem diferentes métodos desenvolvidos para calibração das estimativas da MPT. No BMS *Pontis* e no *KUBA*, este último usado na Suíça são utilizadas análises de regressão usando pares de inspeções para a estimativa da MPT de modelos de *Markov* homogêneos (DEVRAJ, 2009; ROELFSTRA *et al.*, 2004). O método do *Pontis* foca nos erros ou diferenças entre as previsões das condições de *Markov* e a condições das pontes. A soma dos erros é calculada primeiramente para todas os dados e um procedimento de minimização é aplicado para encontrar os valores de probabilidades de transições que reduzem esse erro a um mínimo (DEVRAJ, 2009).

6

CADEIAS DE *MARKOV*

Os processos de *Markov* são processos estocásticos, isto é, são processos que caracterizam o comportamento de um sistema no tempo com definidas considerações probabilísticas (ALMEIDA, 2013). No variável tempo, os processos de *Markov* podem se caracterizar como discretos ou contínuos de acordo com as variáveis de estudo. Para a variável tempo, sua natureza pode ser discreta, sendo $X(t)$, $t=0, 1, 2, \dots$ ou contínua, sendo $X(t)$, $t>0$. As variáveis de entrada também poderão ser contínuas ou discretas. Apesar do processo de deterioração possuir caráter contínuo, a utilização dos IC discretos é largamente utilizada para mensurar a condição da estrutura, reduzindo a complexidade da monitoração contínua desse processo (MADANAT *et al.*, 1995).

Quando o processo considera a independência no tempo, ou seja, não existe mudança do seu resultado ao se promover uma deslocação no tempo, este é denominado processo estacionário. Existem dois tipos de modelos deterioração utilizando processos de Markov em estados discretos: modelos baseados no tempo e modelos baseados no estado. Os modelos baseados no tempo, são modelos de deterioração que preveem a probabilidade do intervalo de tempo que uma ponte demora a realizar uma transição de estado ou índice de condição (ALMEIDA, 2013).

Estes modelos procuram traduzir a variabilidade temporal associada ao processo de degradação, tratando o tempo como variável aleatória definida por uma determinada função de probabilidade. Modelos baseados em matrizes de *Markov* não estacionárias de tempo contínuo são capazes de verificar com maior acuidade a interferência do tempo no processo de deterioração. Como exemplo, modelos desenvolvidos por Mishalani e Madanat (2002) mostram que a idade das estruturas possui maior impacto sobre a taxa de degradação quando nos melhores ICs, no qual a degradação do concreto possui maior influência dos agentes químicos

do que dos processos físicos. Conforme o IC sofre decaimento, a taxa de degradação se mostra bastante aproximada para pontes com maiores ou menores idades.

Os modelos baseados no estado são modelos de deterioração que utilizam o processo de *Markov* em cadeia, mensurando a probabilidade de uma determinada ponte manter seu IC ou mudá-lo em um intervalo de tempo fixo ΔT . Assim, para o estudo da deterioração das pontes o processo de *Markov* é discreto no tempo e discreto nas variáveis, tendo em vista que o IC atribuído para as pontes possui natureza discreta (SCHERER e GLAGOLA, 1994). Assim, as cadeias de *Markov*, caso particular do Processo de *Markov*, são adequadas e amplamente utilizadas para desenvolver modelos estatísticos de deterioração de vários tipos de materiais de infraestrutura, tais como pavimentos, pontes, edifícios entre outros.

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 do IC dos elementos após vários períodos de transição. Elas são de primeira ordem quando levam em consideração que o IC de um elemento da ponte depende apenas do seu IC atual, sob a hipótese que os estados no futuro e no passado são independentes, configurando o já citado processo estacionário.

As probabilidades de uma ponte mudar de estado ou alterar o IC são representadas por uma matriz ($n \times n$), sendo " n " os diferentes níveis do IC constituindo a denominada MPT. Por ser oriunda de um processo estacionário a MPT é constante para qualquer tempo, sendo a mesma utilizada entre o ano 0 e 1 ou para o ano 9 e 10. A partir desse conceito, tem-se que a probabilidade da ponte transitar de um IC para outro será sempre constante. A probabilidade de um elemento transitar do estado i num tempo inicial para um estado j num tempo Δt é dada por:

$$P_{(\Delta t)ij} = P_r(X_{\Delta t} = j | X_{\Delta t} = i) \quad (6.1)$$

e analogamente, a probabilidade de um elemento permanecer no estado i num tempo Δt é dada por:

$$P_{(\Delta t)ii} = P_r(X_{\Delta t} = i | X_{\Delta t} = i) \quad (6.2)$$

Cada elemento p_{ij} representa a probabilidade do IC da ponte passar de i para j durante um determinado intervalo de tempo (Δt). A estrutura da MPT é descrita pela matriz da equação:

$$P = [p_{ij}] = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & p_{mn} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

O diagrama da Fig. 6.1 ilustra as probabilidades de uma matriz de transição para quatro níveis com um exemplo numérico para melhor compreensão, considerando o IC=4 como pior condição e o IC=1 como melhor condição.

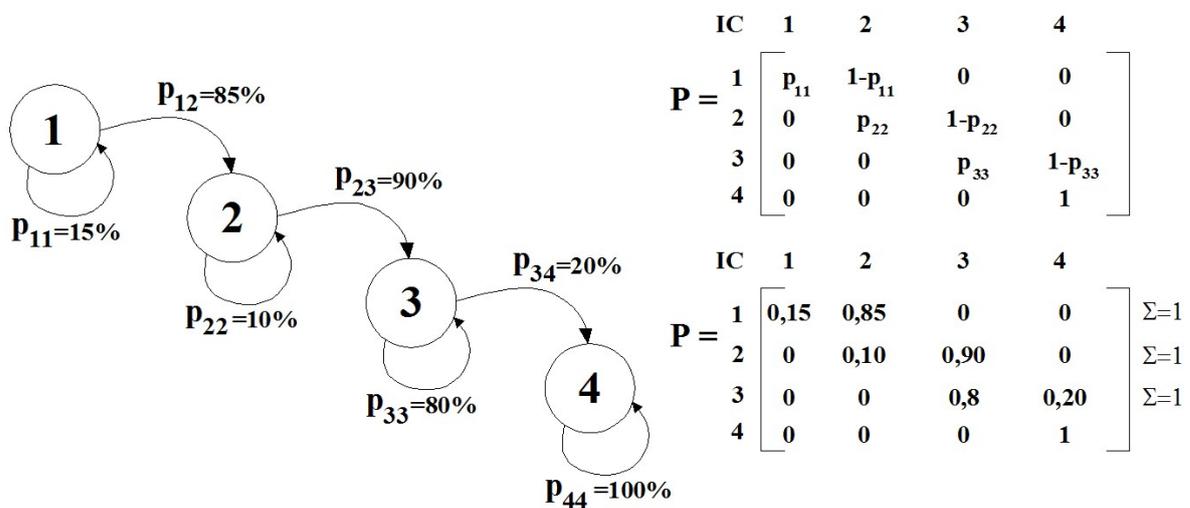


Figura 6.1 - Estrutura de uma Matriz de Transição de Probabilidades.

Existem algumas propriedades da MPT para a aplicação nos modelos de deterioração de pontes, destacadas no estudo de Madanat *et al.* (1995):

- $0 \leq P_{ij} \leq 1$ com $i = 1, 2, \dots, k$ sendo k o número total de níveis de IC (6.4)

- $\sum_i^k p_{ij} = 1$ com $i = 1, 2, \dots, k$ (6.5)

- $\Delta t = t_f - t_{in}$ (6.6)

A Eq. (6.4) limita que a MPT para a elaboração de um modelo de deterioração deve ser uma matriz quadrada com número de colunas (ou linhas) iguais e equivalentes aos possíveis IC. O modelo da matriz deve ser triangular superior com os elementos abaixo da diagonal principal iguais a zero no caso específico do melhor estado sendo IC=1 e pior IC=4. Para atribuições de IC contrárias, como no caso brasileiro, a matriz deve ser triangular superior. A MPT também é

uma matriz não negativa por se tratarem de probabilidades e possui elementos diferentes de zero na sua diagonal principal. Finalmente, a probabilidade para o último elemento da matriz, situado na região à direita mais abaixo deve ser 100%.

Os dados dos IC devem seguir um intervalo regular ou equidistante, discreto e inteiro, podendo ser usualmente igual a um ou dois anos por exemplo (ALMEIDA, 2013). Para cada intervalo, uma ponte deve permanecer no mesmo IC ou passar para outro IC, sem informações adicionais neste intervalo. As transições de IC devem ser sempre de um passo, pois caso haja alteração do IC de 5 para 3 no final do intervalo, tal informação demonstraria que em determinado instante no intervalo houve a mudança para o IC 4, afetando o cálculo da probabilidade.

Os intervalos dos dados irão refletir sobre os resultados probabilísticos. Se o intervalo for de um ano, P_{ij} é a probabilidade da ponte apresentar determinado IC em 1 ano e P_{ii} de permanecer, se o intervalo for de dois anos, P_{ij} é a mesma probabilidade de mudança em 2 anos e P_{ii} de permanecer no mesmo IC. Assim sendo, as probabilidades são complementares, de acordo com a Eq. 6.5, com a linha da MPT devendo ter a soma das probabilidades igual a unidade, ou seja: $p = 1 = 100\%$.

Seja o vetor IC_0 a distribuição de probabilidade do IC inicial das pontes, então para se obter a distribuição de probabilidade após um período de transição t , $IC(t)$, tem-se:

$$IC(t) = IC_0 \cdot MPT^t \quad (6.7)$$

em que cada elemento da matriz MPT^t fornece a probabilidade de transição após t períodos de tempo.

A simulação estocástica através das Cadeias de *Markov* com transições discretas no tempo e no IC tornou seu uso naturalmente adequado para o desenvolvimento de modelos de deterioração, sendo usado desde 1990 nos principais BMS (RYALL, 2001). No formato vetorial de probabilidades reside outra causa para a ampla utilização das Cadeias de *Markov* para descrever probabilidades de deterioração, frente à facilidade de tratamento de grande banco de dados computacionalmente, característica inerente ao cálculo vetorial bem como a necessária atualização da MPT com novos dados oriundos de inspeções (MORCOUS, 2006).

A principal vantagem do método também reside na sua natureza estacionária, ao assumir que o estado de deterioração no futuro (IC futuro) não depende do histórico de deterioração, mas apenas do seu último estado (IC atual). O Método é baseado em matrizes de transição de probabilidades (MPT) de um índice de condição para o outro e na permanência no mesmo IC. Utilizada em diversas pesquisas importantes na área, tais como os estudos conduzidos por JIANG e SINHA (1989) na previsão de vida útil de estruturas e por MORCOUS (2006) no comportamento de tabuleiros de pontes, as Cadeias de *Markov* são utilizadas nos principais BMS existentes na atualidade, destacadamente os softwares *PONTIS* e *BRIDGT* (ASHTO, 2013). Os resultados dos estudos realizados mostram que grandes períodos de inspeções podem resultar em alguns erros na previsão do IC das pontes, sendo a premissa da independência do histórico de degradação do método é aceitável. Finalmente, apesar do processo de deterioração possuir caráter contínuo, a mensuração com IC discreto em tempo discreto reduz sobremaneira a complexidade da monitoração contínua do estado (MADANAT *et al.*, 1995).

As cadeias de *Markov* também podem ser utilizadas para comparação entre diversos tipos de ambientes com específica agressividade ambiental bem como Volume Médio Diário de Rodovias (VMD), tipo estrutural e outros, no entanto, a MPT depende do volume de informações suficientes para a determinação das probabilidades. Outras técnicas são utilizadas concomitantemente com a Cadeia de *Markov*, refinando seus resultados e trazendo ao conhecimento importantes agentes causadores de deterioração, destacando-se o uso de algoritmos genéticos, inferência Bayesiana e calibração através de modelos mecanísticos de deterioração.

Além da limitação da sua utilização para intervalos regulares, o modelo de *Markov* encontra outras limitações. Se por um lado a premissa do processo estacionário promove maior aplicabilidade ao método, por outro contrasta com o conhecimento da importância do histórico da degradação das pontes para sua análise individual. Ao assumir tempos discretos com probabilidades de transição estacionárias o processo desconsidera o tempo como o agente de deterioração (GHODOOSIPOOR, 2013). O modelo não é implementado de modo a explicitar a natureza da deterioração e não são capazes de estabelecer correlações entre seus agentes causadores (WANG, 2012).

Os efeitos da manutenção são parcialmente ignorados ao considerarmos que o IC pode permanecer com o mesmo valor ou transitar para um IC imediatamente inferior. O processo de

Markov não possui ferramentas para verificar as relações e influências na deterioração das pontes oriundas dos diferentes mecanismos de degradação ou mesmo dos distintos elementos constituintes da ponte. Ao considerar a independência entre o futuro e histórico de deterioração passado, as Cadeias de *Markov* podem resultar em decisões gerenciais incorretas.

Apesar das simplificações que o método apresenta, importa destacar estudo do impacto sobre os resultados do IC ao assumir a independência das variáveis de entrada realizado por MOURCOUS (2006) utilizando dados do Ministério de Transportes do *Quebec* e comparando-os com os IC obtidos através do Método da Cadeia de *Markov*. O estudo utilizou análises de frequência e de inferência usando a distribuição estatística qui-quadrado (χ^2). Os resultados indicaram que a consideração da dependência com histórico de cada ponte não apresenta impacto significativo nos resultados de IC futuros, resultando em um índice de confiabilidade de 95% do método de *Markov*.

6.1 Determinação da Matriz de Transição de Probabilidades

As probabilidades constantes na MPT de modelos de deterioração podem ser estimadas com base no conhecimento de profissionais especialistas ou através de registros de observações ao longo do tempo. Este último método possui maior credibilidade, além da sua capacidade de sofrer calibrações com o tempo, mediante a inclusão de mais dados de inspeções.

Para a determinação da MPT, o banco de dados disponível é tratado de com o objetivo específico para cada estudo. O processo de filtragem dos dados pode ser realizado sem se inutilizar toda a amostra, levando em consideração o viés estatístico da análise, viabilizando estimativas de degradação com banco de dados pequenos. De acordo com o *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) dos Estados Unidos da América, país com estudos bastante avançados na área, a recomendação do mínimo de dados para a aplicação do método da Cadeia de *Markov* é de 3 ciclos ou 100 pares de inspeções (ASTROADS, 2015, AASHTO, 2013). Em investigação mais recente sobre a sensibilidade para o método de *Markov* com simulações de diversos tamanhos de banco dados foi recomendado para seu uso a aplicação para banco de dados a partir de 600 e 700 pontos (TRAN, 2016).

O maior impeditivo da aplicação, além da falta de dados históricos em determinados casos são as decisões de intervenção que afetam o cálculo da MPT. Caso o Administrador das pontes estabeleça a meta de intervir nas estruturas com IC=3, não existirão dados para o cálculo das probabilidades de transição do IC=3 para o IC=2 e do IC=2 para o IC=1, limitando a análise do comportamento de degradação.

Para um grande número de dados de entrada, com significativos volumes para cada IC adotado, os ICs podem ser filtrados para fins diversos. Importante salientar que a coleta de dados históricos para um grande banco de dados é característica restrita aos países que possuem estudos na área por tempo considerável, iniciados pioneiramente nos Estados Unidos da América com primeiro inventário realizado em 1982 (CESARE e SANTAMARINA, 1992).

A maioria dos estudos excluem as mudanças positivas, resultando em uma MPT com forma triangular superior para o caso de IC=1 representar a melhor condição e IC=5 a pior. A Tab. 5.4 ilustra uma MPT deste formato. Neste estudo ilustrado por Thompson (2012) não foram retiradas as mudanças de mais de um nível no mesmo intervalo de tempo. As matrizes de transição neste caso são calculadas por intervalo de pares de período, ano a ano por exemplo.

Tabela 6.1 - MPT exemplo no estudo de Thompson.
Fonte: Adaptado de THOMPSON (2012).

| | | Probabilidade de cada IC após um ano (%) | | | | |
|----------|---|--|------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| IC atual | 1 | 95.3 | 4.6 | 0.1 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 93.2 | 3.9 | 1.9 | 1 |
| | 3 | 0 | 0 | 89.4 | 7.3 | 3.3 |
| | 4 | 0 | 0 | 0 | 82.8 | 17.2 |
| | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 |

Alguns estudos retiram da amostra todos os dados das pontes que sofreram alterações de nota positiva, visando isolar e compreender estritamente o processo de deterioração sem intervenções que atorem em demasia esta tendência natural, podendo separadamente observar a mesma tendência para as pontes com manutenção ou pequenas intervenções, como estudo realizado por Bu *et al.* (2013). Neste caso é necessário um grande número de dados de entrada, pois todo o histórico de determinada ponte é retirado se a obra sofreu intervenção com melhoria

de IC em qualquer instante durante o período e a quantidade restante deve ser suficiente para a elaboração da MPT, como realizado por Li (2016) com pontes de Shangai.

Destaca-se para pequenos bancos de dados, situação comumente encontrada dado que as pioneiras pesquisas na área tiveram seu início apenas a partir da década de 90, a probabilidade pode ser calculada seguindo a denominada "abordagem de frequência" (JIANG *et al.*, 1990, SETUNGE, 2011, MUÑOZ, 2016). Esta é a técnica mais simples para o cálculo de probabilidade, sendo retirado diretamente do banco de dados de IC. Sendo P_{ij} a probabilidade de transição do elemento passar do IC "i" para o IC "j" é estimada por

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (6.9)$$

em que n_{ij} é o número de transições do IC "i" para o IC "j" em um período determinado e n_i é o total de elementos no estado "i" antes da transição.

Como exemplo da sua simples aplicação, suponhamos seis pontes de um segmento rodoviário hipotético com os dados de IC tomados em inspeções realizadas de 2008 a 2015 de acordo com a Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Valores de IC para um grupo hipotético de pontes.

| Ponte | IC por ano | | | | | | |
|-------|------------|------|------|------|------|------|------|
| | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2013 | 2014 | 2015 |
| 1 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 2 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 |
| 3 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 5 | 3 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 3 |
| 6 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 |

Os dados da Tabela 6.2 demonstram que as inspeções foram tomadas em intervalos anuais, com exceção do intervalo de 2011 para 2013, cujos dados não poderão ser considerados em vista da condição de intervalos regulares para aplicação das Cadeias de *Markov*. No entanto, as transições de 2010 para 2011 e de 2013 para 2014 podem ser consideradas. No caso específico de estudos de deterioração de pontes, o interesse principal é a decadência do estado, não sendo tomadas, portanto, as transições para um melhor estado.

O primeiro passo é gerar uma matriz com cada entrada representando o número total de transições de um índice de condição para o outro ou da permanência no mesmo índice de condição. A matriz com o número de transições será de tamanho 4x4, por não existirem pontes classificadas no IC=1.

| IC | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|---|---|----|---|
| 2 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 1 | 3 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 2 | 14 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 3 | 2 |

Na matriz da Eq. 6.10 as linhas representam o índice de condição da ponte (IC) no primeiro ano e as colunas representam o IC no ano seguinte. O segundo passo consiste na obtenção da MPT a partir da Eq. 6.9. É realizada a normalização da matriz anterior por linhas, em vistas da propriedade da MPT dada na Eq. 6.5. Cada linha da MPT representa um vetor de probabilidades.

| IC | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|------|-------|-------|-----|
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0,25 | 0,75 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0,125 | 0,875 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0,6 | 0,4 |

(6.10)

A partir das probabilidades de transição calculadas na Eq. 6.10, para esse grupo de pontes, se em um determinado ano uma ponte está em um IC = 3, no próximo ano, com probabilidade de 0,25 passará para um IC = 2, e com probabilidade 0,75 permanecerá em um IC = 3.

A partir do exemplo, confirma-se a compreensibilidade da utilização do método para a obtenção das probabilidades pela abordagem de frequência. A partir de banco de dados mais extensos, em grandes estoques de pontes ou com maior histórico de inspeções, a elaboração de uma rotina computacional se faz necessária.

Finalmente, a MPT também pode ser determinada pelo Método Otimizado de Regressão, utilizado em diversos tipos de elementos de infraestrutura, principalmente em pontes e pavimentos. O método utiliza uma função não linear para minimizar a soma absoluta das diferenças entre as curvas de regressão, determinando a que mais se aproxima da distribuição

dos ICs do banco de dados e às premissas do Método das Cadeias de *Markov*. O método pode ser descrito por:

$$\text{Minimizar } \sum_{t=1}^N |C_{(t)} - E_{(t)}|$$

$$\text{Sujeito a } 0 \leq P_{ij} \leq 1 \quad e \quad (6.11)$$

$$\sum_{i=1}^n P_{ij} = 1 \quad \text{para } i, j = 1, 2, \dots, n$$

em que N é o número total de períodos de transição, C_t é o IC no período t da curva de regressão, e $E(t)$ é o valor esperado do IC no período de transição t da Cadeia de *Markov*, calculado por

$$E(t) = P(t) \times S \quad (6.12)$$

em que S é o vetor com os valores de IC.

6.2 Modelos de deterioração com base nas Cadeias de Markov

Exemplos de modelo de deterioração baseados em matrizes de *Markov* foram desenvolvidos por Orcesi-Cremona (2009) em pontes construídas na França entre 1973 e 1993, em um universo inicial de 9.000 pontes classificadas de acordo com o método Francês já detalhado IQOA. Após o cálculo das probabilidades de transição entre os ICs de 1 a 5, sendo 1 o melhor IC e 5 o pior, resultou-se na MPT e no gráfico mostrados na Fig. 6.2.

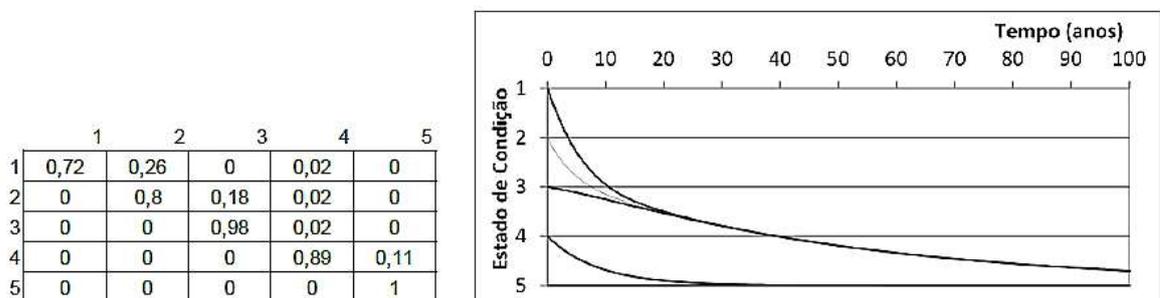


Figura 6.2- Matriz de *Markov* e curvas de degradação de pontes de concreto segundo Orcesi-Cremona (2009). Fonte: Almeida (2013).

Na Fig. 6.2 as curvas com início no IC=1 e IC=3 coincidem a partir dos 20 anos, mostrando a tendência das pontes, caso não existam intervenções, alcançarão o mesmo IC, inferior ao IC=3.

As curvas são influenciadas pela utilização de dados de transição entre os IC de melhor índice de condição para os IC associados ao penúltimo nível da escala classificativa, ocorrência que poderá ocorrer, por exemplo, após a ocorrência de um terremoto ou outro fator alheio ao processo natural deteriorativo.

Outro importante modelo de degradação existente foi desenvolvido por Cesare *et al.* (1992) em 850 pontes, divididas de acordo com os diferentes tipos de sistemas construtivos: 214 pontes de viga bi apoiada de concreto, 54 de vigas com mais de 2 vãos, em concreto, 36 de concreto protendido e 456 em aço. As pontes do universo de estudo, apesar de terem idades de construção entre 1840 e 1990, foram consideradas apenas aquelas construídas após 1900. Foi desenvolvido para cada grupo MPT específicas, de acordo com material de construção e sistema construtivo, ilustradas nas Figs. 6.3 a 6.7. As pontes de estudo localizavam-se em Nova York, com o sistema americano de avaliação, variando o IC entre 1 e 7, sendo 1 o melhor estado e 7 para as pontes com pior estado.

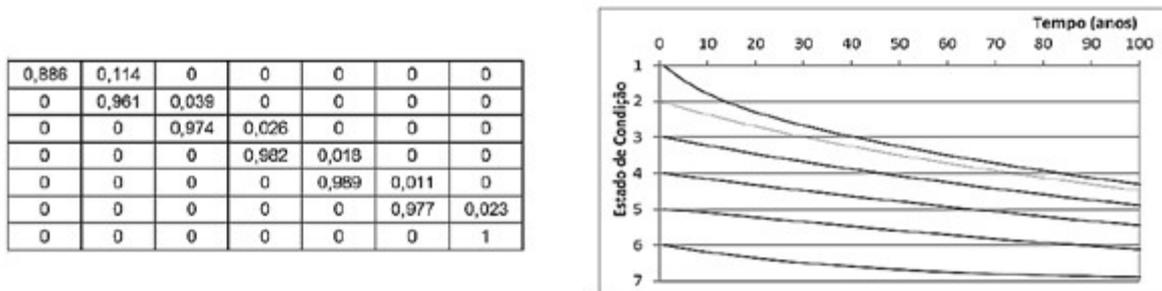


Figura 6.3 - MPT de *Markov* e curvas de degradação de 456 pontes de aço segundo Cesare *et al.* (1992). Fonte: Almeida (2013).

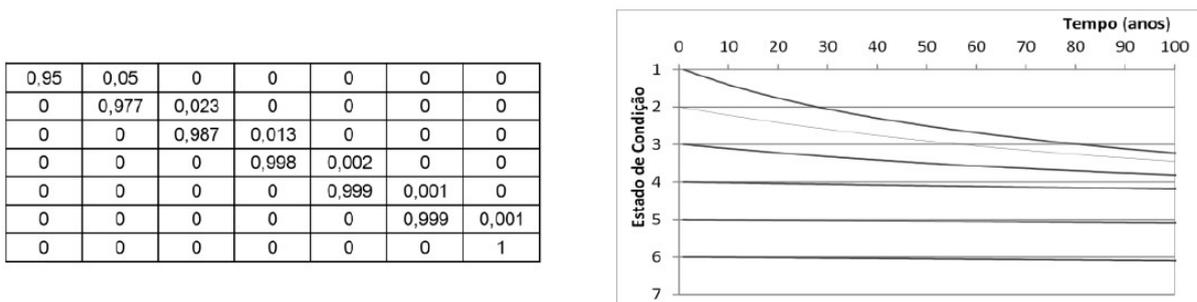


Figura 6.4 - MPT de *Markov* e curvas de degradação de 214 pontes de viga de concreto bi apoiadas segundo Cesare *et al.* (1992). Fonte: Almeida (2013).

| | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,886 | 0,114 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0,961 | 0,039 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0,974 | 0,026 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0,982 | 0,018 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0,989 | 0,011 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,977 | 0,023 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

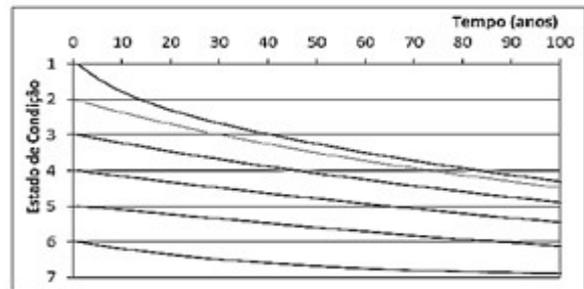


Figura 6.5 - MPT de *Markov* e curvas de degradação de 54 pontes de viga de concreto múltiplos vãos segundo Cesare *et al.* (1992). Fonte: Almeida (2013)

| | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,886 | 0,114 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0,961 | 0,039 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0,974 | 0,026 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0,982 | 0,018 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0,989 | 0,011 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,977 | 0,023 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

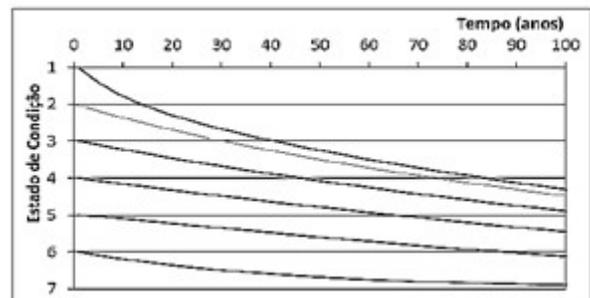


Figura 6.6 - MPT de *Markov* e curvas de degradação de 36 pontes de concreto protendido segundo Cesare *et al.* (1992). Fonte: Almeida (2013).

| | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,862 | 0,138 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0,966 | 0,034 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0,981 | 0,019 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0,982 | 0,018 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0,989 | 0,011 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,974 | 0,026 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

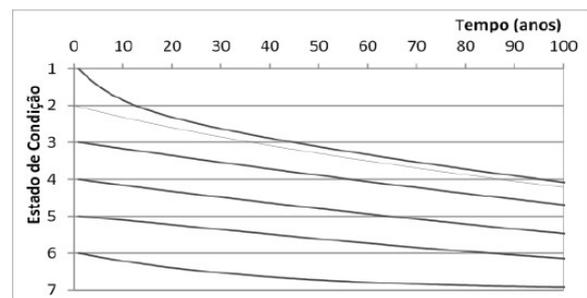


Figura 6.7 - Matriz de *Markov* e curvas de degradação das 850 pontes de estudo segundo Cesare *et al.* (1992). Fonte: Almeida (2013).

Finalmente, existem métodos específicos para a determinação das MPTs, tais como a otimização da regressão não linear (*Regression-based Nonlinear Optimization* - RNO) com abordagens da distribuição de *Weibull*, o Método de Monte Carlo (MMC) e a probabilidade máxima Bayesiana (*Bayesian Maximum Likelihood* - BML) (WELLALAGE, 2014). A análise baseada na Bayesiana tem sido bastante popular nos anos recentes com o moderno desenvolvimento das técnicas computacionais. Modelos de utilizando o Método de Monte Carlo com abordagem Bayesiana, denominados *MCMC models* são largamente utilizados para estimar parâmetros desconhecidos ou distribuições posteriores em modelos estatisticamente complexos incluindo modelos de deterioração (TRAN, 2016).

No estudo conduzido por Madanat (1995) com 5.700 pontes do estado de Indiana nos Estados Unidos da América, com dados de IC colhidos bienalmente desde 1978, concluiu-se que são fatores que alteram a taxa de deterioração das OAEs: a idade, o número de vãos e a estrutura das pontes, o clima, o volume e as características do tráfego e os serviços rotineiros de manutenção. Frequentemente esses fatores são considerados nos estudos de degradação dessas estruturas.

Os modelos de inteligência artificial utilizam técnicas de computação na tentativa de encontrar padrões similares entre os dados, relacionando o IC com variáveis denominadas "externas" às pontes, mas que sabidamente são associadas aos agentes da sua degradação. Os métodos utilizados neste modelo procuram diminuir as incertezas decorrentes de bancos de dados de IC com histórico insuficiente para uma confiabilidade aceitável do modelo de deterioração.

Os principais modelos de inteligência artificial são aqueles utilizados por redes neurais (*Artificial Neural Network* - ANN) associadas ao Modelo de Predição do IC passado (*Backward Prediction Model* - BPM) e o denominado Modelos baseados em históricos (*Case-based Reasoning Models* - CBR) (MORCOUS, 2002a).

Outro método para a determinação das MPTs é o denominado "Método Integrado" (*Integrated Method for Probabilistic Bridge-Deterioration Modeling*) utilizado para modelos baseados no tempo ou no estado. Nesse método a MPT é obtida através da aplicação de um algoritmo que considera as características de cada estrutura, com condições para cada elemento, além de conter na sua estrutura o método BPM para suprir a ausência de dados suficientes (BU *et al.*, 2014). Os métodos descritos procuram aproximar as funções encontradas de distribuições estatísticas com o objetivo de corrigir possíveis entradas incorretas, na tentativa de aumentar a acurácia das probabilidades de mudança dos IC.

Algumas pesquisas procuram aumentar a acurácia dos modelos para pequenos bancos de dados de IC. O método BPM, por exemplo, consiste basicamente em criar um banco de dados históricos a partir dos dados existentes, criados de acordo com relações encontradas por algoritmos de redes neurais, formando assim um banco de dados com maior número de variáveis e maior confiabilidade (BU *et al.*, 2013, LEE *et al.*, 2013). Os dados históricos gerados são então submetidos ao mesmo algoritmo e é verificada a dispersão do próprio modelo. A Fig. 6.9 ilustra esse mecanismo.

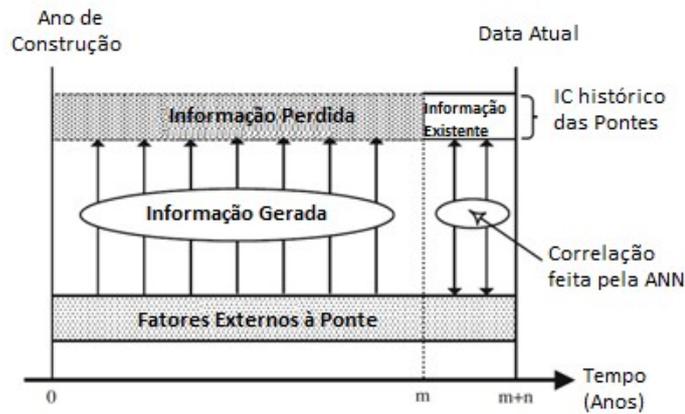
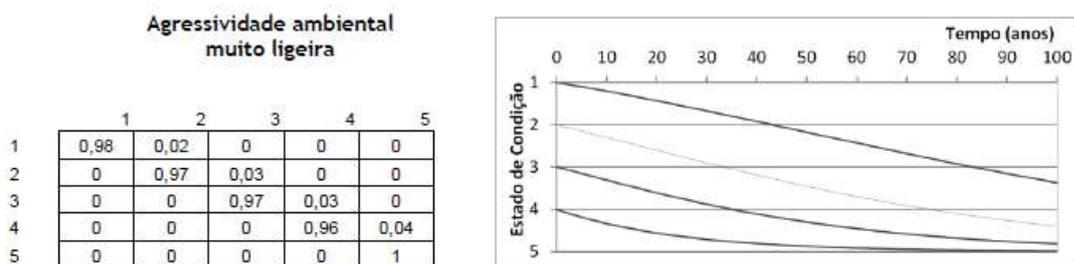


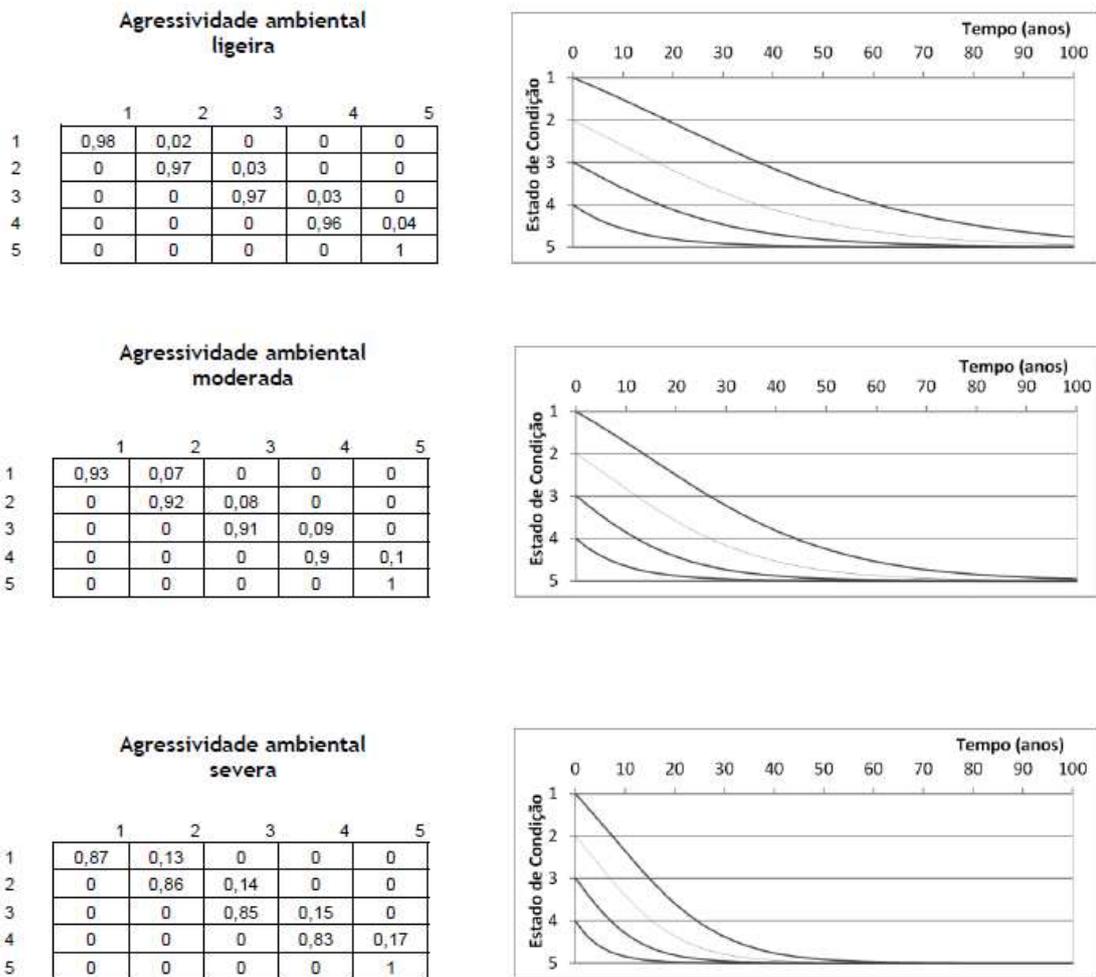
Figura 6.8 - Mecanismo do BPM. Fonte: Adaptado de: Bu et al. (2013)

A justificativa para essa tratativa, além da necessária implementação de um modelo preditivo para a administração das pontes rodoviárias, consiste nas restrições comuns em banco de dados existentes. Os programas de gestão de pontes foram implementados há apenas duas décadas, com inspeções bienais, somando aproximadamente de 8 a 10 inspeções. Os ICs não variam significativamente em períodos curtos de tempo. Esses fatores podem diminuir a acurácia dos modelos em prever o IC futuro das pontes (Bu *et al.*, 2013).

Destacam-se os modelos desenvolvidos por Mourcou (2005) através do CBR, separando as curvas de degradação de acordo com os tipos de agressividade ambiental. Com os dados disponíveis de 9.678 pontes da Província do Quebec no Canadá, Mourcou (2002) desenvolveu modelos baseados no IC de 1 a 5, sendo 1 para a melhor condição e 5 para a pior. A degradação das pontes foi estudada pelos diversos tipos de agressividade ambiental, classificados como "muito ligeira", "ligeira", "moderada" e "severa". As matrizes de *Markov* (MPT) e os modelos de deterioração são ilustrados na Fig. 6.8.



(a)



(b)

Figura 6.9 - Matriz de *Markov* e curvas de degradação das 9.678 pontes por Morcoux (2002).

Para diminuir as limitações das cadeias de *Markov*, Devraj (2009) propôs uma Regressão baseada em otimização não linear para modelar o processo deteriorativo com múltiplas *MPT/RNO*. Ele comparou os resultados com os resultados do sistema *Pontis* e concluiu que o *RNO* teve menor erro. É importante realçar que para um dado IC inicial, os modelos baseados no estado são somente dependentes da acurácia da matriz de transição e da confiabilidade das técnicas usadas para estimá-la. Apesar da utilização do *RNO*, permanecem erros nas previsões e na obtenção dos valores otimizados de transições obtidos pela otimização não-linear (WELLALLAGE, 2013).

7

GESTÃO DE PONTES NO BRASIL

Parte da administração da infraestrutura rodoviária, a gestão de pavimentos é frequentemente exercida pelos administradores de rodovias em todo mundo, tendo sua importância reconhecida e consolidada. Em meados dos anos 80, houve sua disseminação nos países em desenvolvimento através do programa *Highway Development and Management* (HDM) do Banco Mundial, sendo condicionante para investimentos internacionais em infraestrutura rodoviária. A rede rodoviária pavimentada no Brasil corresponde a 223.541 km de extensão, estando pouco menos de 10% em regime de exploração rodoviária por empresas particulares (ECR). Independente da administração, a gestão de pavimentos é realizada através de Softwares de Gestão de Pavimentos (SGP), grande parte desenvolvidos a partir de resultados de pesquisas conduzidas por Queiroz (1981), Watanatada *et al.* (1987) e Paterson (1987). Durante as duas primeiras décadas, os softwares combinavam análises técnico-econômicas de projetos para programação de investimentos em rodovias e análise de estratégias (LIMA, 2007). Nas versões atuais, novas ferramentas possibilitam análises regionais através da calibração de modelos e inclusão de parâmetros específicos de cada administrador.

Paralelamente ao cenário evolutivo da gestão de pavimentos, a administração das pontes rodoviárias no Brasil progride atualmente em ritmo moderado, sem histórico de esforços coletivos e abrangentes. O Departamento Nacional de Infraestruturas de Transportes (DNIT) no governo brasileiro é o gestor e executor dos modais de infraestrutura rodoviária, ferroviária e aquaviária pertencentes à União. Desde 1994 o DNIT conta com um *software* de cadastro de obras e inspeções, denominado Sistema de Gerenciamento de Obras Especiais (SGO). Na ocasião, além do desenvolvimento do software, foram realizadas inspeções cadastrais e de rotina em cerca de 20% das pontes pertencentes à malha rodoviária federal (MENDES, 2003). A versão do SGO de 1994 possibilitou efetuar as consultas às obras no ambiente Windows, registrando os dados das inspeções cadastrais e rotineiras bem como as tabelas de atividades de manutenção, recuperação, melhoramentos e custos. Após sua implantação não houve na época a necessária continuidade dos trabalhos de inspeções cadastrais e de atualização do banco de dados existente.

Em 2004 foi planejada a 3ª fase de implantação e operação em âmbito nacional do SGO (v3), trazendo conceitos avançados na área de gerenciamento de pontes e na área de informática. O projeto não foi implementado à época. Em 2010, o DNIT criou o Programa de Manutenção e Reabilitação de Estruturas (PROART) com orçamento de R\$ 5,8 bilhões e previsão de intervenções em 5.000 pontes. O investimento seria distribuído ao longo 8 anos para a recuperação estrutural e reforço de 15% das pontes e recuperação, reforço e alargamento dos outros 85%, somando a intervenção em 5.000 pontes sob administração federal.

Apenas em 2013 a Autarquia promoveu o primeiro passo do PROART: foram contratados os serviços para o mais abrangente levantamento de obras de arte especiais já realizado no país, cadastrando e vistoriando mais de 5.100 pontes rodoviárias em todo o Brasil utilizando o SGO. O trabalho trouxe ao conhecimento da Administração Pública as características da construção e do estado atual de cada uma das pontes vistoriadas.

No SGO v3 foram incorporados conceitos atuais de gerenciamentos de pontes, com principal destaque para a mensuração de danos por elementos. Nessa abordagem, a ponte poderia ser classificada em ampla quantidade de elementos padrões e suas derivações, com atributos pré-definidos no sistema. Os elementos padrões tornam-se variáveis no programa, recebendo tratamento analítico individualizado. Importantes atributos que diferenciam os elementos padrão são relacionados com sua função na ponte, podendo ser estrutural, funcional ou secundária com a especificação do material. Ao discriminar os elementos constituintes, o gerenciamento passa a ser mais realista e detalhado, não tratando a obra apenas sob o ponto de vista global, tornando possível analisar os serviços necessários com precisão, bem como realizar diversas análises gerenciais tais como a determinação de taxas de deterioração por elementos. A padronização de elementos e de danos possibilitou a melhor organização dos dados durante as inspeções, tornando as informações uniformes, detalhadas e impossibilitando o uso de descritivos livres pelos inspetores.

O inventário foi realizado atendendo à norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR-9452/2016 na sua versão de 2012 e do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) DNIT 010/2004 PRO. Foi também utilizado o Manual de Inspeções de Pontes Rodoviárias do IPR de 2004. O relatório produzido para cada ponte vistoriada é composto da inspeção cadastral

composta dos dados que caracterizam cada obra, do registro fotográfico e dos perfis longitudinal e frontal e da inspeção rotineira, composta por formulário específico.

Os dados cadastrais da obra se dividem em identificação da obra, características funcionais, elementos componentes, aspectos especiais, deficiências funcionais e rotas alternativas. A identificação da obra possui itens como localização, tipo da estrutura, sistema construtivo, trem-tipo, entre outros. São dados integrantes das características funcionais o tipo da região (topograficamente plana, montanhosa, etc.), configuração do traçado (tangente ou em curva), número de vãos, largura da pista, número de faixas, entre outros (FONTES et al., 2014).

A inspeção rotineira é destinada a manter o cadastro da obra atualizado, com a detecção de anomalias em desenvolvimento ou possíveis diferenças entre o estado atual e o estado catalogado anteriormente (ABNT, 2016). O DNIT utiliza formulário próprio para a anotação de cada observação feita na inspeção. Neste formulário é atribuída, para cada elemento da ponte vistoriada, uma nota técnica de 1 a 5 (NT), baseada nas condições estruturais. A nota final da ponte corresponde a menor entre as notas recebidas por seus elementos com função estrutural, sendo 1 para obras que necessitam de intervenções imediatas e 5 para obras que apresentam bom estado de conservação e estabilidade, descritos na Tab. 7.1. Existe ainda relatório fotográfico integrante do formulário, com o registro fotográfico das principais patologias e/ ou anomalias encontradas.

Após o trabalho realizado na Autarquia para a implantação dos dados coletados no programa SGO finalizado em junho de 2016 é possível consultar o relatório de cada estrutura através de filtros do programa, tais como: trecho, nota técnica, jurisdição entre outros, conforme filtros existentes. A Fig. 7.1 mostra uma das telas do sistema. Os dados coletados subsidiam diversos estudos na Autarquia, indo desde as determinações para as contratações de serviços de MR&R necessários até a criação de programas específicos para a gestão da manutenção rotineira das pontes.

Tabela 7.1 - Instruções para atribuição de notas de avaliação. Fonte: Adaptado de DNIT, 2004.

| Nota | Danos no elemento/ insuficiência estrutural | Ação Corretiva | Condição de estabilidade | Classificação das condições da ponte |
|------|--|--|-----------------------------|--|
| 5 | Não há danos nem insuficiência estrutural. | Nada a fazer. | Boa | Obra sem problemas |
| 4 | Há alguns danos, mas não há sinais de que estejam gerando insuficiência estrutural. | Nada a fazer, apenas serviços de manutenção. | Boa | Obra sem problemas importantes |
| 3 | Há danos gerando alguma insuficiência estrutural, mas não há sinais de comprometimento da estabilidade da obra. | A recuperação da obra pode ser postergada. Colocar o problema em observação sistemática. | Boa aparentemente | Obra potencialmente problemática |
| 2 | Há danos, gerando significativa insuficiência estrutural, porém ainda não há, aparentemente, risco tangível de colapso da estrutura. | A intervenção deve ser feita no curto prazo. | Sofrível | Obra problemática |
| 1 | Há danos gerando grave insuficiência na ponte; o elemento em questão encontra-se em estado crítico, havendo um risco tangível de colapso estrutural. | A intervenção ou substituição da obra deve ser feita sem tardar. | Precária | Obra crítica |

RELATÓRIOS EM LOTE

| | | | |
|---------------------------|--|----------------------------|--|
| Código | <input type="text"/> | | |
| Identificação | <input type="text"/> | | |
| UF | Selecione a UF <input type="text"/> | | |
| Via | Selecione a Via <input type="text"/> | | |
| Local na Via (km) | do km <input type="text"/> | ao km <input type="text"/> | |
| Comprimento (m) | de <input type="text"/> | até <input type="text"/> | |
| Superintendência Regional | Selecione a Superintendência Regional <input type="text"/> | | |
| Unidade Local | Selecione a Unidade Local <input type="text"/> | | |
| Situação | Selecione a Situação <input type="text"/> | | |
| Elemento | Selecione o Elemento <input type="text"/> | Nota Técnica | Selecione (Mínim. <input type="text"/> Máxim. <input type="text"/>) |
| Deficiência Funcional | Selecione a Deficiência Funcional <input type="text"/> | | |
| Estado de Conservação | Selecione o Estado de Conservação <input type="text"/> | | |
| Insuficiência Estrutural | Selecione a Insuficiência Estrutural <input type="text"/> | | |
| Dano | Selecione o Dano <input type="text"/> | | |
| Nota Técnica | Selecione (Mínim. <input type="text"/> Máxim. <input type="text"/>) | | |

Figura 7.1 - Exemplo dos filtros existentes no sistema SGO. Fonte: DNIT, 2016.

Para a programação de intervenção das pontes das rodovias federais o DNIT classifica as obras de acordo com a nota técnica atribuída. O critério de desempate para pontes com a mesma nota técnica pode ser feito através do VMD, priorizando as obras em rodovias com maior registro de tráfego de veículos por questões de segurança. Este método é denominado Método do nível de serviço (*Level-of-Service Method - LSM*), sendo utilizado também pelas Empresas com contratos de concessão rodoviária (ECR). No entanto, o método possui diversas limitações, especialmente sob a abordagem da Gestão do Ciclo de Vida (*Life-Cycle Assessment - LCA*).

Ainda não estão implementadas no sistema as ferramentas específicas dos módulos de planejamento e programação de manutenções futuras, dos efeitos futuros das intervenções no tempo são desconhecidos e, ainda não é possível ainda selecionar os tipos de intervenções aplicáveis para a escolha da opção mais eficiente. Esta abordagem pode conduzir a decisões que não otimizam a utilização dos recursos financeiros, principalmente em grandes parques de obras (MORCOUS, 2000). Tais restrições impulsionam as pesquisas para a determinação de modelos de deterioração das pontes para a administração dessas estruturas no país com maiores subsídios técnicos.

O inventário de pontes finalizado pelo DNIT em 2015 constituiu um trabalho pioneiro dado a sua abrangência e da forma sistematizada na sua condução. No entanto, a ausência do histórico de manutenção de pontes afeta diretamente o planejamento das ações futuras, inviabilizando a formulação de parâmetros para a contratação desses serviços. Por ser um órgão de prestação de serviços públicos, o DNIT ainda possui o desafio de elaborar editais de manutenção com prazo executivo determinado, detalhamento de serviços e de custos capazes de refletir a necessidade dessas obras. Enquanto os contratos de manutenção atuais possuem duração de dois anos, é cediço que os serviços em pontes rodoviárias possuem duração bastante variável, com serviços específicos para cada tipo de obra e de difícil previsão para a sua realização. Destaca-se ainda o necessário destaque da verba pela Lei Orçamentária Anual (LOA) sempre concluída no ano anterior à sua vigência, exigindo que no momento da sua elaboração haja a previsão do estado das estruturas no ano seguinte.

Além da administração realizada de forma direta pelo governo federal brasileiro, as agências fiscalizadoras de trechos rodoviários sob regime de concessão possuem regulamentos próprios para o monitoramento do desempenho exigido nos programas de exploração dessas rodovias. As maiores extensões de rodovias no Brasil sob o regime de concessão rodoviária são referentes

à malha federal e à malha paulista de estradas. Os procedimentos de inspeções adotados por essas Agências Fiscalizadoras são descritos nos itens a seguir.

7.1.1 Administração das pontes das rodovias federais brasileiras sob regime de Concessão Rodoviária

Pertencente ao Ministério dos Transportes (MT), a Agência Nacional de Transporte Terrestre (ANTT) promove a fiscalização das rodovias federais em regime de concessão para exploração rodoviária. Para o suporte dessa fiscalização e registro das atividades exercidas pelas ECR, a ANTT se utiliza de relatórios de monitoração nas diversas áreas da engenharia de transportes.

Especificamente para o acompanhamento das obras-de-arte especiais, a ANTT possui exigência contratual integrante do Programa de Exploração Rodoviária (PER) a qual prevê a monitoração dessas estruturas através de inspeções visuais anuais. É exigido que as inspeções sejam realizadas de acordo com a norma DNIT-010/2004-PRO de 20/01/2004 (DNIT, 2004) e da NBR-9452 de acordo com sua versão de 2012 (ABNT, 2016) e do manual de pontes rodoviárias (IPR/DNIT-2007) e que sejam incluídas as pontes existentes em vias marginais e/ ou situadas dentro da faixa de domínio (ANTT, 2015).

De acordo com o modelo de relatório de monitoração de pontes requerido pela ANTT, o documento deve ter o resumo dos dados encontrados com a distribuição do IC das obras a cada período e comparativo do IC encontrado nos dois últimos anos, conforme Tabs. 7.2 e 7.3.

Tabela 7.2 - Exemplo de quadro para distribuição de IC em trecho sob exploração rodoviária (Fonte:ANTT,2016)

| Nota | OAEs | % |
|-------|------|------|
| 1 | 2 | 5% |
| 2 | 3 | 8% |
| 3 | 5 | 13% |
| 4 | 10 | 25% |
| 5 | 20 | 50% |
| Total | 40 | 100% |

Tabela 7.3 - Exemplo de comparativo de IC em dois anos consecutivos em trecho sob exploração rodoviária. (Fonte: ANTT,2016)

| km | OAE | Nota Técnica 2010 | Nota Técnica 2011 |
|---------|---------------------------|----------------------|----------------------|
| 900+000 | Passagem Inferior - Norte | 4 | 4 |
| 900+000 | Passagem Inferior - Sul | 4 | 4 |
| 903+940 | Passagem Inferior - Norte | 3 | 3 |
| 903+940 | Passagem Inferior - Sul | 3 | 3 |

No relatório, a ECR deve identificar as causas da mudança da nota de um ano para outro, seja positivamente, indicando as obras realizadas para a melhoria da condição, ou negativamente, relatando a evolução de patologias com possíveis ações programadas, por exemplo. O relatório deverá ainda registrar as obras realizadas, independentemente da alteração da pontuação.

A ANTT utiliza o procedimento de pontuação do DNIT para exigir e determinar os prazos máximos de intervenções nas obras, definidos como curto, médio e longo prazo. Para as obras com Nota Técnica igual a 2, as intervenções devem ser executadas em curto prazo, até 1 ano da última inspeção realizada na obra. Para as OAEs com NT 3, as intervenções deverão ser realizadas em médio prazo, com indicativo de até 3 anos.

Para as OAEs com NT 4 ou 5, não há previsão de prazo de intervenção definido por estarem em boas condições estruturais, devendo apenas seguir o cronograma de monitorações programadas. Finalmente, para as OAEs com NT igual a 1, as intervenções deverão ser providenciadas de imediato. Analisando as sugestões da ANTT, sugere-se que NT é associada à periodicidade das intervenções, sendo reflexo do seu comprometimento estrutural ou estado de conservação que possa vir a comprometer seu comportamento estrutural.

A NT adotada no Brasil com qualificações de acordo com uma escala numérica está correlacionada aos índices de condição (IC) utilizados em diversos países na administração da malha rodoviária citados no Capítulo 5.

7.1.2 Administração das pontes das rodovias paulistas brasileiras sob regime de Concessão Rodoviária

O Estado de São Paulo responde pela segunda maior extensão de trechos rodoviários sob regime de exploração somando mais de 5.428km através de programa de concessões iniciado em 1988. A fiscalização dessa malha rodoviária é realizada pela Agência de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP) com específico sistema de inspeções em pontes rodoviárias. O controle das obras de arte especiais da ARTESP e suas empresas fiscalizadas é preconizado pela Resolução nº 21-2002 da agência. As classificações de IC possuem 6 níveis sendo B4, B3, B2, C2, C1, C0, com classificações dos parâmetros estruturais, funcionais e de durabilidade. De acordo com o IC, a ARTESP estipula os prazos máximos para a realização de intervenções assim como a ANTT.

A Resolução ETC-0021 de 2007 da ARTESP prevê classificações de acordo com os parâmetros estruturais, funcionais e de durabilidade. Para cada parâmetro podem ser atribuídos três estados operacionais A, B e C significando, respectivamente, “Bom”, “Regular” e “Ruim. Os estados operacionais são ainda subdivididos em A5, A4, B4, B3, B2, C2, C1, C0, resultando em 8 níveis de classificação, sendo A5 o melhor estado e C0 o pior índice de condição.

A agência fiscaliza e garante desempenho das obras da infraestrutura paulista através de planejamento e programação de estados mínimos de condição das obras ao longo dos anos de exploração rodoviária. As empresas devem acompanhar o cronograma de desempenho nos três âmbitos, estrutural, funcional e de durabilidade em períodos determinados pela ARTESP.

7.1.3 Pesquisas brasileiras na área de inspeção de pontes

Paralelamente aos manuais, normas e aos diferentes procedimentos adotados pelos administradores do setor rodoviário, a comunidade científica conduz pesquisas sobre as práticas de inspeção, constantemente sugerindo melhorias nos métodos correntes de inspeção em pontes no Brasil. Na sua tese de doutoramento, Lencioni (2005) verificou a ausência da ênfase dos manuais e normas brasileiros às manifestações patológicas encontradas nas inspeções dessas estruturas. De acordo com a pesquisa, as condições ambientais no entorno da obra não são registradas, negligenciando dados sobre possíveis agentes potencialmente causadores de deterioração e com influência direta no desempenho e na vida útil dessas estruturas.

Desenvolvida para inspeção de edificações, a metodologia Gestão de Estruturas (GDE/UNB) teve seu início em estudos conduzidos por Castro (1994), Lopes (1998), Boldo (2002), Fonseca (2007) e foi adaptada e aplicada para inspeções em Pontes Rodoviárias por Euqueres (2011). Verly (2015) realizou estudo comparativo entre a metodologia GDE//UNB e a metodologia do DNIT utilizada no SGO através de resultados colhidos nas inspeções realizadas em 22 pontes do distrito Federal. A conclusão sugere que a metodologia GDE/UNB, com as necessárias adaptações para pontes, apresenta maior escalonamento entre os níveis de qualificação das obras, sendo mais eficiente na priorização das intervenções, principalmente para pontes classificadas com a mesma nota de acordo com a norma DNIT PRO 10 (notas de 1 a 5).

Em pesquisa sobre o desempenho de pontes rodoviárias, Carvalho (2018) utilizou as metodologias de inspeção do DNIT PRO 10, da ABNT 9452/2016 e GDE/UNB em 10 pontes rodoviárias. Os resultados mostraram que as notas obtidas pelos diferentes métodos apresentam a mesma tendência de análise, validando os achados de Verly (2015) para o melhor escalonamento obtido pela metodologia GDE/UNB.

Nos seus estudos, Mitre (2005) concluiu sobre a importância na adoção de métodos padronizados de inspeção e ensaios devido a complexidade e diversidade de aspectos envolvidos na deterioração de pontes. Segundo Mitre, os registros das inspeções devem tornar possível a comparação entre as diferentes condições de cada estrutura, permitindo a classificação dos diferentes graus de deterioração e de urgência de intervenção corretiva ou preventiva.

Müller (2004) propôs uma parametrização através de modelo matemático para estabelecer critérios que aperfeiçoassem o planejamento e a execução de recuperações estruturais em pontes rodoviárias. Foram atribuídos diferentes pesos por tipo de patologia de acordo com o respectiva importância no processo de degradação das estruturas. Os fatores e pesos atribuídos foram estipulados de acordo com o resultado de entrevistas com especialistas na área, com resultados aplicando a metodologia *Delphi*, a qual define que os critérios de um grupo estruturado de especialistas são mais precisos do que aqueles tomados de forma isolada ou não-organizada. Observa-se que no método proposto, Müller (2004) considera fatores estruturais, funcionais e de durabilidade por região da estrutura, ou seja, critérios considerados importantes para as futuras tomadas de decisão pelos especialistas do setor. Ao aplicar o método em duas

obras, verificou-se a importância da definição desses fatores na ocasião dos apontamentos da sua inspeção, conduzindo a observação e registros do inspetor para critérios previamente definidos que possivelmente irá alterar os critérios analisados nas decisões de manutenção.

Monteiro (2017) promoveu um estudo sobre o desenvolvimento de pesquisas internacionais com a aplicação de sistemas BIM nas inspeções de pontes. Após pesquisa, propôs sistema de gestão apoiado na técnica. Em sua pesquisa, Monteiro (2017) propõe tabela de manutenção identificando a manifestação do dano por elemento, sua localização no elemento com correspondente área e custo estimado na sua recuperação. Como resultado do estudo, foram relacionados parâmetros considerados por profissionais da área como importantes para sua inclusão em sistema de gestão de pontes, tais como: condições ambientais, condições de tráfego, condições de acessos, vazão do curso d'água, projetos, vida útil prevista, indicação de processos erosivos em taludes, condições de drenagem, tipos e materiais utilizados, condições de iluminação e sinalização, condições do ambiente, registros de colações, perdas de seção, entre outros. Outros fatores tais como a indicação de existência de proteção de margem ou de área de preservação permanente (APP); o Histórico de intervenções, incluindo reparações, manutenções e remodelações (reforço e alargamento); a Indicação de existência de laje de aproximação; o Nível de agressividade ou classificação para ranqueamento e orientação de intervenções; a Inclusão de recomendações da NBR 9452/2016; a Indicação de solicitações de passagens de cargas de dimensões especiais (autorizações especiais de trânsito – AET).

Matje (2003) realizou inspeções e ensaios não destrutivos em pontes no Vale do Itajaí e Ilha de Florianópolis. O estudo verificou a destacada diferença no estado das pontes de acordo com a agressividade do meio. As pontes localizadas em ambiente marinho apresentaram degradação bem mais acentuada, principalmente devido à corrosão. Apesar de que 3 (três) das 5 (cinco) pontes localizadas no Vale do Itajaí possuem sua construção mais recente que as localizadas na Ilha de Florianópolis, as pontes sobre o Ribeirão das Canas e Poço Grande, com praticamente cinquenta anos de vida, apresentaram melhores condições do que as pontes localizadas próximas ao mar, destacando-se, portanto, a diferente taxa de degradação relativa a agressividade do ambiente marinho. Tendo em vista o resultado, o estudo validou a importância da descrição da agressividade do meio ambiente nas fichas de inspeção cadastral, ou de sua alteração, quando constatada em inspeções rotineiras.

8

METODOLOGIA

O desenvolvimento da metodologia de pesquisa foi fundamentado com base nos métodos de pesquisas realizadas na área e as metodologias de inspeção adotadas no Brasil, bem como sua efetiva prática, caracterizadas no banco de dados disponível. Somente após o acesso aos dados e às informações contidas nas fichas de inspeção de pontes da pesquisa foi possível elaborar uma abordagem para a verificação das taxas de deterioração dessas estruturas. Desta forma, este capítulo pretende apresentar a metodologia formulada de acordo com as fases do seu desenvolvimento, apresentando cada uma das hipóteses adotadas de acordo com cada etapa da pesquisa. O procedimento pode ser dividido em seis fases: seleção dos dados, registro dos dados, filtragem dos dados, desenvolvimento do método de determinação das taxas de deterioração das pontes do estudo, tratamento dos dados e desenvolvimento de uma técnica para a avaliação da precisão dos resultados.

8.1 Seleção dos dados

Para o conhecimento de taxas de deterioração de pontes brasileiras, a pesquisa buscou os registros de inspeções realizadas no Brasil em número suficiente para a análise. Frente à exigência de no mínimo 3 ciclos ou 100 pares de inspeção com a utilização da mesma escala numérica (ASTROADS, 2015; AASHTO, 2013) e a intenção de reunir maior número de obras no estudo, foram reunidos os dados de vistorias de pontes das agências ANTT e ARTESP, ambas agências fiscalizadoras de trechos rodoviários sob regime de concessão. Essas agências, além de serem responsáveis pela fiscalização da maior extensão de trechos rodoviários sob o regime de concessão, gerenciam contratos com exigências de inspeção de pontes em intervalos regulares, premissa para o entendimento do processo deteriorativo no tempo.

Cabe registrar que a grande maioria das inspeções em pontes com registro no DNIT até 2013 foram realizadas em 1.210 obras na primeira fase do SGO (MENDES, 2003) e em isoladas inspeções extraordinárias, geralmente feitas após a constatação de alguma anomalia no comportamento da estrutura ou no seu entorno. Após a implantação do SGO v3, foram registradas inspeções em mais de 5.000 obras, em trabalho iniciado em 2013 e finalizado em 2015. As inspeções realizadas foram as primeiras a serem conduzidas na maioria das pontes sob responsabilidade do DNIT. O registro histórico dessas inspeções é então insuficiente para a elaboração de um modelo de deterioração de pontes rodoviárias, dado que não existe uma periodicidade de inspeções com intervalos regulares para se aferir a taxa de degradação dessas estruturas.

Após solicitação, a ARTESP disponibilizou em 2017 os dados disponíveis em formato eletrônico relativos às inspeções em pontes nos trechos concessionados de rodovias do Estado de São Paulo. Os demais registros de inspeções foram disponibilizados para a consulta material na sede da Agência em numerosos volumes de processo. Tendo em vista que cada lote da concessão rodoviária da ARTESP contém diversos segmentos rodoviários, a Tabela 8.1 lista a documentação digital recebida por lote de concessão e por ano de inspeção (ARTESP, 2018).

Tabela 8.1 - Dados eletrônicos de inspeções em pontes fornecidos pela ARTESP em 2017

| Lote | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 01 | | | | X | X | X | X | |
| 03 | | | | X | X | X | X | |
| 05 | | | | | X | X | X | |
| 06 | | | | X | X | X | X | X |
| 07 | | | | X | X | X | X | X |
| 08 | | | | | X | X | X | X |
| 09 | | | | | X | | | |
| 10 | | | | X | X | X | X | X |
| 11 | | | | X | | | X | X |
| 12 | | | X | X | X | X | X | X |
| 13 | | X | X | X | X | X | X | |
| 16 | | | | X | X | X | X | X |
| 19 | | | | X | X | X | X | X |
| 20 | | X | | | X | X | | |
| 21 | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 22 | | | | X | X | X | X | X |
| 23 | | | | X | X | X | X | X |
| 24 | | | | X | | X | X | X |
| 25 | | | | | X | X | X | X |

Do mesmo modo, visando auxiliar a pesquisa, a ANTT encaminhou em 2017 os dados disponíveis em formato digital das inspeções de pontes rodoviárias existentes nos seus arquivos. Assim como nos dados existentes da ARTESP, algumas inspeções foram realizadas sem ter seu registro eletrônico enviado à ANTT. Além desse fato, as inspeções anteriores a 2008 não possuíam um formato padronizado ou metodologia única adotada - exigência posteriormente estabelecida pela Agência. A Tabela 8.2 mostra a relação dos dados cedidos para estudo, com o respectivo ano de condução das inspeções.

Tabela 8.2 - Dados eletrônicos de inspeções em pontes fornecidos pela ANTT em 2017

| Trecho Rodoviário | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| BR-381/MG/SP | | | | X | X | X | X | X | X | X | |
| BR-040/MG/RJ | | | | | | X | X | X | X | X | X |
| BR-116RJ | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| BR-116RS/ BR-392RS/ BR-116/PR | | | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| BR-116/376/PR BR-101/SC | | | | X | X | X | X | X | X | X | X |
| BR-116/SP/PR | | | | | X | X | | X | X | X | X |
| BR-101/RJ | | | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| BR-153/SP | | | | | | X | X | X | X | X | X |
| BR-393/RJ | | | | | | X | X | X | X | X | X |
| BR-116/BA, BR- 324/BA e BA-526/528 | | | | | | X | X | X | X | X | X |

Nos registros da Tabela 8.2 não foram incluídos os dados enviados de inspeções de pontes dos trechos pertencentes à 3ª Etapa de concessões da ANTT, com início da exploração rodoviária em 2014, pois não possuem um mínimo de 3 ciclos de inspeções. De forma semelhante, os dados referentes às inspeções de pontes da rodovia BR- 290/RS - Trecho Osório – Porto Alegre/ Entroncamento e da rodovia BR-116/RS (Guaíba) - BR-290/RS e BR-116/RS não foram relacionados. Apesar do início da concessão em 1997, os dados disponibilizados desses trechos no Rio Grande do Sul são de inspeções realizadas nos anos de 2011, 2013 e 2015, resultando em apenas 2 ciclos de intervalos bienais. Além da limitação do número de ciclos, a metodologia de inspeção adotada nas pontes das rodovias desses trechos rodoviários não seguia as preconizações das normas NBR-9452/2016 ou DNIT-010/2004. Em 2011 as inspeções foram

conduzidas atendendo ao procedimento normativo da ARTESP e nos anos de 2013 e 2015 foram realizadas inspeções de acordo com modelo criado pelo Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – com escala de fatores combinados resultando em valores numéricos de escala de 0 a 100 e de classificação qualitativa de 7 níveis (CASTRO, 1994, FONSECA, 2007, EUQUERES, 2011). Os dados referentes ao monitoramento da Ponte Rio-Niterói não foram solicitados e também não serão utilizados, devido à singularidade dessa obra de arte especial.

Através da análise da Tabela 8.1, é possível observar que os trechos do estado de São Paulo com maior número de ciclos regulares de inspeção foram disponibilizados a partir de 2012, resultando, para a maior parte das análises, no estudo de 4 ciclos de inspeção. Os dados da ANTT da Tabela 8.2 foram disponibilizados a partir de 2008, tendo a maioria dos trechos dados a partir de 2010, totalizando 6 ciclos de inspeção. A existência de maior número de ciclos de inspeção é fator de grande influência nos resultados das taxas de deterioração ao contribuir com maior número de dados históricos para a compreensão do processo.

Outra importante diferença nos dados recebidos das Agências é da existência de avaliações numéricas por regiões de pontes nos dados da ANTT, ou seja, para cada região da ponte inspecionada é associado um valor de IC, registrando sua condição individualmente. Desta forma, a metodologia preconizada pelas normas da ABNT e do DNIT, usadas pela ANTT, possibilita também a avaliação da deterioração por partes da estrutura, conhecidamente distinta, promovendo importantes dados ao estudo.

As metodologias adotadas pela ARTESP e pela ANTT também possuem divergências quanto ao número de níveis de avaliação ou IC, tendo a primeira 8 níveis (C0 a A5) e a segunda 5 níveis (1 a 5), impossibilitando assim, a princípio, estipular-se uma comparação direta e fidedigna dos resultados para as diferentes curvas de deterioração a serem obtidas. Finalmente, outra diferença importante é a existência, em alguns grupos de pontes nos dados da ANTT, de folhas de inspeções cadastrais. As inspeções cadastrais registram características importantes para o entendimento das taxas de deterioração das pontes, tais como a caracterização da agressividade ambiental, registro do volume de tráfego, data da construção da ponte, entre outros, não sendo dados integrantes das fichas de inspeções rotineiras.

A partir dessa primeira análise e frente ao significativo volume de dados a serem registrados e trabalhados, associado ao cronograma estipulado para estudo justificou-se a seleção dos dados para a pesquisa a partir das informações enviadas pela ANTT, oriundas das inspeções de pontes realizadas nas rodovias federais brasileiras.

8.2 Registro e descrição geral dos dados do estudo

A metodologia usada no conjunto das pontes e a sua aplicação prática nas inspeções em pontes fiscalizadas pela ANTT passam a ser descritas, bem como os apontamentos das características das pontes de cada trecho rodoviário. É elementar o conhecimento detalhado do banco de dados tendo em vista que as suas peculiaridades servem de base para a definição da metodologia proposta para determinação das taxas e curvas de deterioração das pontes de cada grupo. A Tab. 8.3 apresenta os contratos de concessão atuais e suas características das pontes selecionados para a pesquisa e a Fig. 8.1 destaca os trechos rodoviários de estudo no mapa rodoviário brasileiro.

Tabela 8.3 - Relação dos contratos de concessão das rodovias consideradas na pesquisa. (ANTT, 2017)

| Nome | Grupo | Trecho Concessionado | Extensão (km) | Início da Concessão | Duração |
|-----------------------------|---|---|---------------|---------------------|---------|
| NOVA DUTRA | Grupo CCR | BR-116/RJ/SP, trecho Rio de Janeiro - São Paulo | 402 | 01/03/1996 | 25 anos |
| CONCER | Construtora Triunfo e outros | BR 040/MG/RJ - trecho Juiz de Fora/MG - Rio de Janeiro/RJ | 180 | 31/10/1995 | 25 anos |
| CRT | INVEPAR e outros | BR-116/RJ, trecho Além Paraíba - Teresópolis – Entroncamento c/ a BR 040/RJ | 142,5 | 22/03/1996 | 25 anos |
| ECOSUL | ECORODOVIAS Infraestrutura e Logística S/A | BR-116/ 392/RS | 457,3 | 30/11/1998 | 25 anos |
| AUTOPISTA PLANALTO SUL | ARTERIS S/A | BR-116/PR/SC – Curitiba – Divisa SC/RS | 413 | 18/02/2008 | 25 anos |
| AUTOPISTA LITORAL SUL | ARTERIS S/A | BR-116/376/PR e BR-101/SC – Trecho Curitiba – Palhoça | 405,94 | 18/02/2008 | 25 anos |
| AUTOPISTA RÉGIS BITTENCOURT | ARTERIS S/A | BR-116/SP/PR – São Paulo – Curitiba | 402 | 18/02/2008 | 25 anos |
| AUTOPISTA FERNÃO DIAS | ARTERIS S/A | BR-381/MG/SP - Belo Horizonte - São Paulo | 562 | 18/02/2008 | 25 anos |
| AUTOPISTA FLUMINENSE | ARTERIS S/A | BR-101/RJ – Divisa RJ/ES – Ponte Presidente Costa e Silva | 320 | 18/02/2008 | 25 anos |
| RODOVIA TRANSBRASILIANA | TPI – TRIUNFO Participações e Investimentos. A. | BR-153/SP – Divisa MG/SP – Divisa SP/PR | 321 | 18/02/2008 | 25 anos |
| RODOVIA DO AÇO | ACCIONA Concessões | BR-393/RJ - Divisa MG/RJ - Entroncamento BR-116 (Dutra) | 200 | 28/03/2008 | 25 anos |
| VIA BAHIA | ISOLUX E ENGEVIX | BR-116/324/BA e BA-526/528 | 680 | 20/10/2009 | 25 anos |

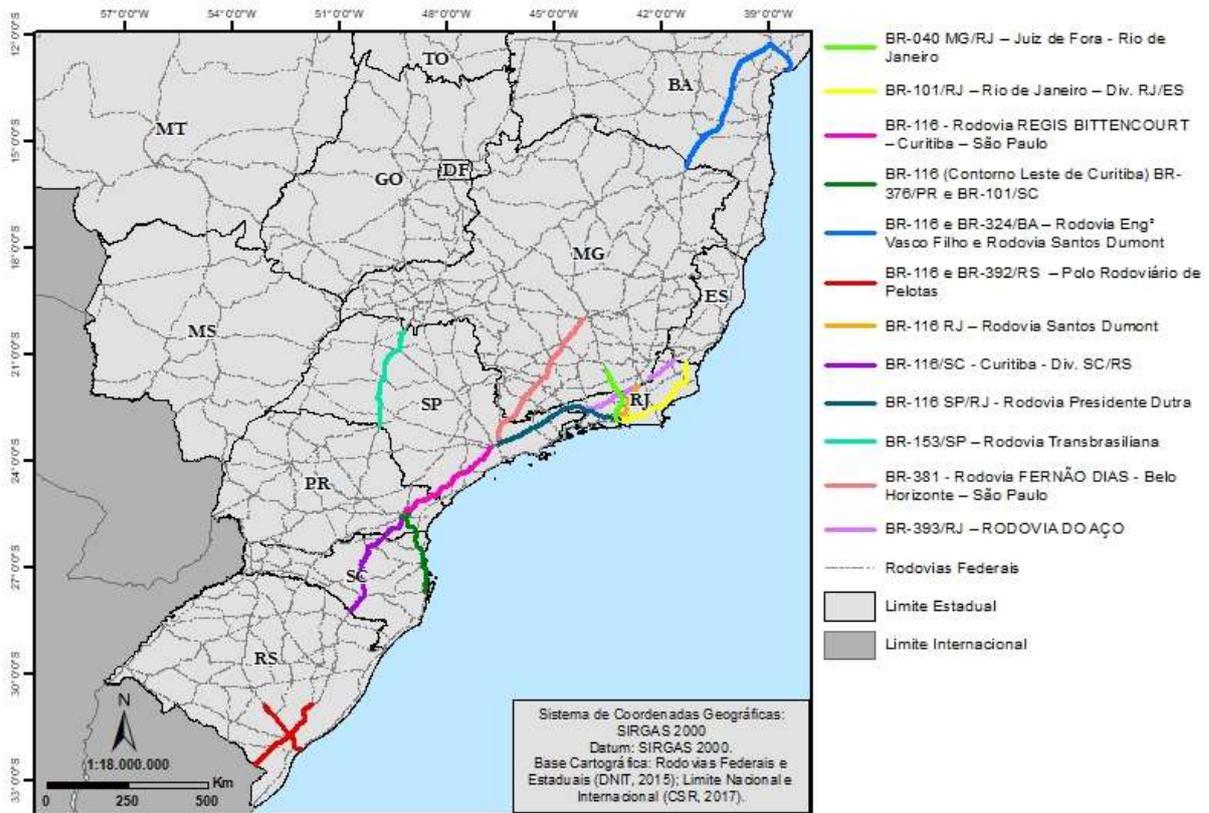


Figura 8.1 – Trechos rodoviários das pontes da pesquisa.

As diretrizes técnicas e normas, assim como as ações a serem realizadas pela Concessionária ao longo do prazo da concessão são especificadas no Programa de Exploração da Rodovia (PER). Para os serviços de monitoração das obras-de-arte especiais o PER prevê que as inspeções tenham “início ao final dos trabalhos iniciais, com a realização de monitoração inicial, e, após, ao final do 1º ano de concessão e, a partir de então, anualmente, até o fim da concessão”. A partir da “2º Etapa de Concessões” das rodovias federais no Brasil, com contratos datados de 2008, consta no PER também a obrigatoriedade do encaminhamento dos relatórios de inspeção e do atendimento às normas DNIT PRO10 e NBR-9452, extensivo para os trechos que possuíam início da exploração rodoviária anterior a essa data.

Apesar da exigência da utilização da metodologia de inspeção de pontes pela ANTT para as vistorias realizadas pelas Concessionárias, na prática, seu uso é distinto e varia por empresa administradora. A experiência dos profissionais envolvidos e as exigências particulares do grupo de pontes de determinado trecho são possíveis justificativas para a realização de adaptações à metodologia ou mesmo da adoção de métodos diversos. Um exemplo já citado nessa pesquisa refere-se ao trecho da rodovia BR- 290/RS - Trecho Osório – Porto Alegre/

Entroncamento e da rodovia BR 116/RS (Guaíba) - BR-290/RS e BR-116/RS, com inspeções conduzidas seguindo os procedimentos da ARTESP e do Laboratório de Engenharia de Ensaios e Modelos Estruturais - LEME da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Apesar dessa multiplicidade, a exceção do trecho citado, as notas técnicas globais exigidas no PER e que servem de base para a determinação de prazos para as intervenções são reportadas para as pontes de todos os trechos rodoviários. A Tabela 8.4 mostra as metodologias adotadas por cada trecho rodoviário do estudo por período dos dados disponibilizados.

Tabela 8.4 – Metodologias de inspeções de pontes por ano e por trecho rodoviário.

| Trecho | Anos | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
| BR-116 SP/RJ - Presidente Dutra | x | x | x | x | x | | | | | | | | |
| BR-040MG/RJ | x | x | x | x | | | | | | | | | |
| BR-116 RJ - Santos Dumont | | | | | | | | | | | | | |
| BR-116 e BR-392/RS | x | | | | | | | | | | | | |
| BR-116/SC | | | | | | | | | | | | | |
| -116/PR, BR-376/PR e BR-101/SC | | | | | | | | | | | | | |
| BR-116/SP/PR - Régis Bittencourt | | | | | | x | | | x | | | | |
| BR-381/MG/SP - Fernão Dias | | | | | x | | | | | | | | x |
| BR-101/RJ | | | | | | | | | | | | | |
| BR-153/SP | | | | | x | | | | | | | | |
| BR-393/RJ | | | | | x | | | | | | | | |
| BR-116 e BR-324/BA | | | | | x | | | | | | | | |

| | |
|---|---|
| | Inspeção Cadastral |
| | Inspeções com metodologia própria e qualitativas |
| | Inspeções de acordo com a metodologia GDE/UNB |
| | Inspeções com metodologia própria mas com notas de acordo com NBR-9452 |
| | Inspeções de acordo com a Regulação ARTESP com notas de acordo com NBR-9452 |
| | Inspeções de acordo com NBR-9452 |
| x | Dados não disponibilizados |

Tendo em vista que a maior parte dos registros possuem IC e metodologia de acordo com a norma NBR-9452/2016 na sua versão 2012 e da norma DNIT PRO-010/2010, foi desenvolvida para o registro dos dados uma rotina original no programa *Visual Basic for Applications* (VBA), possibilitando a compilação padronizada das vistorias em planilhas, organizando as informações no formato apropriado para a entrada no programa estatístico conforme detalhado a seguir. Os dados fornecidos pela ANTT foram disponibilizados em diversos formatos digitais, alguns em arquivos de texto, outros em planilhas eletrônicas e até mesmo arquivos de simples leitura, dificultando o desenvolvimento de um software para captura dos dados desses arquivos. Os dados foram introduzidos no software manualmente, por ficha de inspeção, auxiliados pela

ferramenta computacional que auxiliou na velocidade do lançamento de extenso banco de dados disponível e diminuiu os riscos de entradas incorretas.

Os campos de entrada criados no programa orientam a entrada dos registros dos índices de condição atribuídos de acordo com a divisão de regiões existente nas fichas de inspeção rotineira, sendo: superestrutura, vigamento principal, mesoestrutura, infraestrutura e pista ou acessos. As Figs. 8.2 e 8.3 mostram a tela principal do programa criado para lançamento dos dados "Comentários gerais" e "Anomalias" de acordo com a ficha de inspeção rotineira do DNIT.

Figura 8.2 - Tela do programa para lançamento do campo "Comentários gerais".

Figura 8.3 - Tela do programa para lançamento do campo "Anomalias".

8.3 Filtragem dos dados

Foram definidos critérios de filtragem baseados em pesquisas semelhantes realizadas em outros países, visando garantir maior acurácia ao modelo, diminuindo assim o grau de incerteza. Basicamente os critérios utilizados sugerem a retirada de dados que possam alterar a taxa média do conjunto. Os fatores históricos das intervenções das pontes podem afetar seu comportamento de deterioração bem como desastres naturais, mudança de normas técnicas construtivas, tipos de intervenções e a falta de manutenção podem sugerir diferentes taxas de degradação.

Os filtros utilizados se basearam no relatório sobre as taxas de deterioração das pontes do estado de Nova York nos Estados Unidos, no qual Agrawal e Kawaguchi (2009) desenvolveram filtros para a seleção dos dados mais representativos para a compreensão da deterioração dessas estruturas. Foram excluídos os dados de inspeções com registros incompletos, com flutuações pontuais do IC (atribuídas à subjetividade do inspetor) e às quedas abruptas do IC em dois ciclos consecutivos (atribuídas à acidentes ou desastres). Apenas o critério de atribuição de nova data de construção para pontes com duas melhorias do IC consecutivas até o melhor estado ou permanência de mais de um ciclo no nível superior não pode ser utilizado devido à diferença de escala de IC norte americana e brasileira.

Outro filtro, comumente utilizado em diversas análises de deterioração de pontes rodoviárias foi a retirada dos dados das inspeções em pontilhões, ou seja, pontes de único vão com comprimento inferior a 6m, passagens de gado, galerias e túneis. Exemplo desse procedimento pode ser encontrado do estudo conduzido por Munhoz (2013) tendo sido retirados da análise os dados de bueiros e canais dos dados oriundos de pontes de Nevada nos Estados Unidos e do inventário brasileiro, devido às diferentes taxas de deterioração desses sistemas. Intuitivamente, essas estruturas usualmente com único e relativamente pequeno vão também terão seu comportamento ao longo dos anos de forma bastante diversa àquele observado para as demais pontes rodoviárias.

Também foi verificado o uso de filtros semelhantes no estudo de Mourcos (2006) para investigação da deterioração das pontes de Nevada nos Estados Unidos da América. Os denominados *Culverts* assemelhando aos pontilhões, não possuem IC atribuído nas inspeções daquele estado norte-americano, tendo sido registrado no campo do IC a informação “*Not*

applicable” – não aplicável para essas estruturas. Apesar de terem grande representatividade naquele parque de obras, cerca 21% de todas as obras catalogadas, a diferença na manutenção dessas estruturas das demais é evidenciada pela metodologia usada pelos inspetores.

8.4 Desenvolvimento da metodologia para determinação das taxas de deterioração de pontes rodoviárias da pesquisa

Para a determinação das taxas de deterioração foram consideradas as possíveis utilizações dos métodos existentes atualmente. Primeiramente buscou-se utilizar o método de regressão polinomial, tendo em vista sua possível descrição mais detalhada do processo deteriorativo ao considerar o histórico do estado das pontes ao longo dos anos.

Para a elaboração de uma regressão polinomial capaz de traduzir com mínima acurácia o comportamento das pontes de um determinado grupo é necessário selecionar as pontes que não observaram ações de MR&R com melhoria do seu IC, mudança diretamente relacionada a mudança efetiva da sua condição. Afinal, o gráfico de deterioração tem foco apenas no processo deteriorativo associado a essas estruturas. Sob essa orientação, a pesquisa promoveu uma leitura dos dados dos grupos de pontes necessários para a aplicação do método, resultando nas informações da Tab. 8.5.

A partir dos dados da Tab. 8.5 destacam-se os trechos das rodovias BR-040/MG/RJ, BR-116/RJ, BR-101/RJ, BR-324/BA e BR-116/BA por possuírem dados em maior quantidade (acima de 20%) de obras que tiveram apenas decaimento do IC, característica essencial para a análise por meio da regressão polinomial. Após o primeiro filtro, verificou-se para cada um dos trechos a viabilidade da criação de um modelo de regressão polinomial que fosse representativo do processo deteriorativo dessas estruturas, pelo menos de parte das pontes do conjunto. Os dados resultantes não foram suficientes para a aplicação dessa metodologia, não retornando um resultado prático sequer para as pontes do conjunto reduzido.

Como exemplo, avalia-se os dados das 28 pontes que observaram apenas decréscimo de IC no trecho da BR-040/MG/RJ. Do total, 17 pontes do conjunto passaram do IC=5 para o IC=4, 4 alteraram do IC=5 para o IC=4 e também do IC=4 para o IC=3, 5 passaram do IC=4 para o IC=3, 1 transitou do IC=5 para o IC=3 e a última do IC=4 para o IC=2 durante o período de

2010 a 2016. Essas transições entre IC no período foram insuficientes para a construção de um modelo de regressão polinomial descritivo da evolução do processo deteriorativo ao longo do período, principalmente associado ao fato de que a maior parte das pontes desse trecho rodoviário, 20 das 21 estruturas com transição do IC=5 para o IC=4 observaram essa queda no mesmo ciclo de inspeção, o segundo ciclo. De forma ainda mais restritiva, das 26 pontes da BR-116/RJ, 23 observaram também queda do IC=5 para o IC=4, tendo a deterioração do IC=4 para o IC=3 as outras 3 pontes do grupo de pontes.

Tabela 8.5 – Planilha de dados para análise do estudo pelo método de regressão polinomial

| Rodovia | Total de Pontes | Transições positivas do IC | | | Transições negativas do IC | | | Pontes com transições positivas e negativas do IC no período | Pontes apenas com transições negativas do IC no período | Pontes apenas sem transições do IC no período |
|--------------|-----------------|----------------------------|-----------------|--|----------------------------|-----------------|--|--|---|---|
| | | Total de Transições | Total de Pontes | Total de Pontes com mais de uma transição positiva | Total de Transições | Total de Pontes | Total de Pontes com mais de uma transição negativa | | | |
| BR-040MG/RJ | 111 %TOTAL | 95 | 80 72% | 15 | 149 | 105 95% | 41 | 77 | 28 25% | 3 |
| BR-116/RJ | 66 %TOTAL | 44 | 36 55% | 6 | 68 | 57 86% | 11 | 31 | 26 39% | 4 |
| BR-101/RJ | 100 %TOTAL | 57 | 60 60% | 8 | 64 | 59 59% | 5 | 41 | 23 23% | 18 |
| BR-101/SC | 236 %TOTAL | 220 | 184 78% | 31 | 125 | 104 44% | 19 | 86 | 18 8% | 29 |
| BR-116/PR | 40 %TOTAL | 36 | 32 80% | 5 | 27 | 21 53% | 6 | 20 | 1 3% | 7 |
| BR-376/PR | 27 %TOTAL | 29 | 24 89% | 6 | 11 | 11 41% | 0 | 10 | 1 4% | 2 |
| BR-116/SP/RJ | 219 %TOTAL | 68 | 54 25% | 11 | 80 | 67 31% | 9 | 33 | 33 15% | 82 |
| BR-116/PR/SC | 44 %TOTAL | 51 | 37 84% | 13 | 33 | 29 66% | 4 | 29 | 0 0% | 5 |
| BR-116/SP/PR | 170 %TOTAL | 182 | 133 78% | 47 | 226 | 146 86% | 64 | 120 | 26 15% | 11 |
| BR-393/RJ | 47 %TOTAL | 40 | 39 83% | 1 | 17 | 15 32% | 2 | 13 | 2 4% | 6 |
| BR-153/SP | 40 %TOTAL | 53 | 34 85% | 19 | 19 | 18 45% | 1 | 16 | 4 10% | 2 |
| BR-324/BA | 52 %TOTAL | 17 | 16 31% | 1 | 36 | 32 62% | 4 | 12 | 20 38% | 16 |
| BR-116/BA | 44 %TOTAL | 20 | 18 41% | 2 | 20 | 17 39% | 3 | 5 | 12 27% | 14 |
| BR-381/MG | 297 %TOTAL | 97 | 91 | 6 | 101 | 99 | 2 | 65 | 34 11% | 168 |
| BR-392/RS | 28 %TOTAL | 4 | 3 11% | 1 | 5 | 5 18% | 0 | 0 | 5 18% | 19 |
| BR-116/RS | 27 %TOTAL | 4 | 3 11% | 1 | 5 | 5 19% | 0 | 1 | 4 15% | 18 |

Certamente, por se tratarem de pontes em trechos rodoviários com serviços de manutenção, as quedas apresentadas para os IC inferiores, IC=3 e IC=2 possuem muitas vezes melhoria do IC em algum ciclo do período avaliativo, tornando inviável a avaliação da deterioração dos dados da ponte em questão via método de regressão polinomial. A Fig. 8.4 mostra alguns gráficos de pontes retirados do banco de dados, os quais elucidam a dificuldade de uma função obtida através desse método em traduzir o comportamento deteriorativo do grupo à qual pertence, para o caso de grupo de pontes sob serviços de manutenção.

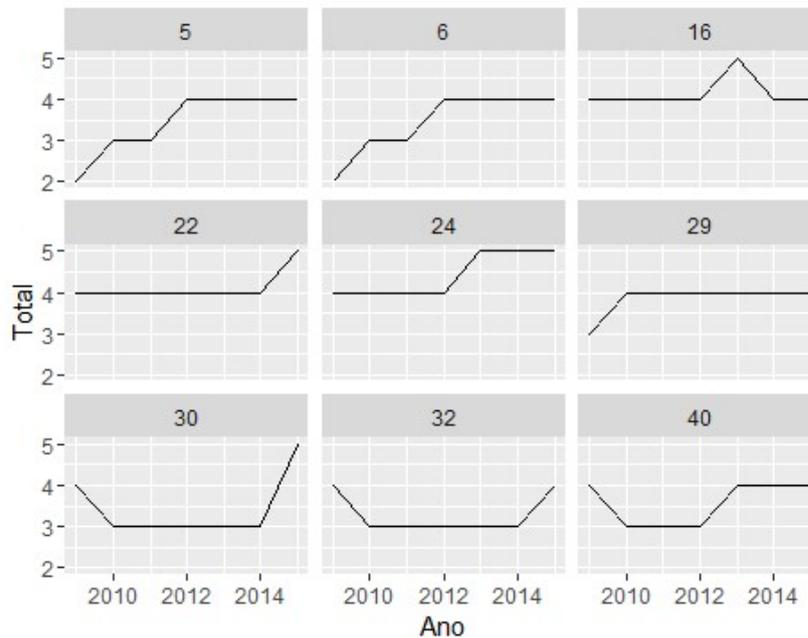


Figura 8.4 – Gráficos individuais de distribuição do IC ao longo do período avaliativo observado em pontes de um mesmo grupo do banco de dados da pesquisa.

Mais detalhadamente, para contribuir para a compreensão das informações integrantes do banco de dados da pesquisa, a Tabela 8.6 mostra os IC atribuídos à 8 pontes diferentes ao longo do período avaliativo.

Tabela 8.6 – Exemplos da distribuição de IC por pontes ao longo do período avaliativo

| Ano | Ponte | | | | | | | |
|------|-------|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E | F | G | H |
| 2008 | 3 | 4 | 4 | 2 | 2 | 4 | 3 | 4 |
| 2010 | 4 | 5 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 3 |
| 2011 | 3 | 5 | 3 | 2 | 5 | 4 | 4 | 3 |
| 2012 | 3 | 5 | 3 | - | 5 | 5 | 4 | 3 |
| 2013 | 2 | 4 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 2014 | 3 | 4 | 3 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| 2015 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| 2016 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 |

A ponte **A**, com o histórico de IC: 3-4-3-3-2-3-4-4, observou melhoria do IC em três anos ao longo do período. Apesar de duas quedas do seu IC no período, essa ponte não teria as transições dos estados IC=4 para o IC=3 e do IC=3 para o IC=2 contabilizados pelo método de regressão polinomial. Outro exemplo, a Ponte **B**, com histórico de IC: 4-5-5-5-4-4-4-4 não teria contabilizada as transições do IC=5 para o IC=4 bem como os três anos de permanência no IC=5 e 4 anos de permanência no IC=4. As demais pontes também são retiradas da análise exclusiva com pontes com decaimento, sem intervenções significativas.

Ausência de dados também dificultam a análise por regressão, como no caso da Ponte **D** da Tabela 8.6. As Pontes **E** a **H** mostram o número expressivo de transições que mesmo existentes no banco de dados são desconsideradas de uma análise nesse método. No entanto, o método das Cadeias de *Markov*, possibilita a utilização de cada uma dessas transições como variáveis aleatórias, sendo sensível a cada uma das transições de permanência no mesmo IC e de diminuição de nível do IC, ignorando apenas as transições positivas e considerando as demais. Assim, a permanência, por exemplo de 2 anos no IC=2 da ponte **E**, de 4 anos do IC=5 da ponte **F** e mudança do IC=5 para IC=4 das pontes **B**, **D**, **E**, **F** e **G** integram a construção das probabilidades da MPT.

Importante frisar que para alguns bancos de dados de inspeções de pontes de outras pesquisas da área, nos quais as intervenções são devidamente caracterizadas, existem alguns que admitem a possibilidade da inclusão de variações para um nível superior de estado, ou de flutuações positivas em curtos períodos. Após análise, caso as intervenções sejam caracterizadas como rotineiras e sem efeitos significativos sobre a vida-útil remanescente das pontes os dados são aproveitados, retirando-se dos registros originais os aumentos pontuais de IC, atribuindo-se o valor de IC imediatamente anterior. No entanto, esse tipo de classificação só pode ser realizado de posse das informações das intervenções devidamente registradas e com a participação de inspetores que possuam real conhecimento do grupo de pontes em questão. Assim sendo, para promover maior credibilidade aos resultados dessa pesquisa, o estudo não considerou as pontes com essas pequenas variações de IC positivas.

Outra justificativa para a retirada dos dados de pontes com pequenas flutuações de IC é a diferença entre a escala de IC adotada pela norma brasileira e pela norma norte-americana. Na tabela da FHWA, com o IC variando de 0 a 9, tem-se que o IC=9 é uma qualificação que se aproxima fortemente de uma obra nova. Para esses dados, os filtros usados em outras pesquisas

geralmente inutilizam as pontes com mudanças para esse IC máximo, considerando a ponte “como nova” após intervenções significativas. Para o caso brasileiro, a atribuição do IC=5 não significa que a melhoria assemelhou fortemente a obra ao seu estado de nova. Pelo pequeno intervalo de 1 a 5, as obras com IC=4, após alguma melhoria, podem ser avaliadas por alguns inspetores no IC=5 e permanecer com esta nota por alguns ciclos sem, no entanto, terem recebido obras de grandes intervenções. Adicionalmente, as variações positivas entre os níveis em uma escala com maior número de níveis como a norte-americana podem seguramente estar associadas a pequenas intervenções rotineiras, no entanto, essa mesma suposição não pode ser facilmente atribuída às mudanças numa escala de apenas 5 níveis, como a brasileira.

A partir da constatação da inviabilidade inicial da utilização da regressão polinomial devido ao baixo aproveitamento dos dados existentes para a sua construção – fato que resultaria possivelmente em maior probabilidade de se alcançar taxas de deterioração pouco representativas dos grupos de pontes de estudo – e, tendo em vista que o método das Cadeias de Markov possivelmente realizaria melhor esse aproveitamento, a investigação da pesquisa direcionou seus esforços para verificar a possibilidade de seu uso.

Outra vantagem na adoção do método da cadeia de *Markov* por tempo discreto é devido ao fato de que as inspeções foram conduzidas anualmente, resultando em intervalos iguais, premissa para aplicação do método (THOMPSON, 2012). Tal intervalo é exigência do Programa de Exploração Rodoviária da ANTT (PER). A Tabela 8.7 mostra a data da realização das inspeções anuais conduzidas em cada trecho rodoviário. Também é indicado intervalo de uma inspeção até a seguinte, em meses. É possível verificar que a exigência da realização de inspeções anuais dificilmente coincide com a programação de um intervalo de exatos 12 meses para sua realização. Em alguns casos esse intervalo chega a ser superior a 15 meses, em casos específicos esses dados não estão disponíveis na ANTT.

Como premissa para a utilização dos dados, a pesquisa considerou os intervalos de 12 meses com variações de mais ou menos 3 meses. Os resultados obtidos foram bastantes superiores àqueles usados apenas com o período de 12 meses de intervalo, corroborando para a estipulação dessa margem.

Tabela 8.7 – Data das inspeções realizadas nas pontes de estudo, por trecho rodoviário.

| Trecho Rodoviário | | Anos com inspeções de acordo com norma DNIT-PRO10 | | | | | | | | | | | |
|---|-----------|---|------|------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
| BR-381 MG/SP | Mês | | | | DEZ | DEZ | DEZ | DEZ | NR | MAI | ABR | ABR | |
| | Intervalo | | | | | 12 | 12 | 12 | NR | 17 | 11 | 12 | |
| BR-040 MG/SP | Mês | | | | | | JUL | JUL | JUL | ABR | JUN | MAR | AGO |
| | Intervalo | | | | | | | 12 | 12 | 9 | 14 | 9 | 17 |
| BR-116/RJ Além Paraíba- Teresópolis | Mês | JUL | OUT | JUL | JUL | JUL | JUL | JUL | JUL | JUN | JUL | AGO | JUL |
| | Intervalo | | 13 | 13 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 11 | 13 | 12 | 12 |
| BR-116/ BR-392/RS | Mês | | NR | | | NR | NR | OUT | NOV | DEZ | SET | SET | OUT |
| | Intervalo | | | | | | | | 12 | 13 | 9 | 12 | 13 |
| BR-116 PR/SC | Mês | | | | MAI | ABR | MAR | MAR | MAR | ABR | MAR | MAR | MAR |
| | Intervalo | | | | cadastral | | 11 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| BR-116/PR 376/PR BR-101/SC | Mês | | | | AGO | SET | OUT | JUL | MAR | MAR | MAR | ABR | FEV |
| | Intervalo | | | | | 15 | 12 | 9 | 8 | 12 | 12 | 13 | 10 |
| BR-116 SP/PR | Mês | | | | OUT | NR | DEZ | DEZ | NR | JAN | AGO | OUT | AGO |
| | Intervalo | | | | | | 26 | 12 | | 25 | 19 | 14 | 10 |
| BR-101/RJ | Mês | | | | OUT | SET | AGO | JUL | JUN | JUL | JUL | AGO | SET |
| | Intervalo | | | | cadastral | 11 | 11 | 11 | 11 | 13 | 12 | 13 | 13 |
| BR-153/SP | Mês | | | | | SET | SET | OUT | OUT | OUT | SET | OUT | OUT |
| | Intervalo | | | | | | 14 | 13 | 12 | 12 | 11 | 12 | 12 |
| BR-393/RJ | Mês | | | | cadastral | SET | JUL | MAI | JUN | JUL | AGO | JUN | |
| | Intervalo | | | | | | 10 | 10 | 13 | 13 | 13 | 10 | |
| BR-116/ 324/BA e BA 526/528 | Mês | | | | | | ABR | JUN | JUN | JUN | MAI | MAI | NOV |
| | Intervalo | | | | | | | | 12 | 12 | 11 | 12 | 18 |

Novamente, para a aplicação da Cadeia de *Markov*, os dados foram submetidos a outra filtragem, nesta fase para exclusão dos dados referentes às melhorias de estado. A pesquisa não desconsiderou a ponte integralmente, apenas os pares de melhoria de IC, mantendo os demais, para que as matrizes de probabilidades de transição pudessem ser constituídas do maior número de transições de IC, suficientes para resultar em boas aproximações do comportamento do conjunto.

É importante nesse ponto salientar que a diminuição ou aumento da classificação da ponte representada pelo IC, no caso dos trechos fiscalizados pela ANTT possui uma restrição à subjetividade comumente encontrada nas inspeções em pontes em todo o mundo (ALMEIDA, 2013). Devido à ANTT exigir a justificativa da melhoria do IC com identificação da intervenção condicional, de certa forma, a nota àquela atribuída no período anterior. Por outro

lado, caso haja decaimento, as intervenções necessárias terão seu período de execução sob outra condição, exigindo que o inspetor reavalie essa mudança. Tal fato poderia, de alguma maneira, trazer uma nova avaliação da ponte de acordo com critérios já estabelecidos na última avaliação, trazendo um comportamento mais congruente ao longo do período para os IC do banco de dados.

Conforme verificado na Tabela 8.7, somente os formulários com os dados das inspeções cadastrais das pontes das rodovias BR-116/376/PR e BR-101/SC, BR-101/RJ e BR-153/SP foram disponibilizados, totalizando 3 empresas administradoras das 11 empresas relacionadas.

É possível verificar com dados na Tabela 8.8 que a grande maioria das pontes rodoviárias possui seu sistema estrutural do tipo viga de concreto. As pontes da BR-101/SC possuem significativo número de obras no sistema estrutural de viga de concreto protendido, sistema adotado em diversos viadutos do trecho.

Tabela 8.8 – Pontes com inspeções cadastrais por tipo de estrutura

| Trecho Rodoviário | Número de obras | Natureza da Transposição | | Tipo de Estrutura | | | | | |
|---------------------|-----------------|--------------------------|----------|-------------------|-----------------|---------------------|---------------------|----------------------------|------------------|
| | | Pontes | Viadutos | Viga de | Laje de | Viga de | Laje de | Arco de alvenaria de pedra | Treliça metálica |
| | | | | Concreto Armado | Concreto Armado | Concreto Protendido | Concreto Protendido | | |
| BR-153/SP | 41 | 20 | 21 | 13 | | 25 | 2 | 0 | 1 |
| BR-101/RJ | 100 | 53 | 47 | 73 | 10 | 17 | 0 | 0 | 0 |
| BR-116/PR/SC | 45 | 36 | 9 | 35 | 0 | 9 | 0 | 0 | 1 |
| BR-101/SC | 236 | 98 | 138 | 47 | 8 | 167 | 13 | 1 | 0 |
| BR-116/PR | 40 | 4 | 36 | 7 | 22 | 11 | 0 | 0 | 0 |
| BR-376/PR | 27 | 25 | 2 | 16 | 2 | 10 | 0 | 0 | 0 |

A Tabela 8.9 mostra os comprimentos das pontes, conforme indicado nos apontamentos das fichas cadastrais. Em dois segmentos rodoviários pertencentes a mesma administradora, são registradas as datas de construção das obras. É importante destacar que algumas informações de serviços de manutenção, recuperação e reforço são descritas nos relatórios anuais das administradoras para a ANTT. Também são feitos alguns registros de intervenções no campo de “Observações Gerais” nos formulários das inspeções rotineiras. Em ambos os casos, não existem detalhamentos dos serviços realizados ou a atualização dos dados nas fichas cadastrais das pontes. Assim sendo, as informações dos trechos das Tabelas 8.8 e 8.9 são referentes ao ano de 2008, data da inspeção cadastral dessas estruturas.

Tabela 8.9 – Pontes com inspeções cadastrais padronizadas por comprimento e idade.

| Trecho Rodoviário | Número de obras | Comprimento | | Comprimento do maior Vão | | | Data da construção | | | |
|---------------------|-----------------|-------------|-------|--------------------------|-------|------------------|--------------------|----------------|-----------|--------------------|
| | | <=100m | >100m | <= 30 m | > 30m | Não identificado | Até 1960 | De 1960 a 1985 | Após 1985 | Data não informada |
| BR-153/SP | 41 | 34 | 7 | 20 | 21 | 0 | | | | 40 |
| BR-101/RJ | 100 | 87 | 13 | 80 | 20 | 0 | | | | 100 |
| BR-116/PR/SC | 45 | 35 | 10 | 35 | 5 | 4 | | | | 45 |
| BR-101/SC | 236 | 205 | 31 | 184 | 22 | 30 | 5 | 7 | 99 | 126 |
| BR-116/PR | 40 | 36 | 3 | 24 | 20 | 0 | | | | 40 |
| BR-376/PR | 27 | 23 | 4 | 7 | 20 | 0 | 10 | 10 | | 7 |

Nos formulários das inspeções cadastrais da BR-153/SP e da BR-101/RJ existem apontamentos de obras em ambientes agressivos, sendo 9 em 40 no primeiro trecho e 38 em 100 no segundo trecho rodoviário. Os demais trechos registraram que todas as pontes não estão localizadas em ambientes agressivos. Especialmente na BR-101/RJ, a condição usada majoritariamente para a definição do ambiente agressivo está relacionada a localização da ponte ou viaduto em trechos urbanos. É importante destacar que nas fichas de cadastramento de pontes da Norma NBR-9452/2016 e do DNIT-010/2004 existe apenas o registro se o ambiente é ou não agressivo. Portanto, as pontes não são classificadas de acordo com as quatro classes de agressividade ambiental para estruturas de concreto existentes na norma NBR-6188/2014, importante fator na velocidade de deterioração dessas estruturas.

Administrados pela mesma empresa, apenas os trechos rodoviários da BR-376/PR, BR-116/SC e BR-101/PR possuem os dados de volume de tráfego por ponte com o respectivo trem-tipo de projeto. Dos outros 10 trechos rodoviários as inspeções de cadastro não foram disponibilizadas, tendo 2 desses trechos registros de inspeções cadastrais seguindo metodologia própria da empresa administradora, divergentes do padrão das normas do DNIT e da ABNT. Os formulários dessas inspeções cadastrais não possuíam alguns dados relevantes, tais como características do meio ambiente, da classe da ponte, do volume médio tráfego entre outros. Para as pontes sem inspeções de cadastro disponíveis, alguns dados característicos puderam ser verificados no campo de “Notas Gerais” e croquis das estruturas incluídos nas fichas de inspeções rotineiras. Vários croquis indicavam o comprimento das pontes e alguns incluíam as medidas dos vãos.

As fotos das inspeções rotineiras também foram utilizadas nessa pesquisa para a definição das informações da Tabela 8.10, com a caracterização dos tipos estruturais desse grupo de pontes, após a aplicação dos filtros descritos na metodologia.

Tabela 8.10 – Pontes sem inspeções cadastrais de acordo com as normas brasileiras ou em sem registros das inspeções cadastrais, por tipo de estrutura.

| Trecho Rodoviário | Número de obras | Natureza da Transposição | | Tipo de Estrutura | | | | |
|----------------------|-----------------|--------------------------|----------|-------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|
| | | Pontes | Viadutos | Viga de Concreto | Laje em Concreto | Estrutura mista | Arco de concreto | Treliça Metálica |
| BR-040/MG/RJ | 111 | 41 | 70 | 81* | 30* | 0 | 0 | 0 |
| BR-381/MG/SP | 297 | 151 | 146 | 285 | 8 | 4 | 0 | 0 |
| BR-393/RJ | 47 | 37 | 10 | 35* | 11* | 0 | 1 | 0 |
| BR-116/RJ | 69 | 47 | 22 | 62 | 4 | 3 | 0 | 0 |
| BR-116/SP/PR | 170 | 111 | 59 | 164 | 6 | 0 | 0 | 0 |
| BR-116/BA | 44 | 37 | 7 | 35 | 8 | 0 | 1 | 0 |
| BR-324/BA | 52 | 8 | 44 | 43 | 9 | 0 | 0 | 0 |
| BR-116/SP/RJ | 366 | 156 | 210 | 315 | 47 | 3 | 1 | 0 |
| BR-293/392/RS | 47 | 44 | 3 | 47* | 0 | 0 | 0 | 0 |
| BR-116/RS | 27 | 25 | 2 | 26* | 0 | 0 | 1* | 0 |

* -Quantidade relacionada em inspeção cadastral com metodologia própria da Concessionária.

Novamente, da análise dos dados da Tabela 8.10 é possível verificar a predominância das pontes de concreto no estoque das estruturas da infraestrutura rodoviária brasileira. Nas inspeções cadastrais com método próprio foi possível verificar para as 111 pontes da BR-040/MG/SP a data da construção de 39 obras e a Classe de 8 pontes. Todas as pontes das BR-393, BR-293/392/RS e BR-116/RS possuem registros da idade das suas obras, registrados nas fichas de inspeção rotineira, no campo de “Notas Gerais”.

A Tabela 8.11 mostra os dados da extensão dessas obras, predominantemente retirados nas fichas de inspeção rotineira. Apesar do levantamento realizado nos diversos documentos recebidos, algumas informações não foram possíveis de serem contabilizadas pela ausência do seu devido registro.

As pontes da rodovia BR-392 executadas nas obras de duplicação, com data de construção de 2012 não foram consideradas no levantamento da Tabela 8.11, pois não registraram queda de IC devido ao seu curto período de vida.

Tabela 8.11 – Pontes sem inspeções cadastrais de acordo com as normas brasileiras ou em sem registros das inspeções cadastrais, por comprimento das obras.

| Trecho Rodoviário | Número de obras | Comprimento | | | Comprimento do maior Vão | | |
|----------------------|-----------------|-------------|-------|--------------|--------------------------|-------|--------------|
| | | <=100m | >100m | sem registro | <= 30 m | > 30m | sem registro |
| BR-040/MG/RJ | 111 | 71 | 40 | 40 | 73 | 38 | 0 |
| BR-381/MG/SP | 297 | 249 | 23 | 25 | 232 | 65 | 0 |
| BR-393/RJ | 47 | 40 | 7 | 7 | 44 | 3 | 0 |
| BR-116/RJ | 69 | 52 | 5 | 3 | 55 | 14 | 0 |
| BR-116/SP/PR | 170 | 136 | 34 | 0 | 0 | 0 | 170 |
| BR-116/BA | 44 | 40 | 4 | 0 | 35 | 9 | 0 |
| BR-324/BA | 52 | 49 | 2 | 1 | 30 | 10 | 12 |
| BR-116/SP/RJ | 366 | 310 | 56 | 0 | 0 | 0 | 366 |
| BR-293/392/RS | 47 | 40 | 7 | | 45 | 2 | 0 |
| BR-116/RS | 27 | 19 | 8 | 0 | 24 | 1 | 2 |

De acordo com estudos de Cesare (2012), as taxas de deterioração das pontes são dependentes do material construtivo empregado, das características do seu projeto de construção, da agressividade ambiental, da carga dos veículos que trafegam sobre a estrutura, do volume de tráfego diário, da característica dos veículos que compõem o tráfego, do ano de construção da ponte associado às intervenções de significativa alteração da sua capacidade portante, do clima e da região geográfica no qual a ponte está inserida. A viabilidade da análise de cada um desses fatores passa a ser considerada individualmente com base nos dados disponíveis.

Os dados compilados de todas as pontes (com inspeções cadastrais ou não) indicam que mais de 99,5% das pontes do conjunto são de concreto, com 90% no sistema estrutural tipo viga, orientando a pesquisa para a verificação das taxas de deterioração de pontes de concreto.

As fichas de inspeções de 281 das 1.719 pontes possuem indicação do ano de construção das obras, representando apenas 16,3% do total. Apesar desses dados, não existem registros das intervenções e obras realizadas nessas obras anteriores ao período da concessão. Tais obras podem trazer a obra características que alterariam seu comportamento estrutural e sob o ponto de vista de durabilidade. Atribuir para uma ponte sua idade de construção, com ela tendo sofrido intervenções significativas poderá gerar compreensões equivocadas do processo deteriorativo (Morcou, 2002a). Além da ausência de histórico das obras antes do período de concessão, após esse período também não está na documentação as intervenções realizadas de maneira detalhada

o suficiente para que a pesquisa pudesse atribuir nova data para a construção, de acordo com a metodologia usada em outras pesquisas da área (Morcoux, 2002a).

Apenas as 489 pontes com inspeções cadastrais de acordo com o DNIT e a ABNT possuem indicações da agressividade ambiental. No entanto, o registro dessa condição não segue uma metodologia similar entre os trechos para a definição da agressividade do ambiente, tendo registros de agressividade ambiental em apenas dois dos seis trechos, majoritariamente associando a agressividade ambiental aos trechos urbanos. Ainda nas fichas de inspeção cadastral, apenas uma empresa administradora utilizou o campo de registro de volume de tráfego nos formulários, contemplando 299 pontes do conjunto. Para todos os registros, relativos às inspeções cadastrais e rotineiras não existem informações completas com as características dos serviços e das obras realizadas nas pontes com a indicação do período. Ainda, não houve alteração de dados nos formulários de cadastro após algumas intervenções verificadas. Existem alguns formulários cadastro após a vistoria inicial, no entanto, se referem apenas para estruturas novas construídas ao longo do período de operação.

No entanto, a pesquisa realizada irá comprovar que, apesar da inexistência desses dados, é possível aplicar o método com bons resultados utilizando algumas premissas desenvolvidas no estudo, considerando a particularidade das pontes brasileiras e das características próprias dos métodos existentes e praticados para as inspeções nessas estruturas. Para a aplicação das Cadeias de *Markov*, foi adotada então a consideração do tempo inicial de vida da estrutura a partir da primeira inspeção registrada. A partir desse método, as curvas de deterioração são construídas para o início em IC variados, tendo em vista que uma ponte já pode estar em um IC diferente do seu melhor, que seria $IC=5$, já no primeiro ano de inspeção.

De fato, em pesquisa conduzida por Zhang *et al.* (2003) em 7.075 pontes do estado de Louisiana com dados de 20 anos de inspeções produziram resultados que não continham correlações diretas entre as taxas de deterioração dos elementos das pontes e a idade dessas estruturas registradas no inventário. No entanto, o estudo apontou que os resultados de previsão do estado futuro dessas obras obtidos pelas MPT construídas a partir do método de *Markov* possuíam muito boas aproximações com os resultados reais, sendo a metodologia avaliada como uma boa ferramenta para a predizer a deterioração de pontes. A experiência de Zhang *et al.* (2003) foi fundamental para a tentativa da adoção dessa metodologia própria, qual seja, de assumir o prazo inicial como o início do período avaliativo. No entanto, a necessidade dessas informações

disponíveis em base de cadastro de pontes no Brasil é crucial para o avanço das pesquisas no setor podendo, inclusive, sua ausência configurar-se em obstáculo futuro para aproximações mais refinadas dos modelos de deterioração obtidos.

Os dados também dificultam as considerações sobre a efetiva influência do meio ambiente agressivo sobre as transições do índice de condição dessas estruturas. Devido ao limitado número de apontamentos e dos critérios desconhecidos e claramente distintos entre os trechos, essa influência será investigada através do georeferenciamento dos trechos rodoviários sob bases climáticas para a verificação da contribuição sobre as taxas de deterioração dos climas nos quais as pontes estão localizadas.

Apesar dos dados de volume de tráfego não terem sido registrados para as pontes da maior parte dos trechos rodoviários da pesquisa, as taxas de deterioração encontradas serão comparadas com dados fornecidos pela ANTT referentes ao último ano de inspeção considerado.

O estudo verificou que em 99,6% de todos os pontilhões dos trechos rodoviários da pesquisa dos dados fornecidos pela ANTT houve a permanência dessas estruturas no mesmo índice de condição durante todo o período, geralmente no $IC=4$. Assim, o filtro determinado no início da metodologia se mostrou eficaz, sendo que a consideração dessa informação na construção das MPT das pontes resultaria possivelmente em uma previsão mais otimista do comportamento dessas estruturas no tempo, diminuindo a assertividade das taxas reais de deterioração das pontes de maior preocupação dos administradores de rodovias.

Para a estimativa da MPT do Método da Cadeia de *Markov*, os dados de todas as obras foram utilizados, independente da ponte ter sofrido aumento do IC em determinado período. Para os casos de aumento do IC, o dado desta mudança foi descartado individualmente, tendo sido incluídos os dados de mudanças negativas posteriores ou dados de permanência do IC para essa mesma obra.

A partir do banco de dados e da sua verificada ausência de informações adicionais que pudessem colaborar com a investigação das possíveis causas para as taxas de deterioração dessas estruturas, os demais métodos estatísticos tais como *Ordered Probit Model*, *Binary Probit Model*, abordagem *Bayesiana* e os métodos de inteligência artificial não seriam aproveitados na sua maior contribuição, qual seja, a investigação das causas das taxas de deterioração

encontradas, somada à complexa análise analítica associada ao método e difícil implementação em softwares de BMS.

Apesar da possibilidade da utilização dos métodos de distribuição *Weibull* e *Semi Markov* para promover maior acurácia na determinação das matrizes de probabilidades de transição, a quantidade de dados existentes não resultou em alterações significativas dos valores das MPT construídas após sua aplicação. Importante citar que tais resultados não foram adotados, apesar de bastante próximos aos resultados finais dessa pesquisa, tendo em vista os estudos conduzidos por ZHANG em 2003 para a determinação de taxas de deterioração com dados de 17.000 pontes no estado de Nova Iorque. Tais pontes foram inspecionadas em intervalos máximos de dois anos e com 47 elementos estruturais codificados para atribuição de IC, incluindo 25 elementos para cada vão da ponte, resultando em um considerável banco de dados. Apesar do método utilizado na pesquisa ter sido baseado na distribuição *Weibull* e consideração do tempo como uma variável aleatória - o que intuitivamente contribuiria para a acurácia na construção do modelo – e do vasto banco de dados, os resultados apresentaram previsões com acurácia inferior àquelas obtidas no Método das Cadeias de *Markov* (ZHANG, 2003).

Finalmente, por ser um estudo pioneiro com dados de inspeções de pontes brasileiras e com a ciência da atual necessidade nacional em implementar essa metodologia para os diversos parques de obras no Brasil, optou-se pelo método estocástico discreto, pela sua vantagem de possuir fácil implementação em sistemas de gestão de pontes, sendo o principal método adotados em BMS existentes, não se realizando a pesquisa considerando métodos que consideram tempo contínuo.

8.5 Tratamento dos dados

Primeiramente buscou-se fazer uma análise descritiva dos dados, procurando elucidar as particularidades de cada conjunto de obras referente a um determinado trecho rodoviário. A análise estatística dos dados com implementação do cálculo das MPT e demais equações foi realizada utilizando a linguagem *R*, versão 2.2.1.9000 (HADLEY WICKHAM, 2018) . A utilização da linguagem foi determinada pela consolidada participação do sistema na condução de diversas pesquisas científicas em todo o mundo e por ser um software livre. Para a

visualização dos dados através de gráficos foi utilizado o pacote de gráficos *ggplot2*, interface gráfica pertencente ao **R**.

A implementação das rotinas no programa estatístico primeiramente foi realizada com a padronização das entradas de dados para todos os trechos rodoviários com as pontes de pesquisas, uma vez que, a princípio, todas as empresas administradoras deveriam seguir a norma DNIT-010/2004-PRO (DNIT, 2004). No entanto, face a algumas diferenças nas informações contidas nos relatórios de inspeção, a rotina inicial de leitura precisou ser adaptada para captar o máximo de dados disponíveis em cada ficha e, por vezes, a rotina foi alterada devido à inexistência de tantos outros.

8.6 Verificação da acurácia dos resultados

Para possibilitar um estudo das diferentes taxas de deterioração de pontes para cada trecho rodoviário da pesquisa, propõe-se a realização de uma análise a partir do cálculo do tempo médio esperado para que uma ponte altere de um IC para o outro. Supondo T_X como sendo o tempo mínimo em anos para que uma ponte atinja, pela primeira vez, o índice de condição X é possível obter o tempo médio que a ponte levará para atingir pela primeira vez o Índice de Condição X a partir de um outro Índice de Condição Y. Ou seja, $E_Y(T_X)$ é o tempo esperado, em anos, de uma ponte que apresenta Índice de Condição igual a Y passar para o Índice de Condição X.

Para o caso particular de análise da deterioração de pontes, no qual o modelo utilizado não leva em consideração as intervenções das obras e que não é possível saltar dois estados de condição no período de um ano, temos de forma simplificada:

$$E_Y(T_{Y-1}) = \frac{1}{1-P_{YY}} \quad (8.1)$$

Onde:

P_{YY} é a probabilidade de uma ponte no Índice de Condição ou IC = Y permanecer em IC = Y.

Assim, o tempo médio de passar de um Índice de Condição para o seu subsequente será:

$$E_5(T_4) = \frac{1}{1-P_{55}}, E_4(T_3) = \frac{1}{1-P_{44}} \text{ e } E_3(T_2) = \frac{1}{1-P_{33}} \quad (8.2)$$

Sejam as equações $IC(t) = IC_0 \cdot (MPT)^t$ e $E(IC_t) = IC(t) \cdot IC$, onde $IC(t)$ é a distribuição de probabilidades após t anos e $E(IC_t)$ é o valor esperado do IC da ponte após t anos. Então podemos escrever:

$$E(IC_t) = IC_0 \cdot (MPT)^t \cdot IC \quad (8.3)$$

em que cada elemento da matriz MPT^t fornece a probabilidade de transição após t períodos de tempo.

Para demonstração da aplicação da Eq. 8.3, tomemos a seguinte MPT da Eq. 6.10 com as probabilidades calculadas para um conjunto hipotético de 6 pontes. Para esse grupo de pontes, uma determinada ponte com $IC=5$ terá seu IC esperado após t anos calculado de acordo com a expressão vetorial:

$$E(IC_t) = (0 \ 0 \ 0 \ 1) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,25 & 0,75 & 0 & 0 \\ 0 & 0,125 & 0,875 & 0 \\ 0 & 0 & 0,6 & 0,4 \end{pmatrix}^t \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{pmatrix}$$

Assim, para a ponte do grupo com $IC=5$ no momento atual, seu IC esperado após 10 anos será:

$$E(IC_{10}) = (0 \ 0 \ 0 \ 1) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,25 & 0,75 & 0 & 0 \\ 0 & 0,125 & 0,875 & 0 \\ 0 & 0 & 0,6 & 0,4 \end{pmatrix}^{10} \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{pmatrix}$$

$$E(IC_{10}) = (0 \ 0 \ 0 \ 1) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,944 & 0,056 & 0 & 0 \\ 0,530 & 0,207 & 0,263 & 0 \\ 0,432 & 0,236 & 0,332 & 0,001 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{pmatrix}$$

$$E(IC_{10}) = (0,432 \ 0,236 \ 0,332 \ 0,001) \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{pmatrix}$$

$$E(IC_{10}) = 2 \times 0,432 + 3 \times 0,236 + 4 \times 0,332 + 5 \times 0,001 = 2,905.$$

A partir desse conhecimento, para a avaliação da eficácia de cada MPT na sua aproximação com o comportamento real do grupo de pontes da pesquisa propõem-se a construção de novas MPT desconsiderando-se o último ano do ciclo de cada grupo de pontes. A partir dessas novas probabilidades de transição, poderão ser realizadas estimativas do número de pontes em cada IC para $t=1$, ou seja, para o ano seguinte que serão comparadas com os dados existentes do último ano avaliativo.

Para o cálculo, realizou-se um desenvolvimento de premissas do método de *Markov* adaptadas para aplicação particular da pesquisa, visando maior facilidade de implementação computacional. Considerando $E(N_t)$ como o número esperado de pontes em cada IC após t anos, podemos escrever a equação vetorial:

$$E(N_t) = N_0 \times (MPT)^t \quad (8.3)$$

Onde,

N_0 é o vetor do número de pontes em cada IC no ano inicial para a previsão;

$(MPT)^t$ é a MPT elevada a potência t em anos.

Novamente, visando a demonstrar a aplicação da Eq. 8.3, consideraremos a MPT da Eq. 6.10 para o grupo de pontes hipotético com a suposição de partida no ano de 2014, visando obter o número esperado de pontes em cada IC para os dois anos seguintes. Assim, podemos escrever para que a previsão para 2015 ou $t=1$, será:

$$E(N_1) = (0 \quad 2 \quad 3 \quad 1) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,25 & 0,75 & 0 & 0 \\ 0 & 0,125 & 0,875 & 0 \\ 0 & 0 & 0,6 & 0,4 \end{pmatrix}$$

$$E(N_1) = (0,5 \quad 1,875 \quad 3,225 \quad 0,4)$$

E a previsão de número de pontes por IC para 2016 ou $t=2$, será:

$$E(N_2) = (0 \quad 2 \quad 3 \quad 1) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,25 & 0,75 & 0 & 0 \\ 0 & 0,125 & 0,875 & 0 \\ 0 & 0 & 0,6 & 0,4 \end{pmatrix}^2$$

$$E(N_2) = (0 \quad 2 \quad 3 \quad 1) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,437 & 0,562 & 0 & 0 \\ 0,031 & 0,203 & 0,766 & 0 \\ 0 & 0,075 & 0,765 & 0,16 \end{pmatrix}$$

$$E(N_2) = (0,969 \quad 1,809 \quad 3,062 \quad 0,16)$$

Finalmente, a Tabela 8.12 apresenta como esses dados poderiam ser utilizados para uma simulação visando aferir a eficácia da matriz, considerando que, para o caso hipotético, os dados de 2015 são conhecidos.

Tabela 8.12 – Expectativa do IC futuro para o grupo de pontes fictício.

| Trecho Rodoviário | Ano | Número de pontes por IC | | | | |
|-----------------------------|---------------|-------------------------|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| BR-040/MG/RJ (65 pontes) | Dados 2014 | x | 0 | 2 | 3 | 1 |
| | Dados 2015 | x | 0 | 3 | 2 | 1 |
| | Previsão 2015 | x | 1 | 2 | 3 | 0 |
| | Previsão 2016 | x | 1 | 2 | 3 | 0 |

A princípio, a comparação dos dados previstos com os dados observados ou reais é facilmente realizada, no entanto, a mensuração da acurácia somente a partir desses resultados não é direta. Assim, constatou-se a necessidade de estabelecer outro parâmetro para a mensuração da dispersão dos resultados, tendo sido proposta a adoção do cálculo da Variância do Método de *Markov*, definida conforme a expressão de produto escalar e vetorial:

$$Var(N_t) = N_0 \times [(MPT)^t \cdot (1 - (MPT)^t)] \quad (8.4)$$

Onde,

$Var(N_t)$ pode ser definido na pesquisa como a variância do número de pontes em cada IC após t anos.

N_0 é o vetor do número de pontes em cada IC no ano inicial para a previsão;

$(MPT)^t$ é a MPT elevada a potência t em anos;

e 1 é uma matriz de mesma dimensão da MPT com todas as entradas iguais a 1 .

A partir dessa premissa, o método encontrado para a determinação da acurácia do modelo se baseia na verificação do resultado do número de pontes em determinado IC considerando a variância calculada. Os modelos cujos valores previstos estiverem contidos no intervalo previsto na variância poderão ser considerados como tendo boa aproximação do comportamento real do conjunto, caso contrário, o modelo não possui uma boa descrição da deterioração do grupo de pontes.

9

RESULTADOS

Conforme o método das Cadeias de *Markov* e das premissas particulares dessa pesquisa listadas no capítulo 8, a construção das matrizes de transição de probabilidades exige um número de transições de um estado para o outro imediatamente inferior ou da permanência no mesmo estado em número suficiente para que seja possível determinar a probabilidade de cada ocorrência. As transições de um estado para o outro melhor não compõem as matrizes de transição de probabilidades para o conhecimento do processo deteriorativo, já que a melhoria do IC geralmente está associada a realização de obras. Adicionalmente, os dados com transições em períodos superiores a 15 meses e inferiores a 9 meses não foram contabilizados, bem como as transições de uma ponte de um nível para dois imediatamente inferiores no intervalo de 1 ano não foram utilizadas. Para melhor compreensão do aproveitamento das informações, o gráfico da Fig. 9.1 mostra o número de transições observadas versus a o número de transições utilizadas na estimativa das MPT. Cada ponto do gráfico representa uma ponte e o número de transições observadas versus o número de transições de fato utilizadas para as estimativas da MPT.

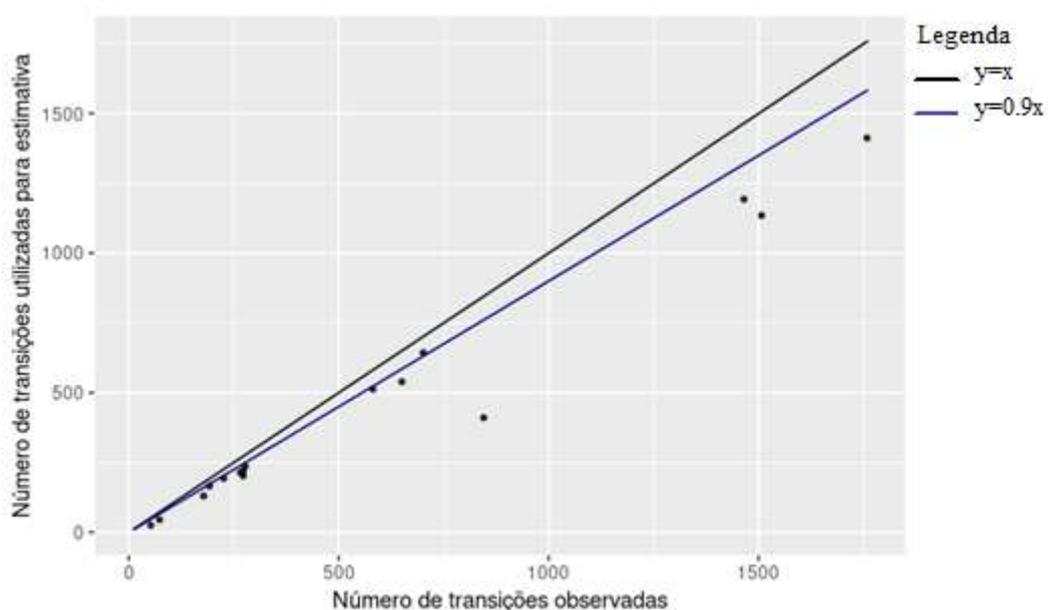


Figura 9.1 – Transições totais de IC versus transições de IC usadas no cálculo das MPT

No gráfico da Fig. 9.1 a linha preta é a reta $y = x$, ou seja, pontos em cima dela seriam pontes com 100% da informação dos dados disponíveis. A linha azul é a reta $y = 0,9x$, ou seja, representa quando 90% da informação dos dados é utilizada para as estimativas do modelo, neste caso representado pela MPT. Baseado na filtragem para a aplicação do método, a Tabela 9.1 mostra o número de transições observadas nas pontes e seu aproveitamento para a elaboração das MPT de cada trecho rodoviário.

Tabela 9.1 – Transições entre estados registradas nas pontes da pesquisa, por trecho rodoviário.

| Trecho Rodoviário | Período de observação | Total de Pontes | Contagem de Transições | | | | |
|-------------------|-----------------------|-----------------|------------------------|------------|---------------------------------|-------------------------------|---|
| | | | Total | Utilizadas | Positivas (com melhorias de IC) | Com período superior a um ano | Negativas com mais de um nível após 1 ciclo |
| BR-040/MG | 2010 a 2016 | 111 | 650 | 539 | 95 | 2 | 15 |
| BR-116/RJ | 2005 a 2016 | 66 | 701 | 643 | 44 | 4 | 12 |
| BR-116/RS | 2011 a 2016 | 27 | 131 | 127 | 4 | 0 | 0 |
| BR-293/RS | 2011 a 2014 | 19 | 57 | 57 | 0 | 0 | 0 |
| BR-392/RS | 2011 a 2016 | 28 | 137 | 133 | 4 | 1 | 0 |
| BR-381/MG/SP | 2008 a 2015 | 293 | 1758 | 1412 | 97 | 293 | 5 |
| BR-101/RJ | 2010 a 2016 | 100 | 581 | 512 | 57 | 14 | 1 |
| BR-101/SC | 2008 a 2016 | 236 | 1507 | 1135 | 220 | 202 | 3 |
| BR-116/PR | 2008 a 2016 | 40 | 272 | 202 | 36 | 34 | 0 |
| BR-376/PR | 2008 a 2016 | 27 | 178 | 130 | 29 | 26 | 0 |
| BR-116/SP/RJ | 2009 a 2016 | 376 | 1297 | 1046 | 79 | 201* | 2* |
| BR-116/PR/SC | 2009 a 2016 | 44 | 265 | 214 | 50 | 16 | 0 |
| BR-116/PR/SP | 2008 a 2016 | 170 | 845 | 410 | 163 | 334 | 9 |
| BR-393/RJ | 2010 a 2016 | 47 | 277 | 236 | 40 | 0 | 1 |
| BR-153/SP | 2009 a 2016 | 40 | 272 | 219 | 53 | 0 | 0 |
| BR-116/BA | 2011 a 2016 | 44 | 192 | 166 | 20 | 11 | 3 |
| BR-324/BA | 2011 a 2016 | 52 | 226 | 193 | 17 | 9 | 8 |

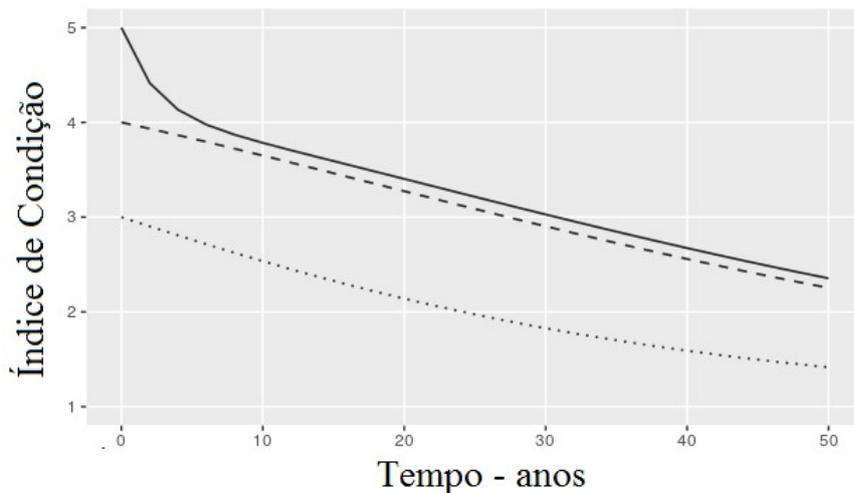
*Período considerado de 2 ciclos/ 2anos.

Analisando o gráfico da Fig. 9.1 e a Tab. 9.1, nota-se que, dos 16 trechos rodoviários, apenas em um é possível utilizar acima de 90% dos dados. Há rodovias que temos uma perda significativa de informação para a estimativa da MPT devido a períodos entre inspeção superiores a um ano, intervenções de melhoria e mudanças de mais de um nível no período de

um ano. A distribuição dos IC ao longo do período de pesquisa está no Apêndice A, por trecho rodoviário de estudo.

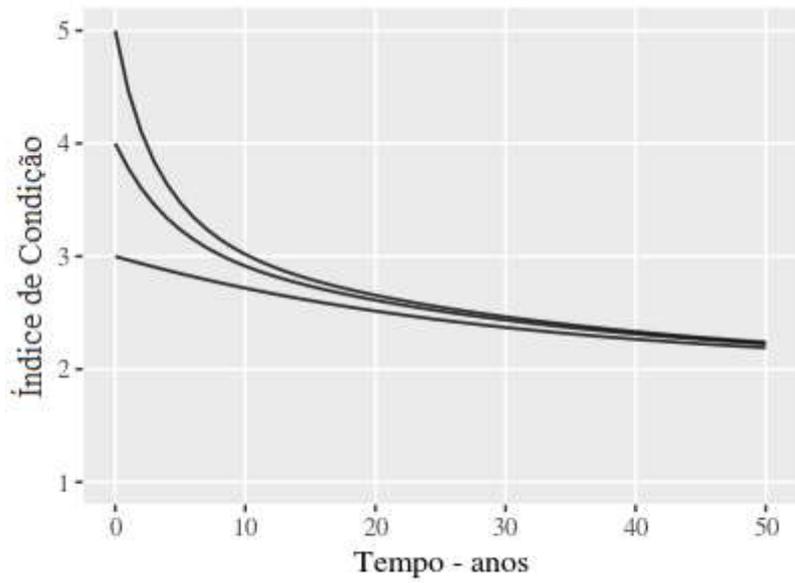
9.1 Matrizes de Probabilidades de Transição dos Trechos

A partir da MPT das pontes de cada segmento rodoviário é possível traçar as curvas de deterioração dessas estruturas considerando a média dos IC para cada ano do conjunto. Para a construção das curvas é calculado o IC médio das pontes de cada grupo partindo do início do processo para cada IC, ou seja, IC=5, IC=4, IC=3 e IC=2, sendo dependente essas partidas da existência na MPT das transições entre os níveis. Ou seja, se não existirem dados de transição suficiente entre os IC=2 e IC=1 não será possível construir a curva com saída no IC=2. O modelo de deterioração para o IC global das pontes foi plotado para uma extrapolação de 50 anos, para melhor visibilidade do gráfico. As matrizes de probabilidade de transição obtidas e as curvas de deterioração das pontes são mostradas nas Figs. 9.2 a 9.17 por trecho rodoviário da pesquisa, sendo a BR-116/SP/MG a única tomada para ciclo de 2 anos de inspeções.



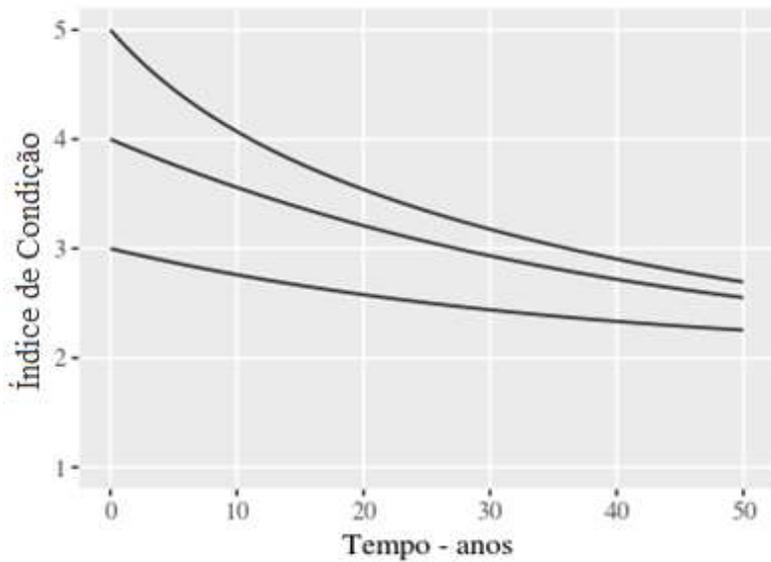
| IC | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0,0814 | 0,9186 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0,0969 | 0,9031 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0,0665 | 0,9335 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0,5849 | 0,4151 |

Figura 9.2 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-116/SP/MG



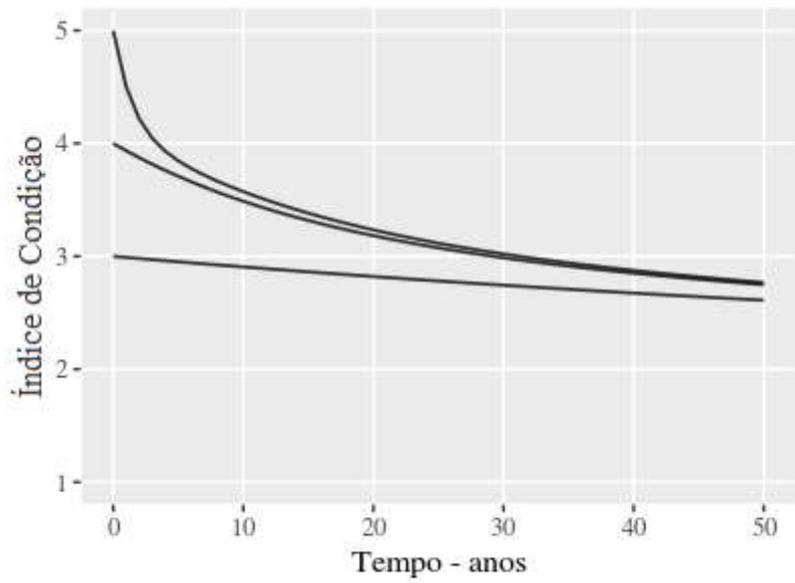
| IC | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|--------|--------|--------|--------|
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0,0326 | 0,9674 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0,2188 | 0,7812 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0,5321 | 0,4679 |

Figura 9.3 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-040/MG/RJ



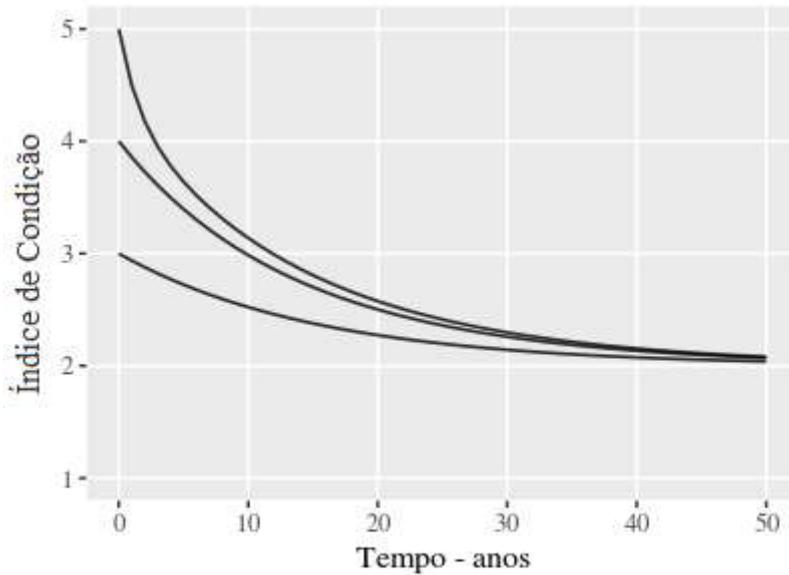
| IC | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|--------|--------|--------|--------|
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0,0270 | 0,9730 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0,0486 | 0,9514 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0,1266 | 0,8734 |

Figura 9.4 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-116/RJ



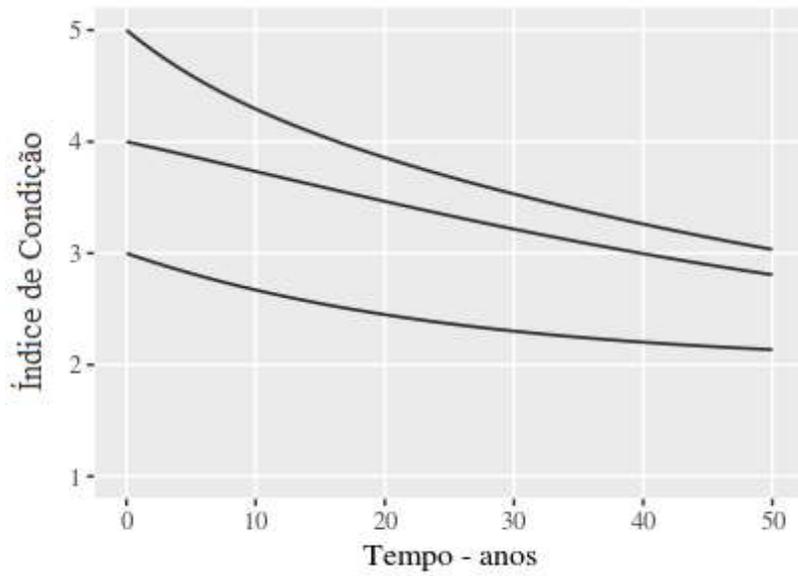
| IC | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|--------|--------|--------|-----|
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0,0098 | 0,9902 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0,0648 | 0,9352 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 |

Figura 9.5 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-381/MG/SP



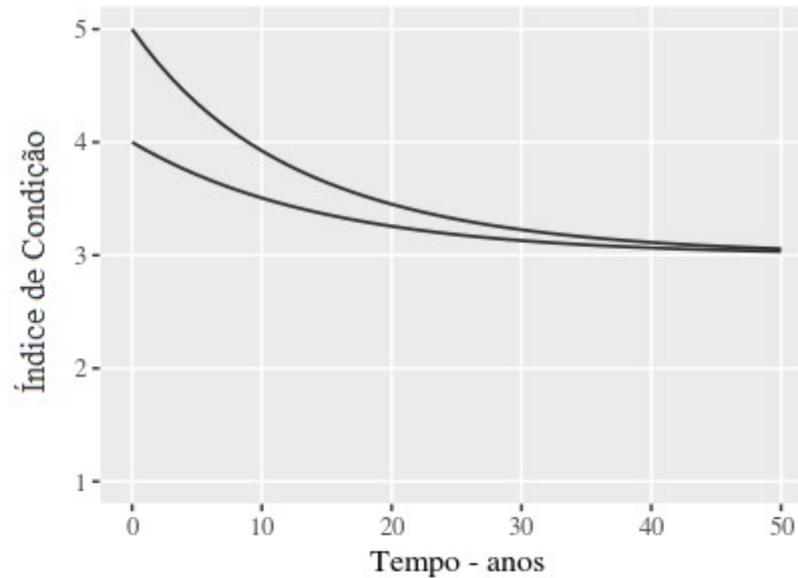
| IC | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|--------|--------|--------|-----|
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0,0628 | 0,9372 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0,1412 | 0,8588 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 |

Figura 9.6 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-101/RJ



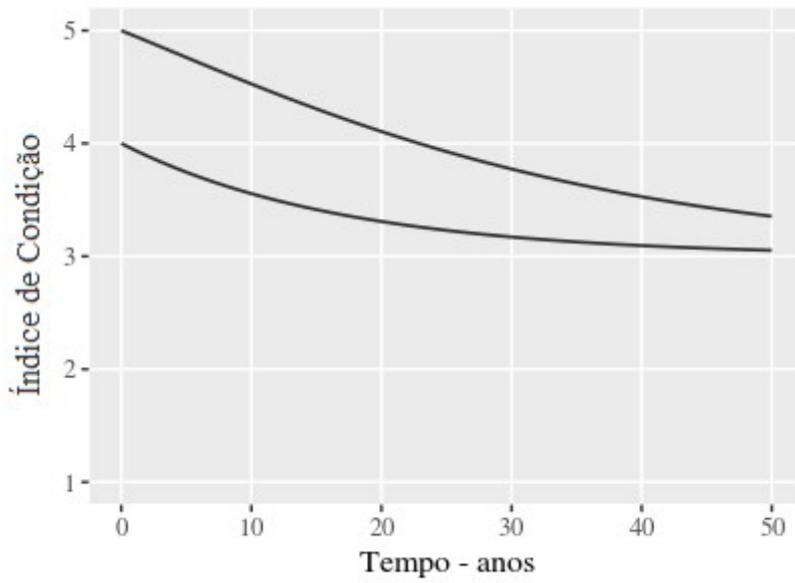
| IC | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|--------|--------|--------|--------|
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0,0391 | 0,9609 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0,0256 | 0,9744 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0,0923 | 0,9077 |

Figura 9.7 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-101/SC



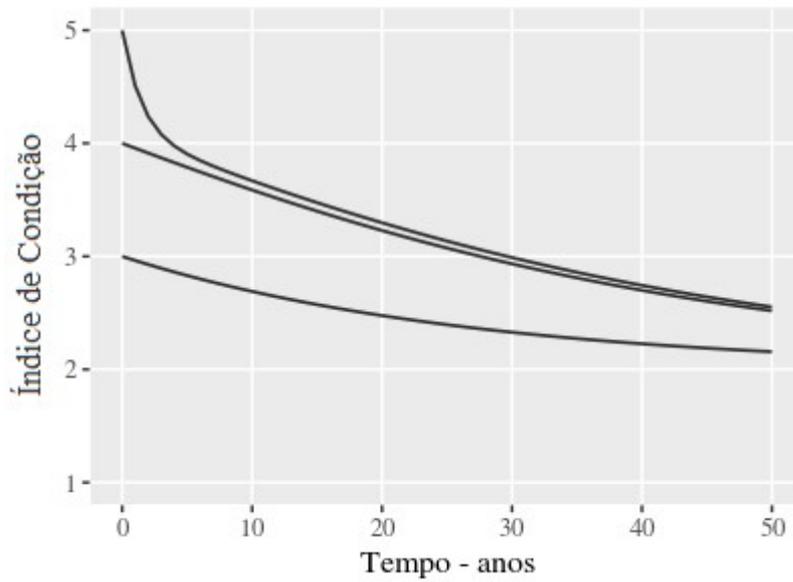
| IC | 3 | 4 | 5 |
|----|--------|--------|--------|
| 3 | 1 | 0 | 0 |
| 4 | 0,0657 | 0,9343 | 0 |
| 5 | 0 | 0,1566 | 0,8434 |

Figura 9.8 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-116/PR



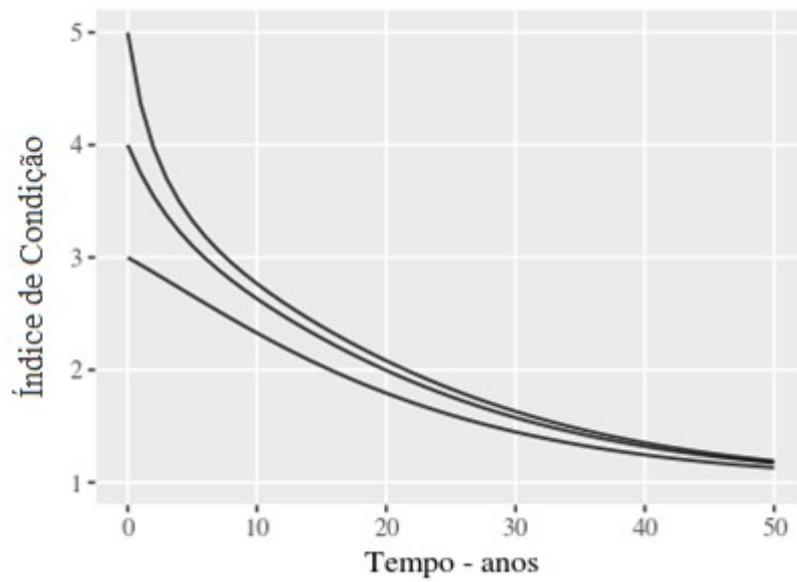
| IC | 3 | 4 | 5 |
|----|--------|--------|--------|
| 3 | 1 | 0 | 0 |
| 4 | 0,0571 | 0,9429 | 0 |
| 5 | 0 | 0,0469 | 0,9531 |

Figura 9.9 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-376/PR



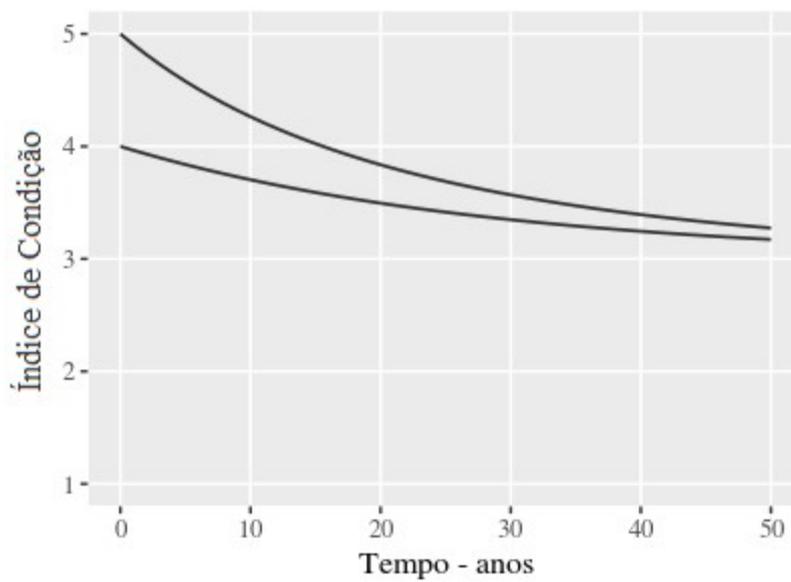
| IC | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|--------|--------|--------|--------|
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0,0364 | 0,9636 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0,0430 | 0,9570 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0,4906 | 0,5094 |

Figura 9.10 - Curvas de deterioração e MPT das Rodovia BR-116/PR/SC



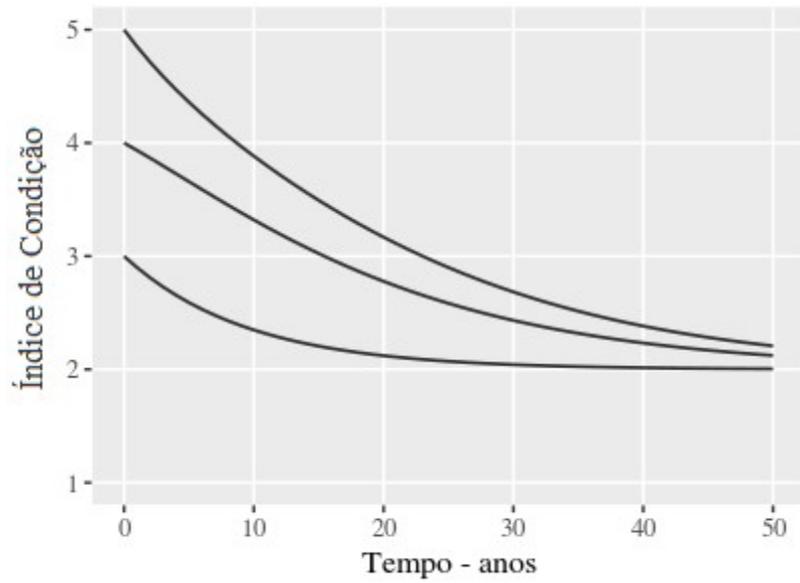
| IC | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0,0909 | 0,9091 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0,0659 | 0,9341 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0,2509 | 0,7491 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0,6316 | 0,3684 |

Figura 9.11 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-116/SP/PR



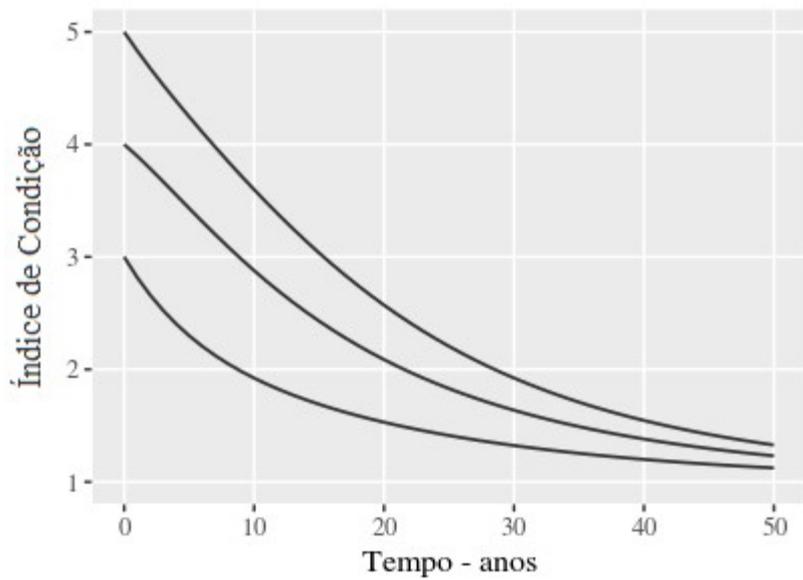
| IC | 3 | 4 | 5 |
|----|--------|--------|--------|
| 3 | 1 | 0 | 0 |
| 4 | 0,0345 | 0,9655 | 0 |
| 5 | 0 | 0,0949 | 0,9051 |

Figura 9.12 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-393/RJ



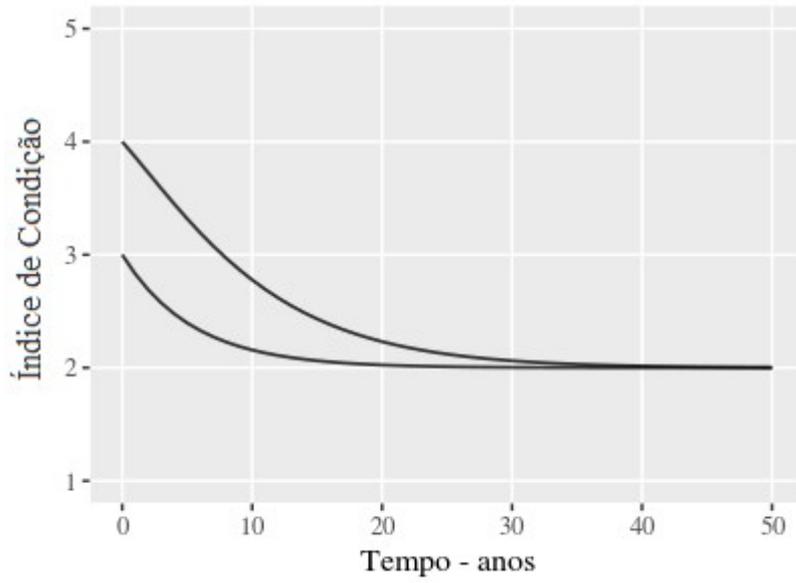
| IC | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|--------|--------|--------|--------|
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0,1000 | 0,9000 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0,0652 | 0,9348 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0,1489 | 0,8511 |

Figura 9.13 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-153/SP



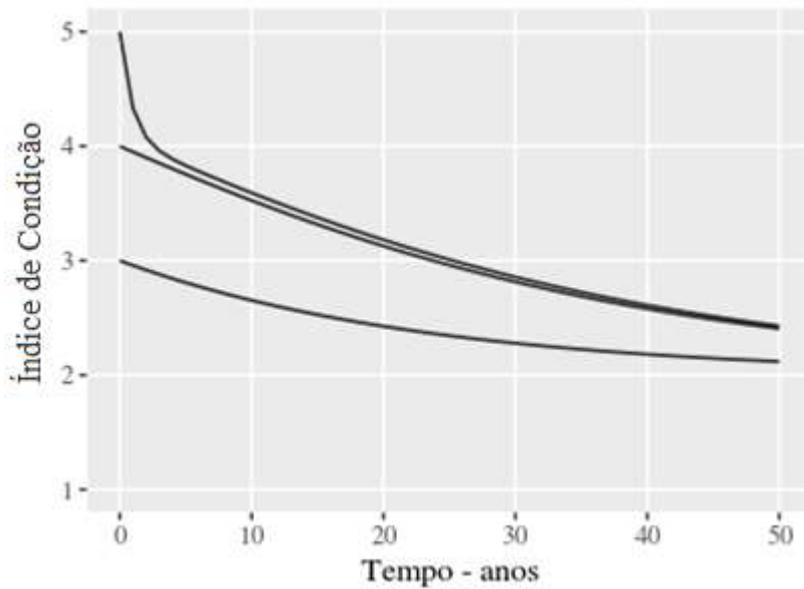
| IC | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0,0465 | 0,9535 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0,1818 | 0,8182 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0,1034 | 0,8966 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0,1667 | 0,8333 |

Figura 9.14 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-116/BA



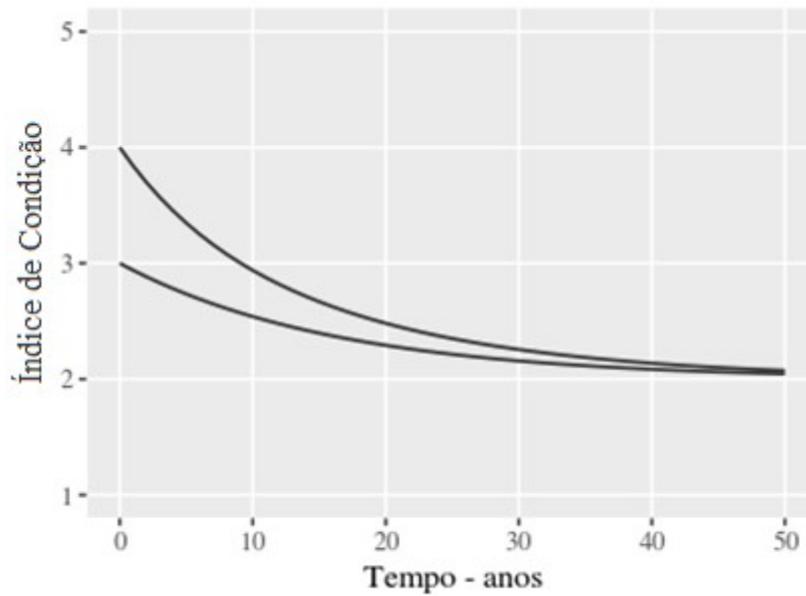
| IC | 2 | 3 | 4 |
|----|--------|--------|--------|
| 2 | 1 | 0 | 0 |
| 3 | 0,1688 | 0,8312 | 0 |
| 4 | 0 | 0,1348 | 0,8652 |

Figura 9.15 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-324/BA



| IC | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|--------|--------|--------|--------|
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0,0417 | 0,9583 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0,0500 | 0,9500 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0,6667 | 0,3333 |

Figura 9.16 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-116/RS



| IC | 2 | 3 | 4 |
|----|--------|--------|--------|
| 2 | 1 | 0 | 0 |
| 3 | 0,0597 | 0,9403 | 0 |
| 4 | 0 | 0,1579 | 0,8421 |

Figura 9.17 – Curvas de deterioração e MPT das pontes da Rodovia BR-392/RS

Comportamentos diversos são observados para cada trecho rodoviário após a plotagem das curvas de deterioração. Por exemplo, as pontes da rodovia BR-040/MG/RJ caem de IC 5 para 3 em 10 anos, enquanto as pontes da rodovia BR-101/SC caem de IC 5 para 3 em 50 anos. As inclinações das curvas demonstram as diferenças desse comportamento, bem como a abrangência de IC dessas curvas.

Em vários gráficos, a alta taxa de deterioração das pontes classificadas no melhor Índice de Condição diminui progressivamente com o decaimento do IC. Tal fato é verificado pela diferença significativa na inclinação da curva com início no IC=5 após os primeiros anos. As curvas considerando o IC de partida igual a 4 possuem taxas mais constantes ao longo dos anos.

Aplicando conceito proposta para a análise das diferentes taxas encontradas para o banco de dados das pontes em estudo usando as Eqs. 8.1 e 8.2, a Tab. 9.2 apresenta o tempo médio esperado, em anos, para as pontes dos trechos rodoviários da pesquisa passem de um estado ou IC=Y para o estado ou IC=Y-1, de acordo com as probabilidades estimadas na MPT de cada grupo. Os resultados da Tabela 9.2 foram utilizados na construção do gráfico da Fig. 9.18.

Tabela 9.2 – Tempo médio esperado para a transição entre IC das pontes da pesquisa

Transição do IC em anos

| Trecho Rodoviário | 5 → 4 | 4 → 3 | 3 → 2 |
|-------------------|-------|-------|-------|
| BR-040/MG/RJ | 1,9 | 4,6 | 30,7 |
| BR-116/RJ | 7,9 | 20,6 | 37,0 |
| BR-116/RS | 1,5 | 20,6 | 24 |
| BR-293/RS | - | - | - |
| BR-392/RS | - | 6,3 | 16,7 |
| BR-381/MG/SP | 2 | 15,4 | 102,0 |
| BR-101/RJ | 2,0 | 7,1 | 15,9 |
| BR-101/SC | 10,8 | 39,1 | 25,6 |
| BR-116/PR | 6,4 | 15,2 | - |
| BR-376/PR | 21,3 | 17,5 | - |
| BR-116/SP/RJ | 3,4 | 30,1 | 20,6 |
| BR-116/PR/SC | 2,0 | 23,3 | 27,5 |
| BR-116/PR/SP | 1,6 | 4,0 | 15,2 |
| BR-393/RJ | 10,5 | 29,0 | - |
| BR-153/SP | 6,7 | 15,3 | 10,0 |
| BR-116/BA | 6,0 | 9,7 | 5,5 |
| BR-324/BA | - | 7,4 | 5,9 |

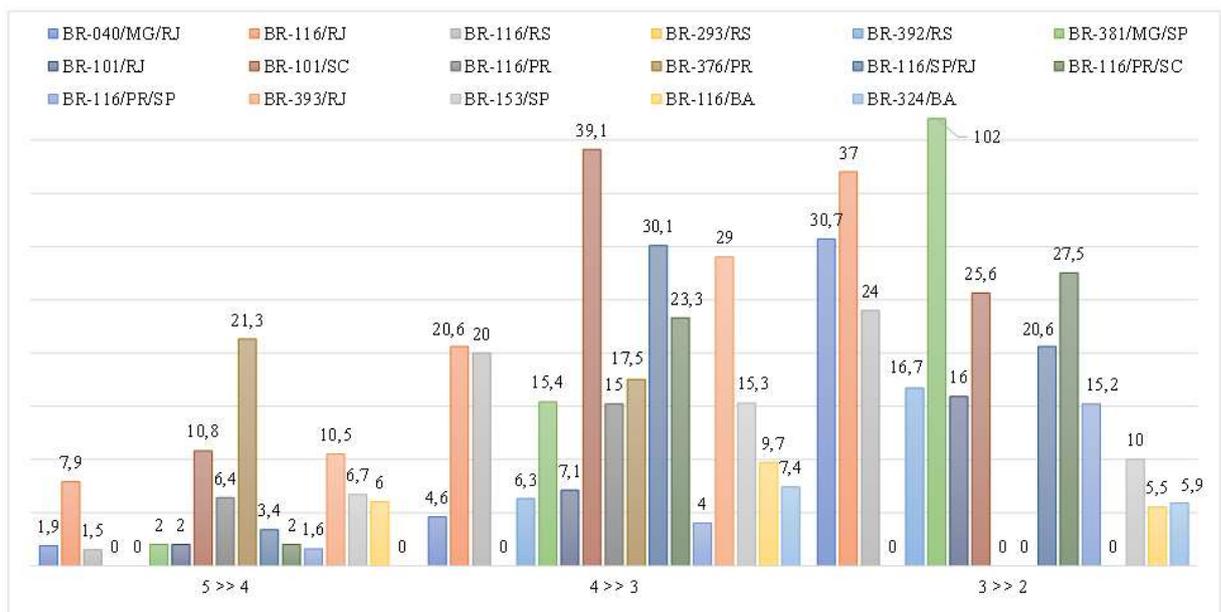


Figura 9.18 – Gráfico da estimativa do tempo gasto para as transições entre IC, em anos.

Os dados de transição de um IC para seu imediatamente inferior mostrados no gráfico da Fig. 9.18 evidenciam a tendência de a ponte deixar mais rapidamente a qualificação da sua melhor condição ou IC=5 para uma condição imediatamente inferior ou IC=4. As exceções a essa tendência são mostradas nas pontes dos trechos BR-101/SC e a BR-376/PR, ambas sob a mesma administração. Além desses trechos, as pontes dos trechos da BR-116/RJ e BR-393/RJ também apresentam valores mais elevados de tempo de permanência no IC=5. Para as pontes nas rodovias BR-040/MG, BR-381/MG, BR-116/PR/SC e BR-116/PR/SP sua melhor condição decaiu em apenas 2 anos, após o segundo ciclo de inspeção.

As transições do IC=4 para IC=3 e do IC=3 para o IC=2 registram, na maior parte dos grupos, maiores períodos para sua ocorrência. Exceção a esse comportamento na transição do IC=4 para o IC=3 é observada nas pontes dos trechos rodoviários das BR-040/MG/RJ, BR-101/RJ, BR-116/PR/SP e os dois trechos no estado da Bahia, BR-116/BA e BR-324/BA. Na transição do IC=3 para o IC=2 permanece menores tempos para sua ocorrência nos trechos baianos.

Além de observarem maior tempo de permanência no IC=5, as pontes dos trechos rodoviários no Paraná, BR-116 e BR-376, não possuem prazo estimado para a transição do IC=3 para IC=2. Tal fato é devido a existência de poucas pontes dos trechos estarem classificadas no IC=2, resultando em uma quantidade insuficiente de transições do IC=3 para o IC=2 para o cálculo da probabilidade de transições entre esses níveis. A pequena quantidade de pontes no IC=2 pode estar associada a algum critério de desempenho adotado pela empresa administradora, sendo a mesma gerenciadora em ambos os trechos.

9.2 Matrizes de Probabilidades de Transição por região das pontes

O mesmo procedimento pôde ser realizado para a obtenção das probabilidades de transição entre os IC para cada região da estrutura da ponte. Nesse caso, o número de transições de IC em cada região certamente apresentará um volume menor de dados, podendo, como foi observado para as pontes de alguns trechos, inviabilizar a montagem completa da MPT por região da estrutura. Foram construídas MPT para cada região com IC atribuído nas fichas de inspeção sendo: laje, vigamento principal, mesoestrutura, infraestrutura e pista/aceeso. A partir das MPT foram gerados os gráficos de curvas de deterioração ilustrados nas Figs. 9.19 a 9.34. As MPT calculadas por regiões da estrutura estão no Apêndice B dessa tese.

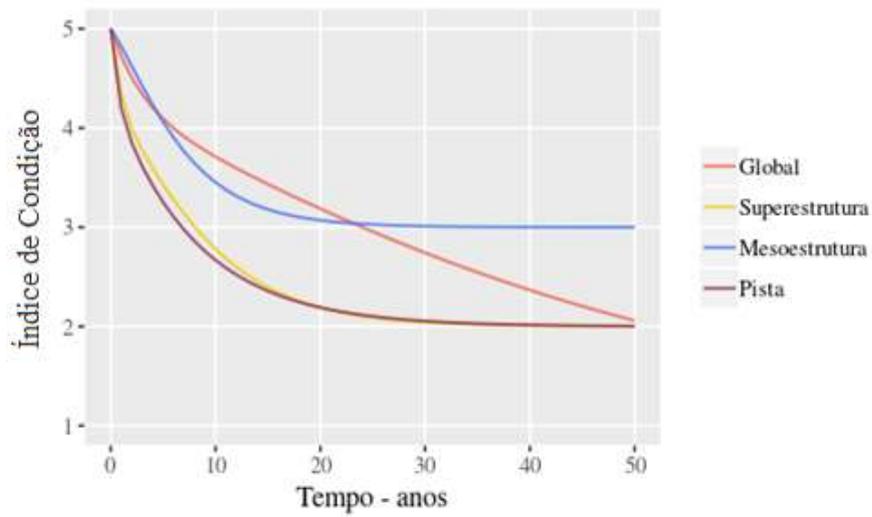


Figura 9.19 – Curvas de deterioração das partes das pontes da BR-116/SP/RJ

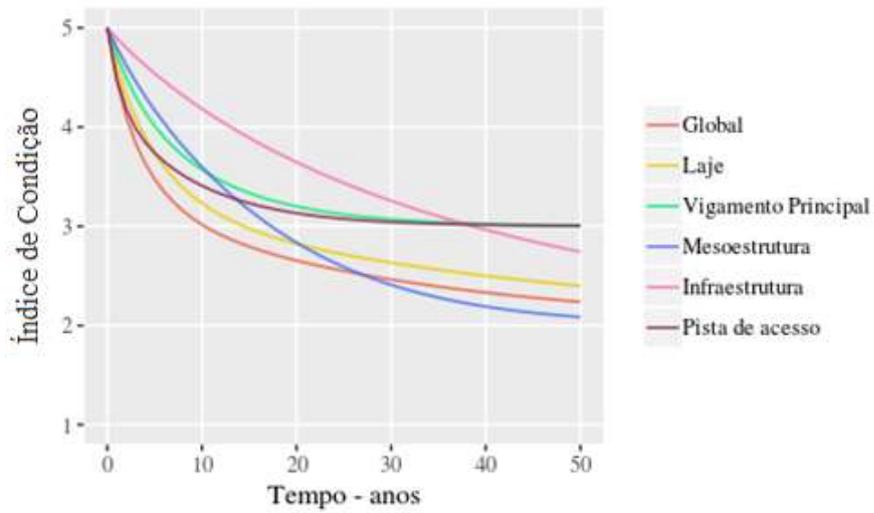


Figura 9.20 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-040/MG/RJ

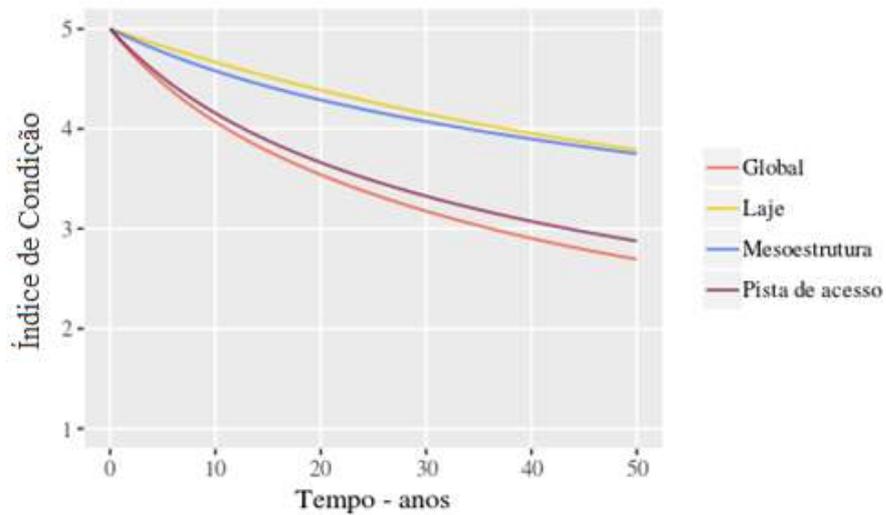


Figura 9.21 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-116/RJ

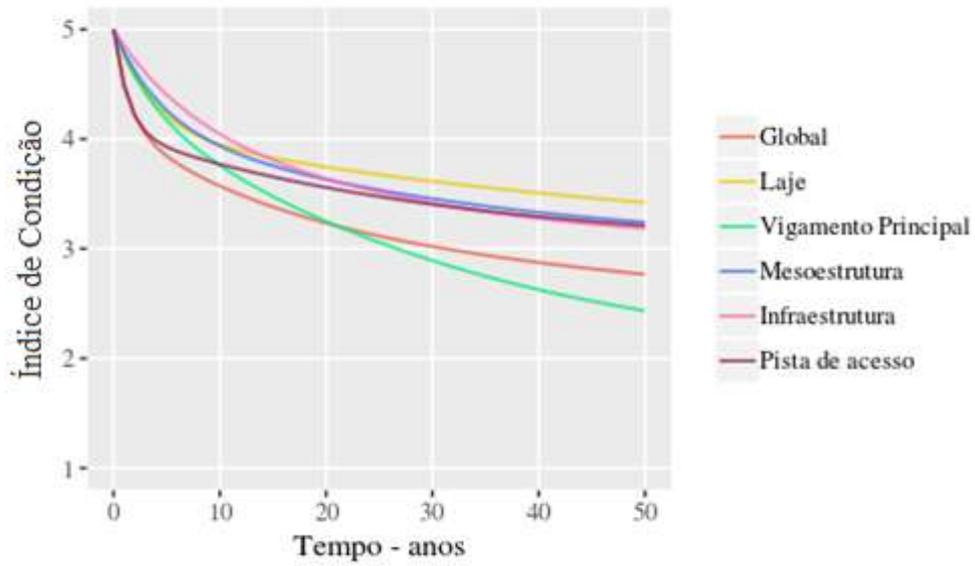


Figura 9.22 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-381/MG

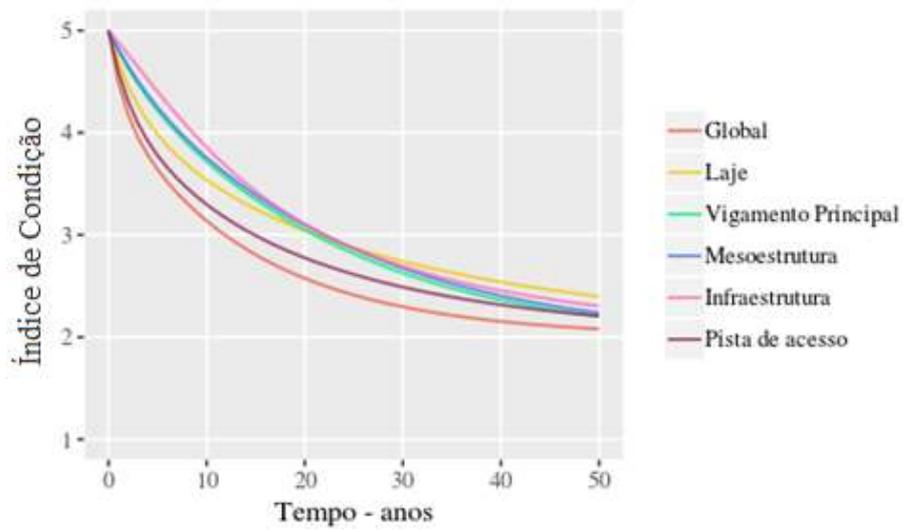


Figura 9.23 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-101/RJ

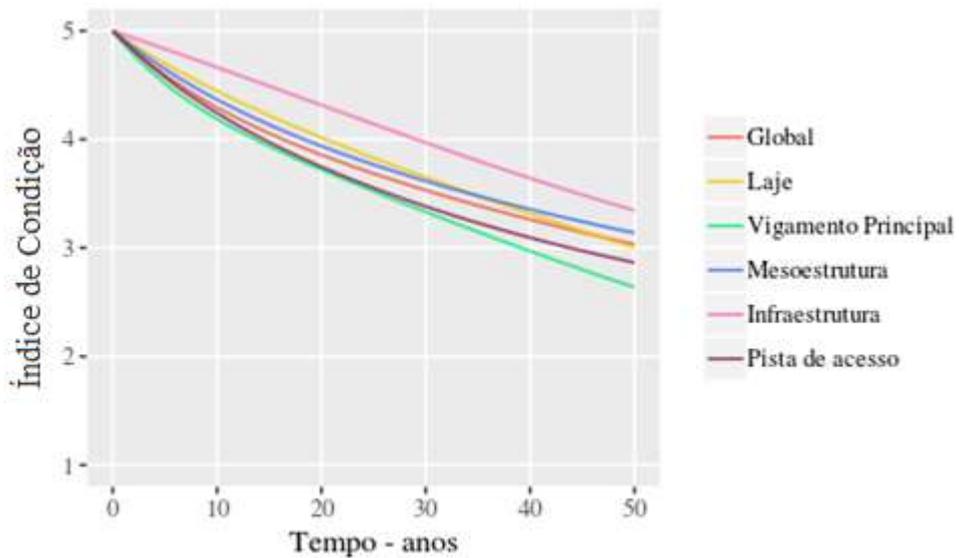


Figura 9.24 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-101/SC

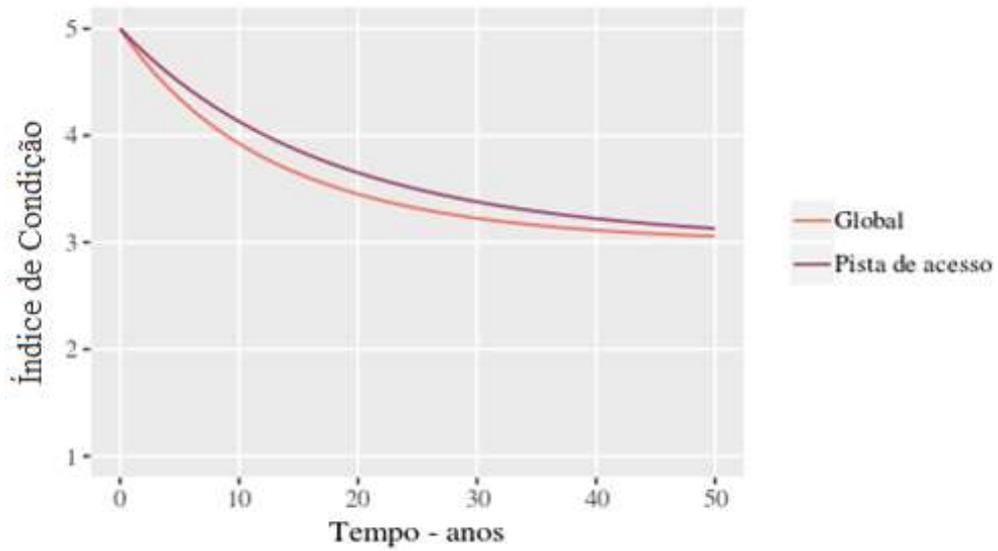


Figura 9.25 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-116/PR

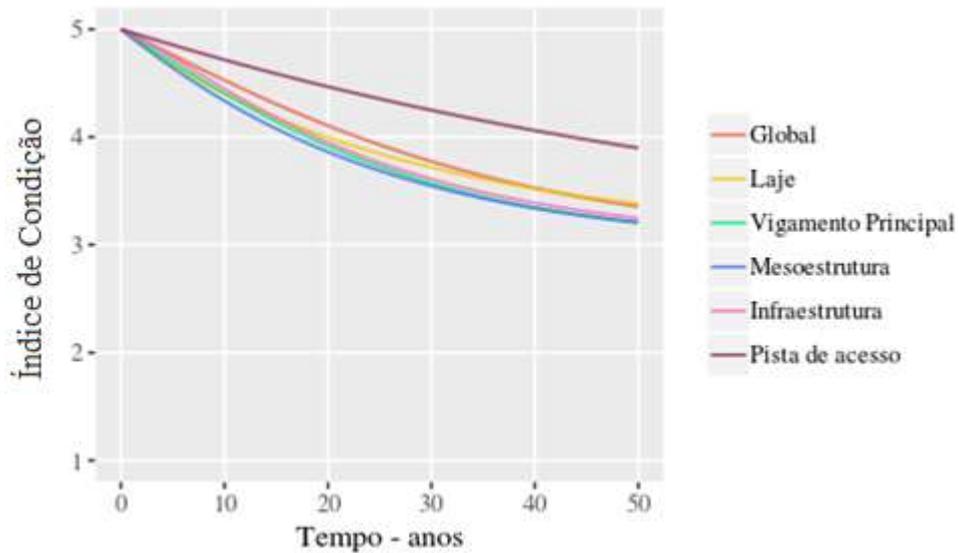


Figura 9.26 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-376/PR

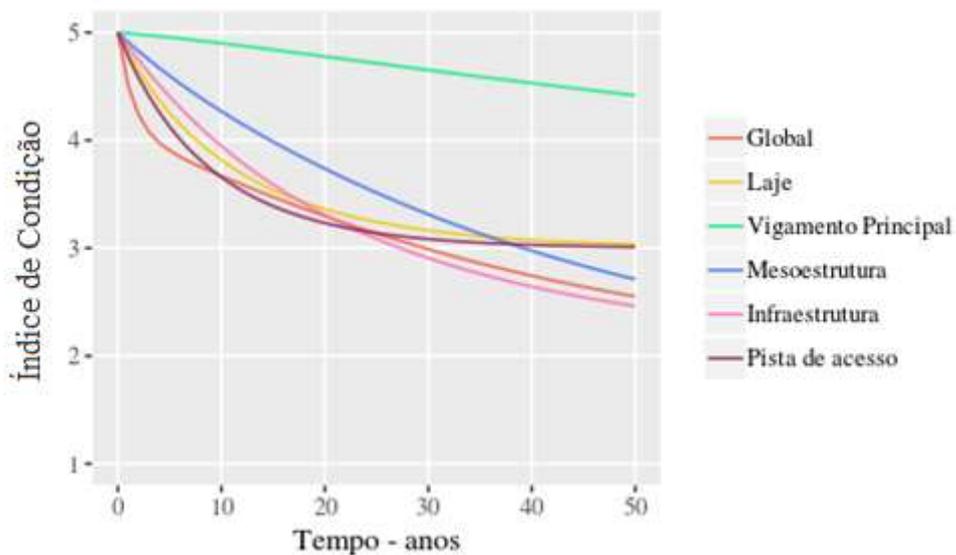


Figura 9.27 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-116/PR/SC

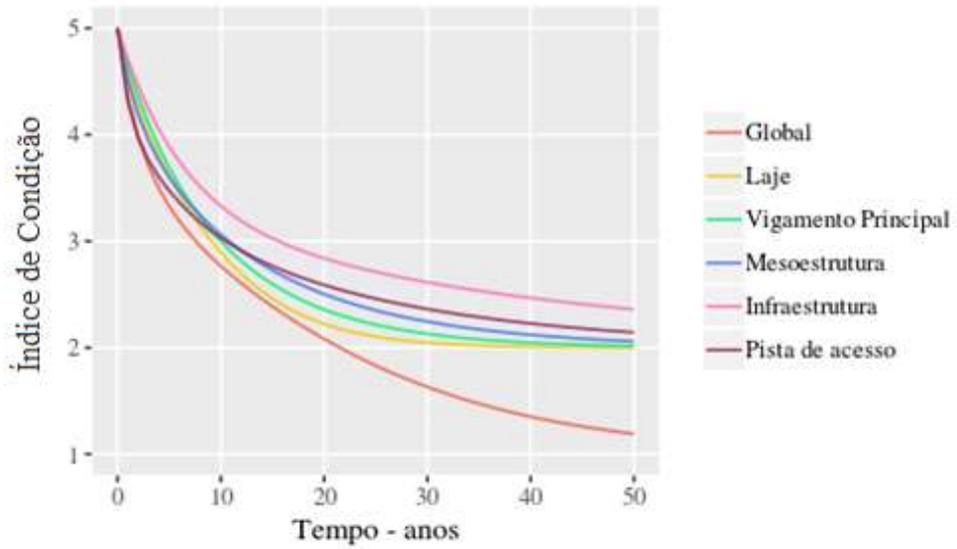


Figura 9.28 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-116/PR/SP

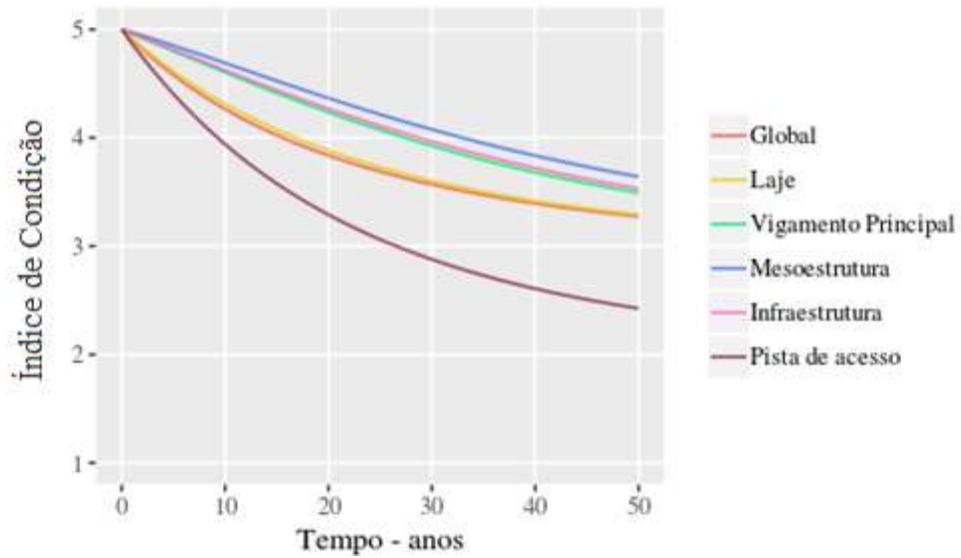


Figura 9.29 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-393/RJ

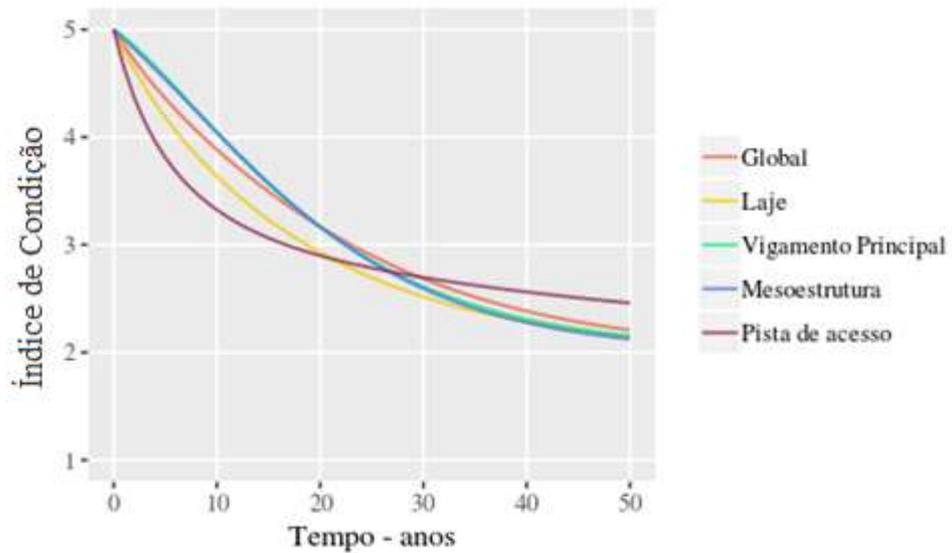


Figura 9.30 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-153/SP

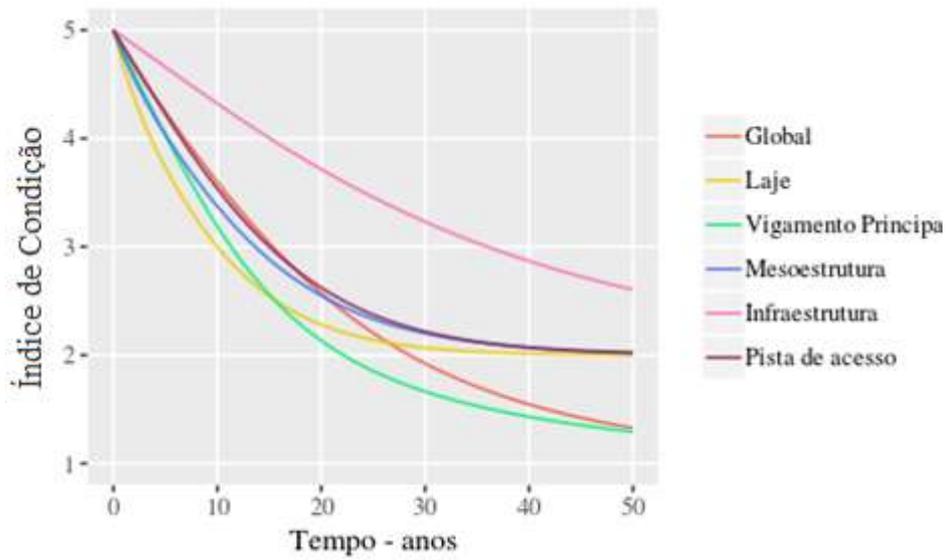


Figura 9.31 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-116/BA

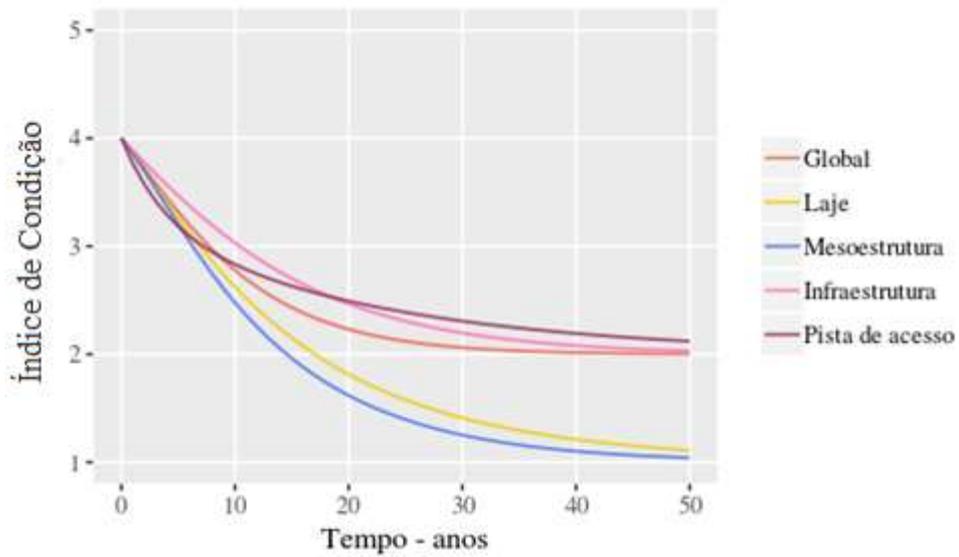


Figura 9.32 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-324/BA

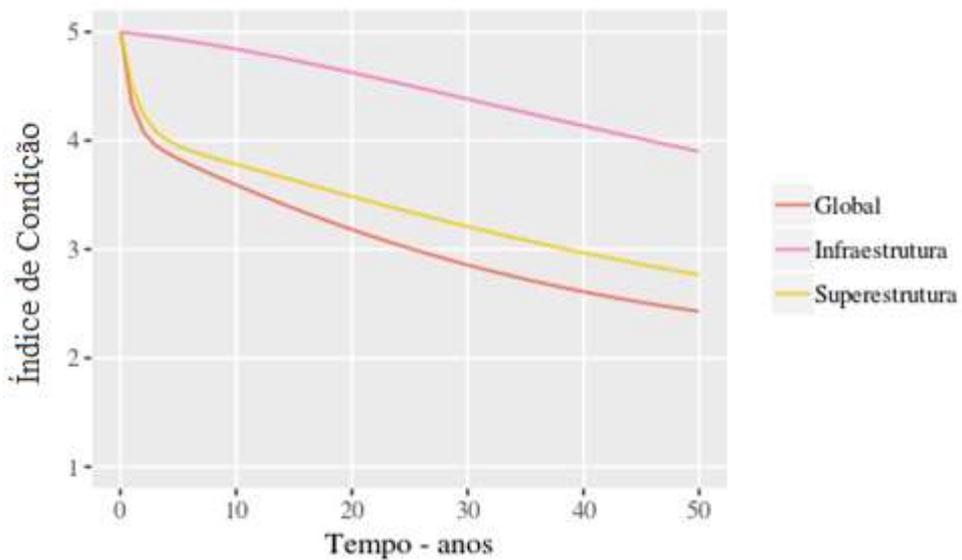


Figura 9.33 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-116/RS

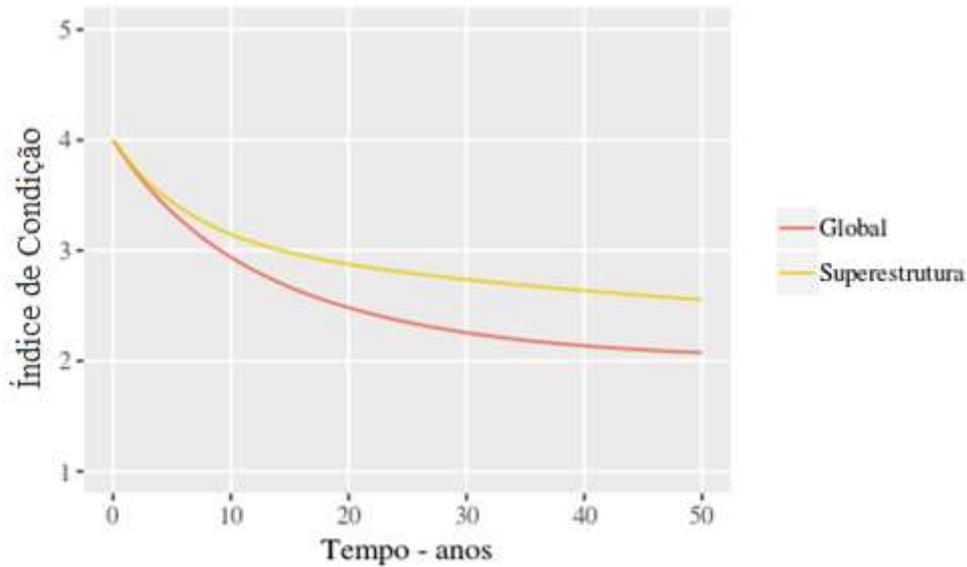


Figura 9.34 – Curvas de deterioração por partes das pontes da BR-392/RS

Para a análise dessas curvas por partes, é importante salientar que a curva tenderá a tangenciar o valor do IC mínimo existente nas MPT. Um exemplo ocorre nas pontes da Rodovia BR-040/MG/SP, nas partes de vigamento principal e pista de acesso: apesar das maiores taxas de deterioração observadas nos dez primeiros anos, a partir desse período as curvas tangenciam o IC=3, podendo gerar a falsa interpretação que seu comportamento não continuará sob a mesma taxa até alcançar o IC=2. No entanto, verdadeiramente, o que ocorre é que faltam dados das transições do IC=3 para o IC=2 suficientes o cálculo da probabilidade dessa ocorrência, e para que a curva possa ser plotada abrangendo todos os IC.

Tal fato é destacado na construção da Tab. 9.3 que mostra o tempo médio calculado, em anos, de uma parte ou região das pontes dos trechos rodoviários da pesquisa passarem de um nível Y para Y-1, usando a Eqs. 8.1 e 8.2. Ressalte-se que as transições para análise das taxas de deterioração por partes possuem maiores dificuldades de serem determinadas devido ao pequeno número dessas transições existentes, não sendo em número suficiente para a construção da MPT.

A partir da análise das fichas de inspeção, verificou-se que a empresa administradora dos trechos rodoviários das BR-116/RS e BR-293/392/PR considerou todas as anomalias visualizadas nas regiões Pista/Acesso, Vigamento Principal e Laje em uma só análise, atribuindo apenas um IC para o conjunto e denominando o conjunto de regiões de “Superestrutura”. O resultado do tempo médio de transição de um estado Y para Y-1 de acordo

com as MPT calculadas é mostrado na Tab. 9.4.

Tabela 9.3 – Período em anos para a transição entre IC para as diferentes regiões das pontes.

| Pontes | IC | Tempo em anos / Região da Ponte | | | | |
|--------------|-------|---------------------------------|---------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| | | Laje | Vigamento principal | Meso-estrutura | Infra-estrutura | Pista de acesso |
| BR-040/MG | 5 → 4 | 2,7 | 3,6 | 5,0 | 9,5 | 1,9 |
| | 4 → 3 | 6,0 | 10,3 | 10,1 | 39,1 | 9,4 |
| | 3 → 2 | 45,0 | - | 11,5 | 2 | - |
| BR-116/RJ | 5 → 4 | 27,9 | 29,8 | 19,8 | 21,6 | 9,0 |
| | 4 → 3 | 51,5 | - | 144,9 | - | 23,4 |
| | 3 → 2 | - | - | 13,0 | - | 54,6 |
| BR-381/MG/SP | 5 → 4 | 4,1 | 4,4 | 4,8 | 6,8 | 1,9 |
| | 4 → 3 | 53,5 | 17,9 | 32,2 | 25,6 | 31,5 |
| | 3 → 2 | - | 24,5 | - | - | - |
| BR-101/RJ | 5 → 4 | 3,3 | 5,1 | 5,4 | 8,7 | 2,5 |
| | 4 → 3 | 11,6 | 12,9 | 13,2 | 6,4 | 8,1 |
| | 3 → 2 | 35,5 | 15,8 | 17,2 | 27,5 | 24,3 |
| BR-101/SC | 5 → 4 | 15,5 | 8,7 | 12,9 | 30,1 | 10,5 |
| | 4 → 3 | 35,8 | 41,3 | 35,3 | 28,4 | 25,6 |
| | 3 → 2 | 37,0 | 14,0 | 45,0 | 17,0 | 36,5 |
| BR-116/PR | 5 → 4 | 11,3 | 18,9 | 11,4 | 6,3 | 8,8 |
| | 4 → 3 | - | - | - | - | 19,4 |
| | 3 → 2 | - | - | - | - | - |
| BR-376/PR | 5 → 4 | 14,0 | 16,6 | 13,3 | 22,5 | 33,4 |
| | 4 → 3 | 33,0 | 14,4 | 20,0 | 6,3 | 54,9 |
| | 3 → 2 | - | - | - | - | - |
| BR-116/SP/RJ | 5 → 4 | - | - | 5,7 | - | 1,3 |
| | 4 → 3 | - | - | 3,3 | - | 4,2 |
| | 3 → 2 | - | - | - | - | 8,5 |
| BR-116/PR/SC | 5 → 4 | 5,4 | 128,2 | 11,4 | 7,6 | 4,5 |
| | 4 → 3 | 13,4 | 11,4 | 25,3 | 12,4 | 10,4 |
| | 3 → 2 | - | - | 18,0 | 33,0 | - |
| BR116/SP/PR | 5 → 4 | 2,3 | 2,9 | 2,1 | 3,4 | 1,4 |
| | 4 → 3 | 6,4 | 5,1 | 6,2 | 6,4 | 5,6 |
| | 3 → 2 | 5,2 | 10,4 | 14,7 | 39,0 | 22,2 |
| BR-393/RJ | 5 → 4 | 11,7 | 25,6 | 35,7 | 27,1 | 7,6 |
| | 4 → 3 | 28,7 | 20,7 | 15,5 | 21,0 | 12,2 |
| | 3 → 2 | - | - | - | - | 30,0 |

Continuação da Tabela 9.3

| Pontes | IC | Tempo em anos / Região da Ponte | | | | |
|-----------|-------|---------------------------------|---------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| | | Laje | Vigamento principal | Meso-estrutura | Infra-estrutura | Pista de acesso |
| BR-153/MG | 5 → 4 | 5,1 | 13,9 | 11,3 | 23,8 | 2,8 |
| | 4 → 3 | 10,2 | 4,7 | 9,0 | - | 7,2 |
| | 3 → 2 | 16,0 | 9,0 | 6,7 | - | 51,0 |
| BR-116/BA | 5 → 4 | 2,9 | 4,8 | 4,1 | 14,8 | 6,3 |
| | 4 → 3 | 6,1 | 6,1 | 10,1 | 13,0 | 6,5 |
| | 3 → 2 | 6,4 | 4,3 | 4,3 | 26,0 | 7,9 |
| BR-324/BA | 5 → 4 | 2,8 | 6,6 | 2,6 | 29,5 | 1,7 |
| | 4 → 3 | 6,8 | 13,7 | 7,1 | 9,0 | 4,3 |
| | 3 → 2 | 5,9 | - | 3,9 | 10,3 | 22,0 |

Tabela 9.4 – Período em anos para a transição entre IC para as diferentes regiões das pontes dos trechos rodoviários BR-116/RS, BR-293/RS, BR-392/PR.

| Pontes | IC | Tempo em anos / Região da Ponte | | |
|-----------|-------|---------------------------------|----------------|----------------|
| | | Mesoestrutura | Superestrutura | Infraestrutura |
| BR-116/RS | 5 → 4 | 5,2 | 78,1 | 2,0 |
| | 4 → 3 | - | 15,0 | 40,0 |
| | 3 → 2 | 57,1 | 11,0 | 16,5 |
| BR-293/PR | 5 → 4 | 5,0 | 14,3 | - |
| | 4 → 3 | - | 9,0 | - |
| | 3 → 2 | - | - | - |
| BR-392/PR | 5 → 4 | 16,5 | 11,0 | - |
| | 4 → 3 | - | 8,2 | 6,9 |
| | 3 → 2 | 10,0 | - | 73,0 |

Ao verificar o prazo médio previsto para a mudança de um nível para o outro por região das pontes nas Tabs. 9.3 e 9.4, destaca-se o tempo bastante curto da alteração do estado do IC=5 para o IC=4 para a maior parte dos grupos de pontes. Em grande parte dos trechos, os períodos de transição entre estados mais curtos estão associados à região de pista/ acesso da ponte, conforme destacado dos dados, sabidamente região com tendência a ter maiores taxas de deterioração por estar diretamente sujeita aos impactos dos veículos. Alguns modelos preditivos do estado específicos desses elementos de lajes e elementos próximos ao impacto de veículos (*bridge deck*) são desenvolvidos e investigados mais detalhadamente, tendo em vista à maior

necessidade de intervenções nessas estruturas (PESEK *et al.*, 2017). Alguns estudos abordam especificamente o desgaste do pavimento asfáltico em pontes, tendo como exemplo pesquisa desenvolvida nas pontes da Flórida, nos Estados Unidos (*Florida Department of Transportation*, 2018).

Os dados apontam a significativa diferença nos tempos de deterioração entre as partes, situação que sugere uma investigação cada vez mais pormenorizada desse processo para cada elemento constituinte das pontes.

9.3 Cálculo do desvio das previsões dos modelos

Para a verificação da acurácia dos modelos elaborados, conforme descrito na metodologia da pesquisa no capítulo 8, foram calculadas novas MPT para as pontes desconsiderando os dados do último ano de inspeção e calculando os desvios de cada modelo encontrado. Os resultados das equações 8.3 e 8.4 para cada trecho rodoviário da pesquisa são mostrados na Tab. 9.5. Foram também retiradas as pontes que sofreram melhoria durante o período de 2015 a 2016, pois essa situação não seria sensível à MPT construída, trazendo dados que não seriam possíveis de previsão pela MPT. É importante também considerar que as probabilidades de transição calculadas retirando os dados do último ciclo possuem valores menores de Desvio daquelas resultantes dessa pesquisa, devido à existência de significativo volume de dados em um ciclo de inspeção retirado, comparando ao curto período de registros de ciclos de inspeções dessas pontes.

Tabela 9.5 – Resultados das previsões de número de pontes por IC e do cálculo da variância da previsão da deterioração para as pontes de estudo.

| Trecho Rodoviário | Ano | Número de pontes por IC | | | | |
|-----------------------------|---------------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| BR-040/MG/RJ (65 pontes) | Dados 2015 | x | 1 | 10 | 41 | 13 |
| | Dados 2016 | x | 1 | 13 | 50 | 1 |
| | Previsão 2016 | x | 1 | 19 | 39 | 6 |
| | (Variância) | x | (0,56) | (2,71) | (3,20) | (1,80) |
| BR-116/ RJ (61 pontes) | Dados 2015 | x | 0 | 6 | 45 | 10 |
| | Dados 2016 | x | 0 | 6 | 46 | 9 |
| | Previsão 2016 | x | 0 | 10 | 43 | 8 |
| | (Variância) | x | (0,60) | (2,04) | (2,37) | (1,34) |

| <i>Trecho Rodoviário</i> | <i>Ano</i> | <i>Número de pontes por IC</i> | | | | |
|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------|--------------|---------------|---------------|
| | | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> |
| BR-381/MG/SP (279 pontes) | Dados 2014 | x | 0 | 29 | 237 | 13 |
| | Dados 2015 | x | 1 | 38 | 232 | 8 |
| | Previsão 2015 (Variância) | x | 0 (0,53) | 44 (3,83) | 228 (4,20) | 7 (1,80) |
| BR-101/RJ (89 pontes) | Dados 2014 | x | 7 | 40 | 38 | 4 |
| | Dados 2015 | x | 12 | 37 | 36 | 4 |
| | Previsão 2015 (Variância) | x | 9 (1,53) | 43 (2,64) | 35 (2,37) | 2 (1) |
| BR-101/SC (225 pontes) | Dados 2015 | x | 1 | 9 | 90 | 125 |
| | Dados 2016 | x | 1 | 10 | 98 | 116 |
| | Previsão 2016 (Variância) | x | 1 (0,58) | 11 (1,61) | 99 (3,57) | 114 (3,24) |
| BR-116/PR (37 pontes) | Dados 2015 | x | x | 0 | 16 | 21 |
| | Dados 2016 | x | x | 0 | 18 | 19 |
| | Previsão 2016 (Variância) | x | x | 1 (0,99) | 18 (1,94) | 18 (1,66) |
| BR-376/PR (26 pontes) | Dados 2015 | x | x | 1 | 3 | 22 |
| | Dados 2016 | x | x | 1 | 5 | 20 |
| | Previsão 2016 (Variância) | x | x | 1 (0,40) | 4 (1,07) | 21 (0,99) |
| BR-116/SP/RJ (144 pontes) | Dados 2014 | 1 | 5 | 38 | 92 | 8 |
| | Dados 2016 | 1 | 6 | 38 | 91 | 8 |
| | Previsão 2016 (Variância) | 1 (0,61) | 8 (1,92) | 41 (3,00) | 91 (2,77) | 3 (1,39) |
| BR-116/PR/SC (38 pontes) | Dados 2015 | x | 0 | 1 | 31 | 6 |
| | Dados 2016 | x | 0 | 1 | 33 | 4 |
| | Previsão 2016 (Variância) | x | 0 (0,19) | 2 (1,14) | 33 (1,67) | 3 (1,22) |
| BR-116/PR/SP (138 pontes) | Dados 2015 | 0 | 2 | 38 | 87 | 11 |
| | Dados 2016 | 1 | 1 | 48 | 84 | 4 |
| | Previsão 2016 (Variância) | 0 (0,41) | 4 (1,58) | 58 (4,32) | 72 (4,35) | 4 (1,60) |
| BR-393/RJ (41 pontes) | Dados 2015 | x | x | 1 | 5 | 35 |
| | Dados 2016 | x | x | 4 | 6 | 31 |
| | Previsão 2016 (Variância) | x | x | 1 (0,41) | 8 (1,78) | 32 (1,73) |

| <i>Trecho Rodoviário</i> | <i>Ano</i> | <i>Número de pontes por IC</i> | | | | |
|--------------------------|------------------------------|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| | | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> |
| BR-153/SP (29 pontes) | Dados 2015 | x | 0 | 3 | 9 | 17 |
| | Dados 2016 | x | 0 | 3 | 11 | 15 |
| | Previsão 2016 (Variância) | x | (0,52) | (0,90) | (1,64) | (1,47) |
| BR-116/BA (23 pontes) | Dados 2015 | 0 | 0 | 3 | 14 | 6 |
| | Dados 2016 | 0 | 0 | 5 | 13 | 5 |
| | Previsão 2016 (Variância) | (0,37) | (0,67) | (1,32) | (1,46) | (0,91) |
| BR-324/BA (28 pontes) | Dados 2015 | x | 3 | 11 | 14 | x |
| | Dados 2016 | x | 4 | 13 | 11 | x |
| | Previsão 2016 (Variância) | x | (1,24) | (1,78) | (1,28) | x |
| BR-116/RS (24 pontes) | Dados 2015 | x | 6 | 13 | 5 | 0 |
| | Dados 2016 | x | 6 | 13 | 5 | 0 |
| | Previsão 2016 (Variância) | x | (0,72) | (0,87) | (0,49) | (0,00) |
| BR-392/RS (27 pontes) | Dados 2015 | x | 6 | 13 | 8 | x |
| | Dados 2016 | x | 6 | 14 | 7 | x |
| | Previsão 2016 (Variância) | x | (0,85) | (1,34) | (1,03) | x |

Para a melhor interpretação dos dados da Tabela 9.5 é importante compreender a sistemática de cálculo envolvida. Para os cinco níveis existentes na escala de IC, é necessário estimar as seguintes probabilidades: $5 \rightarrow 5$, $5 \rightarrow 4$, $4 \rightarrow 4$, $4 \rightarrow 3$, $3 \rightarrow 3$, $3 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 2$ e $2 \rightarrow 1$, resultando 8 probabilidades no total. Assim, a acurácia do modelo, nesse caso representado pela MPT, depende da existência de dados em cada uma dessas transições. Dessa forma, é possível um banco de dados de um grupo com número de pontes significativo possuir poucos dados de transição que conduzirão a estimativas incorretas. Da mesma forma, o histórico de 6 ciclos de inspeções pode conter grupos com dados mais representativos do processo deteriorativo nesse período, levando a melhores estimativas. Outro exemplo prático para a compreensão do processo seria supor um conjunto de pontes com 100 transições registradas, mas, no entanto, com 80 dados de permanência no IC=4, situação bastante comum. Nesse exemplo, teríamos apenas 20 dados de transições para estimar todas as demais transições entre IC (outras 8) desse grupo de pontes.

A partir dessa premissa, o método encontrado de mensuração da acurácia do modelo se baseia em verificar se o resultado do número de pontes em determinado IC está contido no intervalo do resultado da média prevista considerando a variância calculada. Assim, por exemplo, um grupo de pontes com previsão de 25 estruturas no IC=4, com variância igual a 2,68, poderia ser considerado com boa aproximação se o resultado real resultasse na quantidade de 22 a 28 pontes classificadas nesse IC. Estando o resultado real fora do intervalo de variância calculado, o modelo não teria sido capaz de representar o comportamento daquele grupo de pontes de maneira satisfatória. As causas para que o modelo não descreva satisfatoriamente uma tendência do conjunto de deterioração podem ser estatísticas ou mesmo técnicas, nesse último caso atribuídas podendo ser atribuídas a inconsistências existentes na implementação da metodologia de inspeção utilizadas.

Os resultados da BR-040/MG/RJ possuem estimativas que demonstram a necessidade de mais dados de transições desse conjunto de pontes para que o modelo descreva melhor o comportamento de deterioração dessas estruturas. Como possível causa desse resultado, pode-se supor a provável subjetividade ou mudança de critérios de inspeção ao longo do período avaliativo nesse trecho rodoviário. Como exemplo, nos dados de inspeção de pontes desse trecho verifica-se que 12 das 13 pontes classificadas no IC=5 em 2015 transitaram para o IC=4 em 2016. Isso resulta em 92% das pontes transitando do IC=5 para o IC=4. Assim, a sensibilidade de uma MPT para prever um resultado atípico como esse estaria bastante comprometida.

Bons resultados foram verificados para os trechos rodoviários da BR-101/SC, BR-116/PR, BR-376/PR, BR-116/SP/RJ, BR-116/P/SC, BR-153/SP, BR-116/BA, BR-324/BA, BR-116/RS e BR-392/RS. Existe maior variação acima da variância esperada nos resultados das BR-116/RJ, BR-381/MG/SP, BR-116/PR/SP e BR-393/RJ. Especificamente no caso da BR-116/PR/SP, as estimativas encontradas possivelmente sofreram influência do pequeno número de transições possíveis de serem aproveitadas para a construção da MPT, devido, principalmente, ao intervalo realizados de inspeções divergir dos critérios adotados na pesquisa.

9.4 Avaliação das taxas de deterioração de acordo com a região climática

A pesquisa procurou comparar as diferentes taxas de deterioração encontradas entre os grupos de pontes de estudo de acordo com alguns fatores que possuem influência direta sobre a velocidade de degradação das estruturas de pontes. Conforme citado anteriormente, a idade das estruturas, classe e trem-tipo não foram incluídas nas fichas cadastrais da maioria dos grupos de pontes estudados, inviabilizando a verificação da sua influência.

Para a avaliação se as diferentes taxas encontradas estavam relacionadas de alguma forma ao clima no qual os trechos rodoviários estão inseridos a pesquisa referenciou geograficamente os trechos rodoviários sobre as bases cartográficas das rodovias federais brasileiras e sobre a planta climatográfica *Nimer*. A base *Nimer* foi adotada devido ao seu maior detalhamento específico dos microclimas brasileiros, apesar do estudo ter também realizado o georreferenciamento na base *Köper*, incluída no Apêndice C. A Fig. 9.35 mostra que os trechos rodoviários estão inseridos em regiões brasileiras com características climáticas bastante distintas.

As taxas de deterioração das pontes de cada trecho rodoviário variam de acordo com o IC de início e, ao longo do tempo, podem variar consideravelmente sua magnitude. Assim, a avaliação de uma única transição entre IC e não o comportamento desse processo através das outras transições possíveis pode levar a erros de comparação entre as taxas de grupos distintos. Por exemplo, supondo que em média, um grupo de pontes GP1 transite do IC=5 para o IC=4 em 2 anos, do IC=4 para o IC=3 em 22 anos e do IC=3 para o IC=2 em 30 anos. Outro grupo de pontes G2 que se deseja comparar com o primeiro possui média de 6 anos do IC=5 para o IC=4, 8 anos do IC=4 para o IC=3 e 24 anos do IC=3 para o IC=2. A comparação de quaisquer uma das transições de forma isolada, poderia conduzir a avaliações incorretas, tendo em vista, por exemplo, que apesar das pontes do grupo G1 possuírem a média de 2 anos para a transição do IC=5 para o IC=4, estas permanecem muito mais tempo nesta última classificação, durante 22 anos, comparada a permanência de 8 anos no IC=3 para as pontes do GP2.

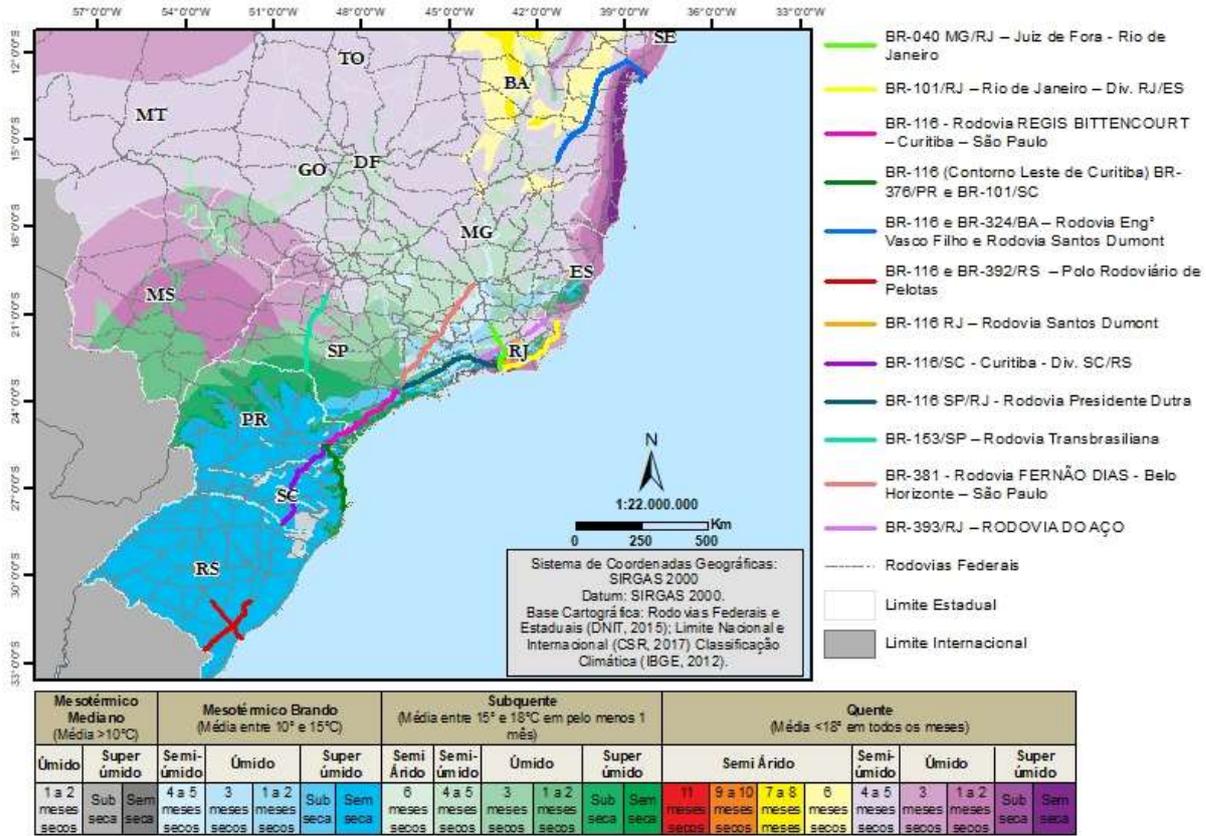


Figura 9.35 – Localização dos trechos rodoviários de estudo sobre base climática *Nimer*.

Para possibilitar a comparação das taxas de deterioração encontradas com as classificações climáticas dos grupos de pontes, foram determinados os tempos médios totais de transição do máximo IC para o mínimo IC de cada grupo e listados na Tabela 9.5 os dados climáticos encontrados no georreferenciamento das rodovias verificados na Fig. 9.35. Para a análise foram separados os grupos de pontes de acordo com a existência das previsões de transição entre estados, ou seja, no caso das rodovias BR-324/BA e BR-392/RS foi calculado o tempo total de transição do IC=4 para o IC=2, tendo em vista não existir dados suficientes para a determinação da probabilidade de uma ponte desse grupo passar do IC=5 para o IC=4. De forma similar, os trechos rodoviários da BR-116/PR, BR-376/PR e BR-393/RJ foram comparados apenas entre si pela ausência de probabilidades de transição do IC=3 para o IC=2 nesses grupos de pontes.

A partir dos dados da Tab. 9.6 é possível verificar as taxas elevadas de deterioração das pontes do estado baiano em comparação às demais taxas, estando essas pontes localizadas em clima bastante distinto das demais pertencentes à pesquisa: clima semiárido, com altas temperaturas e bastante seco. Ao observar os demais trechos rodoviários com taxas inferiores de deterioração das pontes, mas classificados também como clima quente (temperaturas médias anuais acima de 18°C) destaca-se a mudança das características da umidade das regiões.

No conjunto de trechos rodoviários com dados de transição das pontes do IC=5 para o IC=2, as menores taxas de deterioração estão majoritariamente associadas aos climas mesotérmico brando, com baixas temperaturas e bastante úmido. A princípio divergentes à essa tendência de análise, as pontes dos trechos rodoviários da BR-116/RJ e BR-381/MG/SP classificadas em clima quente e *subquente*, respectivamente, possuem baixas taxas de deterioração. No caso das pontes da BR-116/RJ, apesar das altas temperaturas, o trecho litorâneo proporciona um clima bastante úmido.

Tabela 9.6 – Tempo total de transição entre IC máximo e mínimo e classificação dos trechos rodoviários da pesquisa de acordo com a base climática *Nimer*.

| | Trecho Rodoviário | Tempo total de transição em anos | | | Clima | | |
|---|-------------------|----------------------------------|------|------|----------------------|-------------|-----------------|
| | | 5→2 | 4→2 | 5→3 | Classificação | Temperatura | |
| + | BR-324/BA | | 13,3 | | Quente | Semi-árido | >18°C |
| | BR-392/RS | | 23 | | Mesotérmico brando | Super-úmido | Entre 10 e 15°C |
| + | BR-116/PR/SP | 20,8 | | | Subquente | Úmido | Entre 15 e 18°C |
| | BR-116/BA | 21,2 | | | Quente | Semi-árido | >18°C |
| | BR-101/RJ | 25 | | | Quente | Úmido | >18°C |
| | BR-153/SP | 32 | | | Subquente/ Quente | Úmido | Entre 15 e 18°C |
| | BR-040/MG/RJ | 37,2 | | | Subquente | Semi-úmido | Entre 15 e 18°C |
| | BR-116/RS | 45,5 | | | Mesotérmico brando | Super-úmido | Entre 10 e 15°C |
| | BR-116/PR/SC | 52,8 | | | Mesotérmico brando | Super-úmido | Entre 10 e 15°C |
| | BR-116/SP/RJ | 54,1 | | | Subquente | Super-úmido | Entre 15 e 18°C |
| | BR-116/RJ | 65,5 | | | Quente | Úmido | >18°C |
| | BR-381/MG/SP | 67,4 | | | Subquente | Semi-úmido | Entre 15 e 18°C |
| | BR-101/SC | 75,5 | | | Mesotérmico brando | Super-úmido | Entre 10 e 15°C |
| + | BR-116/PR | | | 21,6 | Mesotérmico brando | Super-úmido | Entre 10 e 15°C |
| | BR-376/PR | | | 38,8 | Mesotérmico brando | Super-úmido | Entre 10 e 15°C |
| | BR-393/RJ | | | 39,5 | Quente | Semi-úmido | >18°C |

O trecho da BR-381/MG/SP possui clima com temperaturas mais amenas se comparadas ao trecho da BR-116/RJ, o que poderia justificar as menores taxas de deterioração observadas nas suas pontes. No entanto essa análise não poderá ser feita pontualmente, uma vez que diversos agentes influenciam na tendência da degradação das pontes rodoviárias. Possivelmente existem outros fatores que podem explicar o desempenho superior dessas pontes rodoviárias comparadas às pontes da BR-116/RS e BR-116/PR/SC inseridas em clima com temperaturas moderadas e alta umidade. Igualmente, as taxas de deterioração das pontes da BR-040/MG/SP mais altas do que as taxas da BR-116/RJ, a despeito do clima, possivelmente possuem outras justificativas para seu comportamento ao longo do tempo.

O registro do volume de tráfego nos dados cadastrais das pontes associado com um banco de dados com maior histórico de dados de inspeções, tornaria possível verificar a influência da característica e volume do tráfego de veículos da rodovia no desgaste das estruturas de pontes. Apesar do registro do volume de veículos das pontes em dois trechos rodoviários da pesquisa, a ausência da análise estatística pelo método da regressão polinomial, conforme descrito no Capítulo 8, impede o conhecimento mais acurado dessa influência na condição das pontes de maneira particular. Certamente as pontes dos trechos rodoviários estão sujeitas a diferentes volumes de tráfego com características da frota distintas, dependendo da sua localização no trecho. No entanto, o conhecimento do volume de tráfego das rodovias do estudo orienta a análise das taxas de deterioração a partir de um escalonamento da magnitude dessas vias, elucidando suas características basilares para a comparação entre os trechos. A Tabela 9.7 mostra os dados fornecidos pela ANTT para a pesquisa, referente ao volume anual dos trechos de rodovias da pesquisa no ano de 2016.

Os dados de volume de tráfego de veículos relativos aos trechos rodoviários da pesquisa não estabelecem, a princípio, uma tendência evidente da sua influência sobre as taxas de deterioração das pontes obtidas nas simulações estatísticas. No entanto, ao considerar as informações de volume de tráfego nas análises de classificações de clima, torna-se possível supor algumas relações. Por exemplo, apenas para os trechos classificados como clima quente e úmido das rodovias BR-101/RJ e 116/RJ, a diferença encontrada nas taxas de deterioração pode estar relacionada ao volume de tráfego distinto nos trechos, tendo a rodovia BR-116/RJ mais que o dobro do volume de tráfego da rodovia BR-101/RJ em 2016. O mesmo ocorre com os trechos das BR-116/SP/PR e BR-153/SP classificadas como clima *subquente e úmido*, apresentando a BR-116/SP/PR maiores taxas de deterioração e volume de tráfego quatro vezes

superior ao registrado na BR-153/SP, com uma diferença de 10 anos na transição do IC=5 para o IC=2 entre os grupos de pontes.

No entanto, para os trechos com classificação climática *Subquente* e *semiúmido*, nas rodovias litorâneas BR-040/MG/RJ e BR-116/SP/RJ e na BR-381/MG/SP e como *Mesotérmico brando* e *super-úmido* nas rodovias BR-116/RS, BR-116/PR/SC e BR-101/SC a informação do volume de veículos não auxilia na compreensão das diferentes taxas de deterioração encontradas, havendo, inclusive, trechos com menores taxas de deterioração apesar de mais elevados volumes de tráfego. De fato, existem diversos fatores que podem influenciar as taxas de deterioração encontradas, abrangendo as características do projeto da estrutura, da construção da obra, do histórico de manutenção entre outros, os quais poderão ser verificados através da coleta mais refinada e registro de dados descritivos dessas obras, associada a um maior número de ciclos de inspeções.

Tabela 9.7 – Tempo total de transição entre IC máximo e mínimo e dados de volume de tráfego anual dos trechos rodoviários da pesquisa no ano de 2016

| | Trecho Rodoviário | Tempo total de transição em anos | | | Clima | | | Volume de Veículos anual 2016 | |
|---------------------------|-------------------|----------------------------------|------|-----|--------------------------------|-----------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| | | 5→2 | 4→2 | 5→3 | Classificação | Temperatura | Quantidade de meses secos | Total | Veículos comerciais (%) |
| + | BR-324/BA | | 13,3 | | Quente Semi-árido | >18°C | 6 | 25.044.968 | 5.168.804 (20%) |
| | BR-392/RS | | 23 | | Mesotérmico brando Super-úmido | Entre 10 e 15°C | 0 | 5.382.702 | 2.384.033 (44%) |
| ↑ Taxa de deterioração | BR-116/PR/SP | 20,8 | | | Subquente Úmido | Entre 15 e 18°C | 1 a 2 | 45.858.271 | 24.333.480 (53%) |
| | BR-116/BA | 21,2 | | | Quente Semi-árido | >18°C | 6 | 13.989.774 | 8.908.774 (64%) |
| | BR-101/RJ | 25 | | | Quente Úmido | >18°C | 3 | 27.447.724 | 5.992.026 (22%) |
| | BR-153/SP | 32 | | | Subquente/ Quente Úmido | Entre 15 e 18°C | 3 | 11.491.156 | 3.746.658 (32%) |
| | BR-040/MG/RJ | 37,2 | | | Subquente Semi-úmido | Entre 15 e 18°C | 4 a 5 | 15.880.406 | 3.129.177 (20%) |
| | BR-116/RS | 45,5 | | | Mesotérmico brando Super-úmido | Entre 10 e 15°C | 0 | 5.497.421 | 1.866.622 (34%) |
| | BR-116/PR/SC | 52,8 | | | Mesotérmico brando Super-úmido | Entre 10 e 15°C | 0 | 12.226.078 | 4.401.354 (36%) |
| | BR-116/SP/RJ | 54,1 | | | Subquente Super-úmido | Entre 15 e 18°C | 4 a 5 | 89.079.713 | 26.181.211 (29,35%) |
| | BR-116/RJ | 65,5 | | | Quente Úmido | >18°C | 1 a 2 | 10.444.757 | 2.814.336 (27%) |
| | BR-381/MG/SP | 67,4 | | | Subquente Semi-úmido | Entre 15 e 18°C | 4 a 5 | 73.494.135 | 28.838.301 (30%) |
| | BR-101/SC | 75,5 | | | Mesotérmico brando Super-úmido | Entre 10 e 15°C | 0 | 50.538.956 | 13.556.277 (26,82%) |
| + | BR-116/PR | | 21,6 | | Mesotérmico brando Super-úmido | Entre 10 e 15°C | 0 | - | - |
| | BR-376/PR | | 38,8 | | Mesotérmico brando Super-úmido | Entre 10 e 15°C | 0 | 11.911.306 | 3.860.649 (32%) |
| | BR-393/RJ | | 39,5 | | Quente Semi-úmido | >18°C | 4 a 5 | 7.478.854 | 2.836.094 (38%) |

Finalmente, possivelmente as menores taxas de deterioração relacionadas às pontes da BR-101/SC, apesar do seu alto volume de veículos anual registrado podem encontrar, como uma das suas possíveis causas, a idade relativamente recente das suas pontes registradas nas inspeções rotineiras, tendo 99 das suas 126 pontes datadas de construções posteriores a 1985. Neste período, as normas de projeto de estruturas de concreto contemplavam a utilização do TB-45 e algumas considerações relativas a promoção de maior durabilidade das obras de concreto no Brasil.

9.5 Discussões dos resultados

Finalmente, algumas empresas ainda adotam procedimentos próprios de inspeção ou de complementação dessas análises existentes. Da análise de relatórios de inspeções rotineiras em pontes elaborados por diversos administradores de rodovias é possível verificar a ausência na padronização do registro das informações, bem como a falta de uniformização dos critérios técnicos adotados (OLIVEIRA e FONSECA, 2013). Na sua grande maioria as análises possuem grande viés qualitativo, com diferentes níveis de detalhamento das observações ou dados. A deficiência na alocação e padronização dos registros pode ser verificada também em outras áreas de pesquisa de infraestrutura rodoviária, como por exemplo, em pesquisa sobre gerenciamento de pavimentos, Lima (2007) cita diversas restrições na implementação das técnicas de gestão nas rodovias da sua pesquisa decorrentes da ausência, qualificações demasiadamente qualitativas ou mesmo da insuficiência de dados necessários para o desenvolvimento da pesquisa.

A heterogeneidade dos apontamentos ocorre ainda nas inspeções que seguem as diretrizes das normas existentes. Na análise de relatórios de inspeções rotineiras em pontes realizados por diversos administradores de rodovias é possível verificar a ausência de padronização no registro das informações, bem como a falta de uniformização dos critérios técnicos adotados.

A maior parte das MPT das pontes por grupo apresentaram altas probabilidades de concentração dos valores de IC em torno da média de cada conjunto, em concordância com estudo de WANG e FOLIENSTE (2008) e VARELA (2007) feito com dados de inspeções em pontes norte-americanas. Esses estudos apresentaram resultados que demonstraram a tendência dos avaliadores em não atribuir notas muito ruins ou muito boas para qualquer estrutura, revelando

a subjetividade das avaliações nessa área e a tendência comum dos inspetores não apresentarem comportamento muito pessimista ou muito otimista.

Para análise dos dados de transição do IC=5 para os IC inferiores, a Tab. 9.8 mostra o número de pontes com essa classificação no início e no final do período, com a transição para o IC=4.

Após análise da Tab. 9.8, pode-se verificar que as altas probabilidades normalmente encontradas nas MPT de transição dos melhores IC para um imediatamente inferior após o breve intervalo de 1 ano não podem ser atribuídas somente ao fenômeno deteriorativo. As 49 pontes do trecho da rodovia BR-040/MG classificadas em 2010 no IC=5 observaram queda no IC após somente 5 anos de inspeções. Da frequência de 165 atribuições de IC=5 em algum ano do período de inspeção na BR-101/SC, 45 tiveram diminuição da sua condição para o IC=4, no mesmo período. Incidência de queda do melhor IC também observada na BR-116/SP/PR, com as 17 pontes do IC=5 no primeiro ano de avaliação alterarem a nota para o IC=4 antes do último ciclo, bem como registrar queda do mesmo IC em 41 das 49 frequências ao longo do período. Metodologias com critérios menos qualitativos e mais técnicos, discriminando com maior detalhamento as condições para a classificação em cada IC, a exemplo de medidas já adotadas pela nova versão da norma ABNT 9452/2016 (ABNT, 2016), podem auxiliar no uso mais eficiente da escala de classificação. No entanto, essa concentração em poucos níveis de IC verificada nos dados pode prejudicar a representação fiel do processo de deterioração dessas estruturas, sabidamente de evolução gradual e progressiva.

Tabela 9.8 – Transições do IC=5 para o IC=4 das pontes da pesquisa, por trecho rodoviário.

| Trecho Rodoviário | Número de pontes | | | Número de transições | |
|-------------------|------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| | Total | Com IC=5 no início do período | IC=5→4 (sem intervenção) | IC=5 no início ou durante o período | IC= 5 → 4 (com e sem intervenção) |
| BR-040/MG/RJ | 111 | 49 | 49 | 69 | 68 |
| BR-116/RJ | 66 | 38 | 36 | 62 | 53 |
| BR-116/RS | 27 | 2 | 2 | 4 | 4 |
| B-R293/RS | 19 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| BR-392/RS | 28 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| BR-381/MG/SP | 293 | 2 | 2 | 22 | 14 |
| BR-101/RJ | 100 | 2 | 2 | 15 | 11 |
| BR-101/SC | 236 | 12 | 7 | 161 | 45 |

Continuação da Tabela 9.8

| Trecho Rodoviário | Número de pontes | | | Número de transições | |
|-------------------|------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| | Total | Com IC=5 no início do período | IC=5→4 (sem intervenção) | IC=5 no início ou durante o período | IC= 5 → 4 (com e sem intervenção) |
| BR-116/PR | 40 | 3 | 1 | 33 | 14 |
| BR-376/PR | 27 | 2 | 1 | 23 | 3 |
| BR-116/SP/RJ | 376 | 32 | 27 | 40 | 32 |
| BR-116/PR/SC | 44 | 0 | 0 | 30 | 26 |
| BR-116/SP/PR | 170 | 17 | 17 | 57 | 53 |
| BR-393/RJ | 47 | 12 | 6 | 45 | 14 |
| BR-153/SP | 40 | 0 | 0 | 23 | 8 |
| BR-116/BA | 44 | 0 | 0 | 6 | 1 |
| BR-324/BA | 52 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Após análise da Tab. 9.8, pode-se verificar que as altas probabilidades normalmente encontradas nas MPT de transição dos melhores IC para um imediatamente inferior após o breve intervalo de 1 ano não podem ser atribuídas somente ao fenômeno deteriorativo. As 49 pontes do trecho da rodovia BR-040/MG classificadas em 2010 no IC=5 observaram queda no IC após somente 5 anos de inspeções. Da frequência de 165 atribuições de IC=5 em algum ano do período de inspeção na BR-101/SC, 45 tiveram diminuição da sua condição para o IC=4, no mesmo período. Incidência de queda do melhor IC também observada na BR-116/SP/PR, com as 17 pontes do IC=5 no primeiro ano de avaliação alterarem a nota para o IC=4 antes do último ciclo, bem como registrar queda do mesmo IC em 41 das 49 frequências ao longo do período. Metodologias com critérios menos qualitativos e mais técnicos, discriminando com maior detalhamento as condições para a classificação em cada IC, a exemplo de medidas já adotadas pela nova versão da norma ABNT 9452/2016 (ABNT, 2016), podem auxiliar no uso mais eficiente da escala de classificação. No entanto, essa concentração em poucos níveis de IC verificada nos dados pode prejudicar a representação fiel do processo de deterioração dessas estruturas, sabidamente de evolução gradual e progressiva.

Para os casos com avaliação do IC por áreas da estrutura pôde ainda ser verificado que as taxas de deterioração são bastante distintas para diferentes regiões nas pontes. Existe uma tendência de maiores taxas de deterioração para os elementos mais próximos das regiões de impacto direto de tráfego. Portanto, a qualificação do estado de cada elemento pode resultar em maior

compreensão do processo deteriorativo, a exemplo da metodologia adotada pelo DNIT na condução do inventário das pontes sob sua administração. Após a realização de maior número de inspeções será possível, através da metodologia proposta nessa pesquisa, determinar taxas específicas de deterioração para elementos tais como vigas, transversinas, laje, encontros, entre outros detalhados na metodologia. Adicionalmente, a inspeção conduzida a nível de elemento é necessária, haja vista que os colapsos e falhas das pontes ocorrem usualmente a partir da falha de um elemento constituinte. A taxa de deterioração anterior à falha tende a ser mais rápida, situação que a atribuição de IC para as partes ou para apenas para o estado geral da ponte possivelmente não será sensível na predição dessa ocorrência (CALLOW *et al.*, 2013).

Importante destacar a necessidade da compreensão da deterioração de obras em meio agressivo. A classificação dessa condição deve ser indicada baseada em critérios comuns, possível por exemplo através da orientação preconizada na norma NBR-6118/2014 para a caracterização dessa ocorrência nas inspeções em pontes brasileiras.

10

CONCLUSÕES

Apesar da limitação dos dados da pesquisa, a metodologia proposta comprovou a possibilidade da utilização das Cadeias de *Markov* para a estimativa das taxas de deterioração de pontes rodoviárias brasileiras. Diversas metodologias existentes foram adaptadas às particularidades das técnicas usadas no Brasil e alguns procedimentos foram criados para tornar possível a análise e comparação dos resultados obtidos.

A partir da reunião dos dados de inspeções de pontes é possível aferir que a prática atual de inspeções em pontes no Brasil, de forma geral, tem por principal objetivo ao conhecimento do estado da ponte em dado momento com vistas à proposição de eventuais necessidades de reparo ou manutenção. Apesar de sua crucial importância, a existência dessa única meta pode sinalizar para a ausência de conhecimento, por parcela significativa dos administradores de rodovias no Brasil, da importância da compilação dos dados tomados nas inspeções para a gestão desses elementos rodoviários. Para além do estado presente, o conhecimento do histórico dos estados das pontes representa subsídio importante na compreensão do comportamento dessas estruturas no tempo, sendo frequentemente utilizado em diversos parques de obras com significativas contribuições para a previsão do estado futuro das construções.

No entanto, a realização de estudo do comportamento histórico de deterioração dessas obras depende do registro dos dados de forma padronizada em um único sistema, podendo este ser um sistema de análise ou de leitura. Isto é, o sistema de registro deve possibilitar a implementação de rotinas para a análise ou gerar arquivos com formato compatível para leitura em sistemas que a realizem. A falta da utilização desse recurso consumiu demasiado tempo e significativo esforço para o levantamento e registro dos dados existentes nessa pesquisa.

No início, o estudo encontrou seu primeiro desafio na reunião dos dados, exigindo considerável dedicação dos profissionais das Agências de Fiscalização para a reunião das informações solicitadas. Após a finalização desse trabalho, verificou-se que alguns relatórios não foram encontrados nos arquivos disponíveis. Outros relatórios estavam em arquivos materiais, tendo

seu formato apenas impresso, exigindo o levantamento de número imensurável de cópias para posterior lançamento dos dados, fato que impossibilitou seu aproveitamento na pesquisa devido ao limitado período exigido para o estudo e a condução individual da tese.

Após o recebimento dos dados enviados pelas Agências de Fiscalização, o que levou em média de 60 a 180 dias de prazo, verificou-se que os relatórios de inspeção estavam em diferentes formatos de formulários e em diversos tipos de arquivos eletrônicos, variando em planilhas, texto ou simples leitura e com distintas formas de organização dos dados, sendo ora por pontes, ora por ano, ora por trechos, etc. Apesar dos normativos de condução de inspeção preverem formulários padronizados, observou-se diversificados métodos de anotações dos dados, despendendo ainda maior tempo na identificação das informações para o devido registro.

Os resultados históricos das inspeções adequadamente disponíveis em softwares apropriados são essenciais para uma gestão eficaz dessas estruturas e cruciais para futuras pesquisas nessa área da ciência. A maior exploração e aproveitamento dos benefícios derivados desses estudos exigem o empenho da engenharia nacional com vistas a padronização das metodologias de inspeção, análise e registro de inspeções em pontes. Sob a perspectiva da gestão de grandes estoques, metodologias de inspeção e avaliação minuciosas e detalhadas ou com forte viés qualitativo, principalmente quando conduzidas sem o devido registro em sistemas de BMS, estão sujeitas a terem restritas contribuições à tomada de decisão em altos níveis gerenciais do que registros regularmente realizados com base em metodologias mais simples. A verificação da periodicidade das inspeções deve sempre ser observada e, acima e tudo, a uniformização dos procedimentos deve sempre ser perseguida.

Adicionalmente, em paralelo ao desafio de se mensurar o viés cognitivo inerente às avaliações de inspetores - fator importante para o refinamento dos resultados em estudos futuros, surge o obstáculo basilar de se assegurar o imprescindível registro das características do patrimônio de pontes do Brasil, devidamente previsto em campos próprios dos formulários de cadastro das obras. As características intrínsecas - tamanho dos vãos, idade da ponte, sistema construtivo, materiais construtivos e as variáveis externas à obra - volume de tráfego, o tipo de tráfego, o clima da região e sua respectiva agressividade não possuem menor importância do que o seu atual estado, devendo ser obrigatoriamente considerado nas decisões gerenciais. Não obstante, foram apontadas em pouquíssimos registros e estão inclusive ausentes em metodologias particulares.

O método desenvolvido para avaliação do modelo permitiu a mensuração dessa acurácia, contribuindo para a qualificação das estimativas obtidas. A verificação dos resultados apresentou bons resultados de previsões, com precisões fortemente dependentes do volume de dados e dos critérios de avaliação adotados pelos inspetores. Algumas taxas de deterioração puderam ser relacionadas à existência de agentes causadores do processo, nesse estudo limitados ao clima e ao volume de tráfego de veículos devido à ausência de registros de demais fatores interferentes nas inspeções disponíveis.

A aplicabilidade e razoável acurácia do método de Cadeias de *Markov* para a previsão do estado futuro de pontes contribui para o planejamento de intervenções. A acurácia na definição de prioridades de M&R dependerá fortemente da abrangência dos fatores técnicos e econômicos considerados, avaliando consequências de custos e benefícios, bem como de seus respectivos valores atribuídos de peso. Para o planejamento da administração das pontes rodoviárias da malha rodoviária brasileira é necessário adotar algum modelo preditivo do estado dessas obras ao longo dos anos, e com o foco nessa área de pesquisa, os refinamentos desses resultados poderão ser realizados ao longo dos anos. Os administradores de rodovias nacionais necessitam de conhecimentos básicos para a programação de manutenção das pontes que ofereçam maior segurança na estimativa de intervalos de intervenções, na previsão de custos em médio e longo prazo e na otimização dos recursos disponíveis com restrições orçamentárias significativas. Para contribuir com maior assertividade e segurança, as decisões desses gestores podem estar baseadas em critérios científicos, não dispensando a experiência desses profissionais, mas servindo como uma ferramenta extremamente útil para suas análises.

O avanço no conhecimento do comportamento de deterioração dessas estruturas no Brasil demanda a adoção de práticas semelhantes de inspeção ou de uma base comum com o envolvimento dos inspetores. É essencial o registro dos dados em sistema apropriado para utilização em diversas áreas de pesquisa. Muito embora a disponibilidade de dados estrangeiros pudesse socorrer a pesquisa, a particularidade dos agentes deteriorativos, das normas de projetos e de construção, associados à característica do tráfego das vias, limita seu uso ao país de origem, impondo o desenvolvimento de pesquisas nacionais concordes com a realidade brasileira.

11

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABED-AL-RAHIM, I.J., JOHNSTON, D. W. *Bridge Elements Deterioration Rates*. Committee on Structures Maintenance and Management, Transportation Research Board, Estados Unidos da América, 1994.

ADARKWA, O., ATTOH-OKINE, N. Prediction of Structural Deficiency Ratio of Bridges based on Multiway data Factorization. *Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A, Civil engineering*, ASCE v. 3 (2), p. 149-157, 2016.

AGÊNCIA DE TRANSPORTE DO ESTADO DE SÃO PAULO – ARTESP. Relação de Lotes de Rodovias e Concessionárias. Disponível em <http://www.artesp.sp.gov.br/Style%20Library/extranet/rodovias/rodovias-e-concessionarias.aspx>. Acesso em 04/12/2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES - ANTT. *Programa de Exploração Rodoviária (PER) da Rodovia BR-381/MG/SP*. Brasília, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES - ANTT. *Programa de Exploração Rodoviária (PER) da Rodovia BR-381/MG/SP*. Brasília, 2017.

AGRAWAL, AK & KAWAGUCHI, A., *Bridge element deterioration rates: final report, project C-01-51*. New York State Department of Transportation, New York, NY, USA. p. 15 a 21, 2009.

ALMEIDA, J. M. M. R. M. O. *Sistema de gestão de pontes com base em custos de ciclo de vida*. Tese de doutoramento. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia (FEUP), Porto, Portugal, p. 5.4, 2013.

ALMEIDA, E. S. *A duplicação da rodovia Fernão Dias: Uma análise de Equilíbrio Geral – Núcleo de Economia regional e urbana* – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - AASHTO. *The Manual for Bridge Evaluation*. Washington, USA, p. 3-3, 3-6., 2013.

ANDERSEN, P. Identification Of Civil Engineering Structures Using Vector ARMA Models. Tese de Doutorado, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg, Alemanha, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 9542: Vistoria de Pontes e Viadutos de Concreto*. Rio de Janeiro, 2016.

AUSTRALASIAN ROAD TRANSPORT AND TRAFFIC AGENCIES - ASTROADS. *Improved Bridge Deterioration Models, Predictive Tools and Costs*. Research Report, Sydney, Austrália, 2015.

BEN-AKIVA, M., GOPINATH, D. Modeling infrastructure performance and user costs. *Journal of Infrastructure Systems*, v. 1, p. 33-45, 1995.

BISHOP, N. W. M., SHERRAT, F. Finite Element Based Fatigue Calculations. *The International Association for the Engineering Analysis Community*. United Kingdom, 2000.

BOLDO, P., CLÍMACO, J. C. T. S. Avaliação quantitativa de estruturas de concreto armado de edificações no âmbito do Exército Brasileiro. XXX Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural, Brasília, DF, 2002.

BOLINA, C. C., PALECHOR, E. U. L., VÁSQUEZ, M. P. R., NICACIO, W. G., GUTIERRES, M. P. D., LOPEZ, A. A. O. vibrações: as frequências naturais estimada e experimental de uma estrutura. Congresso Nacional de Matemática Aplicada, Caldas Novas, Goiás, 2014.

BRANCO, F. A., BRITO, J. Handbook of Concrete Bridge Management. American Society of engineers, 2003, ISBN 0-7844-0560-3.

BU, G., LEE, J., GUAN, H., BLUMENSTEIN, M. LOO, Y. Typical deterministic and stochastic bridge deterioration modeling incorporating backward prediction model. *Journal Civil Structures Health Monitoring*, v. 3 (02), p.141 - 152, 2013.

BU, G., LEE, J., GUAN, H., BLUMENSTEIN, M. LOO, Y. Development of an Integrated Method for Probabilistic Bridge-Deterioration Modeling. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 28 (02), p.330 - 340, 2014.

CALLOW, D., LEE, J., BLUMENSTEIN, M., GUAN, H., LOO, Y. Development of hybrid optimisation method for Artificial Intelligence based bridge deterioration model — Feasibility study. *Automation in construction* v.31, p.83-91, 2013.

CARVALHO, D. M. Análise de Desempenho das Intervenções de Alargamento e Reforço de Pontes Rodoviárias de Concreto Armado em Obras de Duplicação de Rodovias. Dissertação de Mestrado, Programa de pós graduação em engenharia de estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 2017.

CASTRO, E. K. Desenvolvimento de metodologia para manutenção de estruturas de concreto armado. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília - UNB, DF., 1994.

CESARE, M.A., SANTAMARINA, C., TURKSTRA, C., VANMARCKE, H. Modeling Bridge Deterioration with *Markov* Chains. *Journal of Transportation Engineering – ASCE*. v. 118 (6), 1992.

COLOMBO, A. B. Applications of Structural Health Monitoring and Field Testing Techniques to Probabilistic Based Life-Cycle Evaluation of Reinforced Concrete Bridges. 2016. 127p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil.

EUQUERES, P. Metodologia de inspeção de pontes de concreto armado. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, 2011.

CHANG, M., MAGUIRE, M., SUN, Y. *Framework for Mitigating Human Bias in Selection of Explanatory Variables for Bridge Deterioration Modeling*. *Journal of Infrastructure Systems*, v. 23(3), p. 26-38, 2017.

DELAWARE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION - DELDOT. *NBI Condition Ratings*. Disponível em http://deldot.gov/information/pubs_forms/manuals/bridge.../nbi_cond.pdf. Acesso em: 27/01/2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA EM TRANSPORTES - DNIT *Norma DNIT 010/2004 – PRO - Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido – Procedimento*. Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR, Rio de Janeiro, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA EM TRANSPORTES - DNIT. *Implantação e operação em âmbito nacional do sistema de sistema de Gerenciamento de pontes – 3ª fase*. Brasília, 2004.

DEVRAJ, D. Application of non-homogeneous Markov chains in bridge management systems. Tese de Doutorado, Department of Civil and Environmental Engineering Wayne State University, USA, 2009.

FEDERAL HIGHWAY ASSOCIATION - FHWA. *Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nations Bridges*. United States Department of Transportation – Federal Highway Administration, Washington, D. C., Estados Unidos, 1995.

FONTES, F.F.; VERLY, R. C.; SANTOS, G. S.; MAGALHÃES, E. P. *A Bridge Management System for Brazil*. 7th Internacional Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management - IABMAS, Shangai, China, p. 537 - 543, 2008.

FONSECA, R. P. A estrutura do Instituto Central de Ciências: Aspectos históricos, científicos e tecnológicos de projeto, execução, intervenções e propostas de manutenção. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.

FLAIG, K. D., ING, D., LARK, R. J. The development of UK bridge management systems. Civil Engineers Transport Institute. Paper 11923, v. 141, p. 99-106, 2000.

FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Best Practices for Construction and Repair of Bridge Approaches and Departures. Florida, Estados Unidos da América, 2018.

FRANGOPOL, D. M., ESTES, A. C. *Updating Time-Dependent Reliability of Highway Bridges with Pontis Bridge Management System Inspection Results*. 9th international Bridge Management Conference, Orlando, Estados Unidos, 2003.

GHODOOSIPOOR, F. - *Development Of Deterioration Models For Bridge Decks Using System Reliability Analysis*. Tese de Doutorado, Concordia University, Quebec, Canada, 2013.

GOLABI, K., AND SHEPHARD, R. Pontis: a system for maintenance optimization and improvement of US bridge networks. *Journal Interfaces*, v.1, p.71- 88, 1997.

HAJDIN, R. *The Swiss road Structure Management System - International Bridge and Structure Management - Number E-C128*. Tenth International Conference on Bridge and Structure Management. Buffalo, Nova York, p. 48, 2008.

HEYWOOD, R., SHAW, P., MITCHELL, J., JAGER, C. Operational and inventory Management of Bridges. Austroads Bridge Conference 2017, Melbourne, 2017.

HURT, M., SCHROCK, S. Highway Bridge Maintenance – Planning and Scheduling. Elsevier Inc, 337 páginas, ISBN 978-0-12-802069-2, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. *Contas Nacionais, Relatórios de Indicadores 2015* – Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/pib/defaultcnt.shtm>. Acesso em: 17 de janeiro de 2017.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONOMICA APLICADA - IPEA. *Gargalos e Demandas da Infraestrutura Rodoviária e os Investimentos do PAC: Mapeamento IPEA De Obras Rodoviárias*. São Paulo, 2011.

JIANG, Y. & Sinha, K. C. Bridge service life prediction model using the Markov chain. *Transportation Research Record*, nº 1.223, p. 24-30, 1989.

JIANG., Y. *The Development of Performance Prediction and Optimization Models for Bridge Management Systems*. Tese de Doutorado, Purdue University, Indiana, USA, 1990.

JIANG, Y. Application and Comparison of Regression and *Markov* Chain Methods in Bridge Condition Prediction and System Benefit Optimization. *Journal of the Transportation Research Forum*, v. 49(2),p. 91-110, 2010.

KUMAR, R.; CLINE, D. B. H.; GARDONI, P. A stochastic framework to model deterioration in engineering systems. *Structural Safety*, vol. 53, p. 36-43, 2015.

LEE, J, BLUMEINSTEIN, M, GUAN, H., LOO, Y. Minimizing uncertainty in long-term prediction of bridge element. *Engineering, Construction and Architectural Management*, v. 20 (2), p. 127-142.

LENCIONI, J. W. Proposta de Manual Para Inspeção de Pontes e Viadutos em Concreto Armado - Discussão Sobre a Influência dos Fatores Ambientais na Degradação de Obras-de-Arte Especiais. Tese de Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2005.

LI, L. , LI, F., CHEN, Z., SUN, L. *Bridge Deterioration Prediction Using Markov-Chain Model Based on the Actual Repair Status in Shanghai*. Annual meeting of the transportation Research Board, Shangai, China, 2016.

LIMA, J. P., Modelo de decisão para a priorização de vias candidatas às atividades de manutenção e reabilitação de pavimentos. Tese de doutorado. Universidade de São Carlos, USP, 2007.

LOPES, B. A. R. Sistema de manutenção predial para grades estoques de edifícios: Estudo para inclusão do componente “Estrutura de Concreto”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1998. 308 p.

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.

MATJE, A. Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Pontes em Concreto do Sistema Rodoviário de Santa Catarina (Litoral e Vale do Itajaí). Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

MAUCH, M., MADANAT, S. Semiparametric Hazard Rate Models of Reinforced Concrete Bridge Deck Deterioration. *Journal of Infrastructure Systems*, v.7(2), p. 49-57, 2001.

MEHTA, K. & MONTEIRO, P. J. M. *Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais* – IBRACON, São Paulo, p. 123, 2008.

MENDES, P. T. C. *Contribuições para um modelo de gestão de pontes de concreto aplicado à rede de rodovias brasileiras*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2003.

MISHALANI, R. G., MADANAT, M. Computation of infrastructure Transition Probabilities Using Stochastic Duration Models. *Journal of Infrastructure Systems*, Volume 8 (4), p. 130-148, 2002.

MIRZAEI, Z., ADEY, B. T., KLATTER, L. & THOMPSON, P.D. *The IABMAS Bridge Management Committee overview of existing Bridge Management Systems*. Internacional Association of Bridge Maintenance and Safety (IABMAS), Holanda, 2014.

MITRE, M. P. Metodologia para inspeção e diagnóstico em pontes e viadutos em concreto. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica de São Paulo, USP, São Paulo, 2005.

MIYAMOTO, A., KAWAMURA, K. NAKAMURA, H.– *Development of a Bridge Management System for Existing Bridges*. Yamaguchi University, Department of Computer and Systems Eng. Yamaguchi, Japão. p. 5, 2009.

MONTEIRO, P. S. Definição de parâmetros aplicáveis à modelagem da informação de pontes de concreto armado com enfoque no gerenciamento de manutenções. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

MORCOUS, G. *Case-based reasoning for modeling Bridge Deterioration*. Tese de Doutorado. Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University, Quebec, Canada, p. 15, 2000.

MORCOUS, G.; RIVARD, H.; HANNA, A. Modeling Bridge Deterioration using cas-based reasoning. *Infrastructure Systems*, v8(3), p. 86-95, 2002a.

MORCOUS, G., LOUNIS, Z., MIRZA, M.S. *Life-cycle assessment of highway bridges*. Institute for Research in construction IRC, National Research Council Canadá, p.18, 2002b.

MORCOUS, G., LOUNIS, Z. Maintenance optimization of infrastructure networks using genetic algorithms. *Automation in Construction*, v. 14 (1), p. 129-142, 2005.

MORCOUS. G. & LOUNIS, Z. Prediction of onset of corrosion in concrete bridge decks using neural networks and case-based reasoning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure engineering*, v.20 (2), p. 108-117, 2005.

MORCOUS, G. Performance prediction of Bridge Deck Systems Using *Markov* Chains. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 20 (2), 146-155, 2006.

MOURCOUS, G, HATAMI, A. *Developing Deterioration Models for Nebraska Bridges*. University of Nebraska, USA, p. 29 - 30, 2011.

MORE, D. Digital Evolution of Bridge Management Systems in the Gulf Region. Austroads Bridge Conference, Melbourne, Austrália, 2017.

MÜLLER, R. Critérios para o planejamento e execução de recuperações em pontes e viadutos rodoviários no estado do Paraná . Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Construção Civil. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

MUÑOZ, Y. F., PAZ, A, FUENTE-MELLA, H., FARIÑA, J. V., SALES, G. M. *Estimating Bridge Deterioration by Using Small Data Sets*. Universidade de Nevada, Estados Unidos, 2016.

ODENT, N. & BERTHELLEMY, J., CREMONA, C. & ORCESI, A., TORIEL, M. *Optimization of bridge management policies on the French national roads network*. 4th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management - IABMAS, Seoul, Korea, 2008.

ORCESI, A.D., CREMONA, C. F. Optimal Maintenance Strategies for Bridge Networks Using the Supply and Demand Approach. *Structure and Infrastructure Engineering* v.7(10), p.765-781, 2009.

PATERSON, W. D. O. *Road Deterioration and Maintenance Effects - Models for Planning and Management*. The World Bank, Baltimore, 1987.

PESEK, P., RIDING, K., SCHINDLER, A., FOLLIARD, K., DRIMALAS, T., BYARD, B. Developing of Predictive Model for Bridge Deck Cracking: Final Report. University of Texas at Austin, 2017.

QUEIROZ, C. A. V. *Performance Prediction Models for Pavement Management in Brazil*. Tese de Doutorado. The University of Texas at Austin. Austin, 1981.

RYALL, M. J. Bridge Management. Elsevier, 450 páginas, ISBN: 0 7506 5077, 2001.

SCHERER, W. T., GLAGOLA, D. M. *Markovian Models for Bridge Maintenance Management*. Journal of Transportation Engineering. v. 120(01), p. 37-51, 1994.

SETUNGE, S., HASAN, M.S. *Concrete Bridge Deterioration Prediction using Markov Chain Approach*. RMIT University, Melbourne, Austrália, p. 3 e 4, 2011.

SIMON, D. Evolutionary Optimization Algorithms. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 742 páginas. ISBN 978-0-470-93741-9, 2013.

SOBANJO, J.O., THOMPSON, P. D. *Enhancement of the FDOT's project Level an Network-level Bridge Management Analysis Tools: Final Report*. Florida Department of Transportation, Tallahassee, FL, USA, 2011.

SOUZA, T. A. P. Structural Integrity Analysis of Bridges Evaluated From Operational Vibrations. *XXXV Iberian Latin American Congress on computation Methods in Engineering*, Brasil, 2014.

THOMAS, O., SOBANJO, J. Semi-Markov Models for the Deterioration of Bridge Elements. *Journal of Infrastructure Systems*, v. 22 (3), 2016.

THOMPSON, P.D., FORD, K.M., ARMAN, M.H.R., LABI, S., SINHA, K.C., SHIROLE, A.M. *Estimating life expectancies of highway assets: Volume 1: Guidebook, NCHPER report 13*. Transportation Research Board, Washington D.C., USA. p. 78, 2012.

THOMPSON, P. D. *Network level risk analysis in bridge management. . 8th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management - IABMAS*, Foz do Iguaçu, Brasil, 2016.

THOMPSON, P. D., ELLIS, R. M., MERLO, T. Implementation of Ontario Bridge Management System. 9th International Bridge Management Conference. Orlando, Estados Unidos, 2003.

TRAN, H. D. Sensitivity of Markov Model to Different Sampling Sizes of Condition Data. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 4 (4), 2016.

UNITED STATES DEPARTAMENT OF TRANSPORTATION - USDOT. *Bridge Evaluation Quality Assurance in Europe*. United States Departament of Transportation – Federal Highway Administration, p. 11, 13 a 15, 2008.

VERLY, R. C. Avaliação de metodologias de inspeção como instrumento de priorização de intervenções em obras de arte especiais. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, DF, 2015.

WATANATADA, T., HARRAL, C. G., PATERSON, W. D. O., DHARESHWAR, A. M., BHANDARI, A., TSUNOKAWA, K. *The Highway Design and Maintenance Standards Model*. Baltimore, The World Bank, ISBN 0-8018-3591-7, 1987.

WANG, R. Integrated Health Prediction of Bridge Systems using Dynamic Object oriented Bayesian Networks (DOOBNS). Tese de Doutorado, Queensland University of Technology, Austrália, 2012.

WELLALAGE, N. K. W.; ZHANG, T., DWIGHT, R. Calibrating Markov Chain-Based Deterioration Models for Predicting Future Conditions of Railway Bridge Elements. *Journal of Bridge Engineering*, v. 20(2), p. 2, 2014.

WIGHT, J., MACGREGOR, J. G. Reinforced Concrete, Mechanics & Design. 6ª Edição. Editora Pearson Education, Inc., 1157p, 2012.

YOON, Y.; HASTAK, M. Condition Improvement Measurement Using the Condition Evaluation Criteria of Concrete Bridge Decks. *Journal of Transportation Engineering*, p. 142 - 153, v. 142 (11), 2016.

ZAYED, T. M.; CHANG, L.; FRICKER, J. D. Statewide Performance Function for Steel Bridge Protection Systems. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 16 (21), p. 46-54, 2002.

ZHANG, Z., SUN, X., WANG, X. *Determination of Bridge Deterioration Matrices with State National Bridge Inventory Data*. 9th International Bridge Management Conference. Orlando, Estados Unidos, 2003.

ZHOU, J.; LI, X., XIA, R.; YANG, J.; ZHANG, H. Health Monitoring and Evaluation of Long-Span Bridges Based on Sensing and Data Analysis: A Survey. *Sensors*, v. 17:3, p. 603, 2017.

APÊNDICE A

TABELAS DE DISTRIBUIÇÃO DO IC DAS PONTES AO LONGO DO PERÍODO AVALIATIVO POR TRECHO RODOVIÁRIO

Tabela A.1 – Distribuição do IC no tempo das pontes do trecho da BR-040/MG/RJ.

| Ano | Índice de Condição | | | |
|------|--------------------|-----------|-----------|-----------|
| | IC=2 | IC=3 | IC=4 | IC=5 |
| 2010 | | 2 2% | 57 56% | 43 42% |
| 2011 | | 2 2% | 57 53% | 48 45% |
| 2012 | 2 2% | 29 26% | 72 65% | 7 6% |
| 2013 | 2 2% | 24 22% | 82 74% | 3 3% |
| 2014 | 7 6% | 55 50% | 43 39% | 5 5% |
| 2015 | 6 5% | 50 45% | 42 38% | 13 12% |
| 2016 | 1 1% | 13 12% | 94 85% | 2 2% |

Tabela A.2 – Distribuição do IC no tempo das pontes do trecho da BR-116/MG/RJ.

| Ano | Índice de Condição | | | | |
|------|--------------------|---------|-----------|-----------|-----------|
| | IC=1 | IC=2 | IC=3 | IC=4 | IC=5 |
| 2005 | 0 0% | 0 0% | 4 6% | 24 39% | 34 55% |
| 2006 | 0 0% | 0 0% | 8 13% | 26 41% | 29 46% |
| 2007 | 0 | 0 | 7 11% | 22 36% | 32 52% |
| 2008 | 0 | 0 | 2 3% | 26 42% | 34 55% |
| 2009 | 0 | 0 | 1 2% | 24 38% | 38 60% |
| 2010 | 0 | 0 | 1 2% | 20 31% | 44 68% |
| 2011 | 0 | 0 | 1 2% | 20 31% | 44 68% |
| 2012 | 0 | 0 | 1 2% | 20 30% | 45 68% |
| 2013 | 0 | 4 6% | 15 23% | 38 58% | 9 14% |
| 2014 | 0 | 1 2% | 12 18% | 44 67% | 9 14% |
| 2015 | 0 | 1 2% | 7 11% | 47 71% | 11 17% |
| 2016 | 0 | 0 | 6 9% | 48 73% | 12 18% |

Tabela A.3 – Distribuição do IC no tempo das pontes do trecho da BR-101/RJ.

| Ano | Índice de Condição | | | | Sem registro |
|------|--------------------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| | IC=2 | IC=3 | IC=4 | IC=5 | |
| 2010 | 7 7% | 51 51% | 40 40% | 2 2% | 0% |
| 2011 | 5 5% | 52 52% | 41 41% | 2 2% | 0% |
| 2012 | 4 4% | 33 33% | 58 58% | 1 1% | 4 4% |
| 2013 | 3 3% | 29 29% | 65 65% | 0 | 3 3% |
| 2014 | 4 4% | 40 40% | 37 37% | 12 12% | 7 7% |
| 2015 | 9 9% | 46 46% | 39 39% | 4 4% | 2 2% |
| 2016 | 13 13% | 38 38% | 43 43% | 5 5% | 1 1% |

Tabela A.3 – Distribuição do IC no tempo das pontes do trecho da BR-101/SC.

| Ano | Índice de Condição | | | | | Sem registro |
|------|--------------------|----------|-----------|------------|------------|--------------|
| | IC=1 | IC=2 | IC=3 | IC=4 | IC=5 | |
| 2008 | 9 4% | 15 7% | 30 15% | 130 64% | 0 | 18 9% |
| 2009 | 2 6% | 7 21% | 8 24% | 12 35% | 0 | 5 15% |
| 2010 | 2 1% | 8 4% | 32 18% | 102 57% | 32 18% | 3 2% |
| 2011 | 5 2% | 11 5% | 45 21% | 114 54% | 36 17% | 0% |
| 2012 | 5 2% | 8 4% | 43 20% | 100 47% | 55 26% | 1 0% |
| 2013 | 3 1% | 10 4% | 30 13% | 82 36% | 103 45% | 1 0% |
| 2014 | 1 0% | 3 1% | 20 9% | 92 40% | 113 49% | 1 0% |
| 2015 | 1 0% | 1 0% | 9 4% | 90 39% | 126 54% | 5 2% |
| 2016 | 1 0% | 1 0% | 10 4% | 96 42% | 118 51% | 4 2% |

Tabela A.4 – Distribuição do IC no tempo das pontes do trecho da BR-116/RS.

| Ano | Índice de Condição | | | | sem registro |
|------|--------------------|----------|-----------|-----------|--------------|
| | IC=2 | IC=3 | IC=4 | IC=5 | |
| 2008 | 0 | 0 | 33 92% | 1 3% | 2 6% |
| 2010 | 2 5% | 9 23% | 26 65% | 2 5% | 1 3% |
| 2011 | 0 | 6 15% | 26 65% | 7 18% | 1 3% |
| 2012 | 0 | 6 15% | 24 60% | 10 25% | 0 |
| 2013 | 0 | 2 5% | 19 48% | 19 48% | 0 |
| 2014 | 0 | 0 | 16 40% | 24 60% | 0 |
| 2015 | 0 | 0 | 19 48% | 21 53% | 0 |
| 2016 | 0 | 0 | 18 45% | 22 55% | 0 |

Tabela A.5 – Distribuição do IC no tempo das pontes do trecho da BR-376/RS.

| Ano | Índice de Condição | | | | Sem registro |
|------|--------------------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| | IC=2 | IC=3 | IC=4 | IC=5 | |
| 2008 | 2 8% | 14 56% | 9 36% | 0 | |
| 2010 | 3 12% | 11 44% | 11 44% | 0 | |
| 2011 | 3 12% | 10 40% | 12 48% | 0 | |
| 2012 | 3 12% | 9 36% | 11 44% | 2 0.08 | |
| 2013 | 1 4% | 3 11% | 4 15% | 18 67% | 1 4% |
| 2014 | 0 | 2 7% | 3 11% | 22 81% | 0 |
| 2015 | 0 | 2 7% | 3 11% | 22 81% | 0 |
| 2016 | 0 | 2 7% | 5 19% | 20 74% | 0 |

Tabela A.6 – Distribuição do IC no tempo das pontes do trecho da BR-116/PR/SC.

| Ano | Índice de Condição | | | | Sem registro |
|------|--------------------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| | IC=2 | IC=3 | IC=4 | IC=5 | |
| 2009 | 8 21% | 21 54% | 10 26% | 0 0% | 0 |
| 2010 | 10 24% | 24 59% | 7 17% | 0 | 0 |
| 2011 | 5 12% | 19 46% | 15 37% | 2 5% | 0 |
| 2012 | 4 10% | 18 44% | 7 17% | 12 29% | 0 |
| 2013 | 2 5% | 6 15% | 4 10% | 28 68% | 1 2% |
| 2014 | 0 | 2 5% | 34 81% | 5 12% | 1 2% |
| 2015 | 0 | 1 2% | 35 83% | 6 14% | 0 |
| 2016 | 0 | 1 2% | 34 81% | 7 17% | 0 |

Tabela A.7 – Distribuição do IC no tempo das pontes do trecho da BR-116SP/PR

| Ano | Índice de Condição | | | | | Sem registro |
|------|--------------------|-----------|-----------|------------|-----------|--------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 2008 | 0 | 7 15% | 9 19% | 29 62% | 2 4% | |
| 2009 | 0 | 13 11% | 27 24% | 58 51% | 16 14% | |
| 2010 | 1 1% | 19 11% | 88 53% | 57 34% | 0 | 2 1% |
| 2011 | 0 | 3 6% | 17 33% | 24 46% | 8 15% | |
| 2012 | 1 1% | 12 10% | 39 33% | 57 48% | 9 8% | |
| 2013 | 2 1% | 4 2% | 52 31% | 93 55% | 18 11% | |
| 2014 | 1 2% | 0% | 11 21% | 36 69% | 4 8% | |
| 2015 | 1 1% | 12 7% | 59 35% | 87 51% | 11 6% | |
| 2016 | 1 1% | 1 1% | 57 34% | 106 62% | 5 3% | |

Tabela A.7 – Distribuição do IC no tempo das pontes do trecho da BR-393/RJ

| Ano | Índice de Condição | | |
|------|--------------------|------------|------------|
| | IC=3 | IC=4 | IC=5 |
| 2010 | 12 7% | 120 68% | 45 25% |
| 2011 | 12 6% | 124 65% | 55 29% |
| 2012 | 6 3% | 96 46% | 105 51% |
| 2013 | 6 3% | 56 26% | 155 71% |
| 2014 | 6 3% | 56 26% | 155 71% |
| 2015 | 6 3% | 40 18% | 175 79% |
| 2016 | 12 5% | 28 13% | 180 82% |

Tabela A.7 – Distribuição do IC no tempo das pontes do trecho da BR-153/SP

| Ano | Índice de Condição | | | | Sem registro |
|------|--------------------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| | IC=2 | IC=3 | IC=4 | IC=5 | |
| 2009 | 6 15% | 25 64% | 8 21% | | |
| 2010 | 3 8% | 25 63% | 12 30% | | |
| 2011 | 6 15% | 15 38% | 19 48% | | |
| 2012 | 4 10% | 13 33% | 21 53% | 2 5% | |
| 2013 | 6 15% | 4 10% | 18 45% | 12 30% | |
| 2014 | 4 10% | 1 3% | 19 48% | 16 40% | |
| 2015 | 3 8% | 3 8% | 16 40% | 18 45% | |
| 2016 | 2 6% | 3 8% | 11 31% | 19 53% | 1 3% |

Tabela A.7 – Distribuição do IC no tempo das pontes do trecho da BR-116/BA

| Ano | Índice de Condição | | | | |
|------|--------------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| | IC=1 | IC=2 | IC=3 | IC=4 | IC=5 |
| 2011 | 6 14% | 13 30% | 12 28% | 12 28% | |
| 2012 | 6 14% | 14 32% | 10 23% | 14 32% | |
| 2013 | 7 16% | 15 34% | 12 27% | 10 23% | |
| 2014 | 7 16% | 15 34% | 12 27% | 10 23% | |
| 2015 | 3 7% | 15 34% | 6 14% | 14 32% | 6 14% |
| 2016 | 2 5% | 13 30% | 8 18% | 16 36% | 5 11% |

Tabela A.7 – Distribuição do IC no tempo das pontes do trecho da BR-324/BA

| Ano | Índice de Condição | | | |
|------|--------------------|----------|-----------|-----------|
| | IC=1 | IC=2 | IC=3 | IC=4 |
| 2011 | | 1 4% | 10 40% | 14 56% |
| 2012 | | 1 4% | 10 40% | 14 56% |
| 2013 | 1 4% | 6 24% | 9 36% | 9 36% |
| 2014 | 1 4% | 6 24% | 9 36% | 9 36% |
| 2015 | 4 16% | 4 16% | 10 40% | 7 28% |
| 2016 | 4 16% | 5 20% | 10 40% | 6 24% |

Tabela A.7 – Distribuição do IC no tempo das pontes do trecho da BR-116/RS

| Ano | Índice de Condição | | | |
|------|--------------------|-----------|----------|---------|
| | IC=2 | IC=3 | IC=4 | IC=5 |
| 2011 | 6 22% | 16 59% | 3 11% | 2 7% |
| 2012 | 7 26% | 15 56% | 3 11% | 2 7% |
| 2013 | 6 22% | 15 56% | 6 22% | 0 |
| 2014 | 6 22% | 15 56% | 6 22% | 0 |
| 2015 | 5 19% | 15 56% | 5 19% | 2 7% |

| | | | | |
|------|-----|-----|-----|---|
| 2016 | 6 | 13 | 6 | 0 |
| | 24% | 52% | 24% | |

Tabela A.7 – Distribuição do IC no tempo das pontes do trecho da BR-293/RS

| Ano | Índice de Condição | | |
|------|--------------------|-----------|----------|
| | IC=2 | IC=3 | IC=4 |
| 2011 | 3 16% | 11 58% | 5 26% |
| 2012 | 3 16% | 11 58% | 5 26% |
| 2013 | 3 16% | 11 58% | 5 26% |
| 2014 | 3 16% | 11 58% | 5 26% |

Tabela A.7 – Distribuição do IC no tempo das pontes do trecho da BR-392/RS

| Ano | Índice de Condição | | | |
|------|--------------------|-----------|-----------|---------|
| | IC=2 | IC=3 | IC=4 | IC=5 |
| 2011 | 3 12% | 13 50% | 10 38% | 0 |
| 2012 | 6 21% | 15 54% | 7 25% | 0 |
| 2013 | 8 29% | 14 50% | 6 21% | |
| 2014 | 7 26% | 13 48% | 7 26% | 0 |
| 2015 | 7 25% | 13 46% | 8 29% | 0 |
| 2016 | 6 21% | 14 50% | 7 25% | 1 4% |

APÊNDICE B

MATRIZES DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADAS PARA AS PONTES DA PESQUISA POR TRECHO RODOVIÁRIO

BR-040/MG

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0326 & 0,9674 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2188 & 0,7812 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5321 & 0,4679 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA POR PARTES:

LAJE

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0222 & 0,9778 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1655 & 0,8345 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3739 & 0,6261 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

VIGAMENTO PRINCIPAL

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0971 & 0,9029 & 0 \\ 0 & 0,2782 & 0,7218 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

MESOESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,087 & 0,913 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0993 & 0,9007 & 0 \\ 0 & 0 & 0,199 & 0,801 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

INFRAESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,5 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0256 & 0,9744 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1051 & 0,8949 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

PISTA DE ACESSO

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,1066 & 0,8934 & 0 \\ 0 & 0,5125 & 0,4875 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

BR-116/RJ

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0270 & 0,9730 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0486 & 0,9514 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1266 & 0,8734 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA POR PARTES:

LAJE

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0194 & 0,9806 & 0 \\ 0 & 0,0358 & 0,9642 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

MESOESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0769 & 0,9231 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0069 & 0,9931 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0505 & 0,9495 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

PISTA DE ACESSO

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0183 & 0,9817 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0428 & 0,9572 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1115 & 0,8885 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

BR-116/RS

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0417 & 0,9583 & 0 & 0 \\ 0 & 0,05 & 0,95 & 0 \\ 0 & 0 & 0,6667 & 0,3333 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA POR PARTES:

SUPERESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0606 & 0,9394 & 0 & 0 \\ 0 & 0,025 & 0,975 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0,5 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

INFRAESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0909 & 0,9091 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0667 & 0,9333 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0128 & 0,9872 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

BR-392/RS

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0597 & 0,9403 & 0 \\ 0 & 0,1579 & 0,8421 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4).

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA POR PARTES:

SUPERESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0137 & 0,9863 & 0 \\ 0 & 0,1458 & 0,8542 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4).

BR-381/MG/SP

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0098 & 0,9902 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0648 & 0,9352 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0,5 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA POR PARTES:

LAJE

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0187 & 0,9813 & 0 \\ 0 & 0,2433 & 0,7567 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

VIGAMENTO PRINCIPAL

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0408 & 0,9592 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0557 & 0,9443 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2292 & 0,7708 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

MESOESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0311 & 0,9689 & 0 \\ 0 & 0,2081 & 0,7919 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

INFRAESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0391 & 0,9609 & 0 \\ 0 & 0,1465 & 0,8535 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

PISTA DE ACESSO

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0317 & 0,9683 & 0 \\ 0 & 0,5213 & 0,4787 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

BR-101/RJ

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0628 & 0,9372 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1412 & 0,8588 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0,5 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA POR PARTES:

LAJE

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0282 & 0,9718 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0865 & 0,9135 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3034 & 0,6966 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

VIGAMENTO PRINCIPAL

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0633 & 0,9367 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0774 & 0,9226 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1947 & 0,8053 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

MESOESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0581 & 0,9419 & 0 & 0 \\ 0 & 0,076 & 0,924 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1838 & 0,8162 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

INFRAESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0364 & 0,9636 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1562 & 0,8438 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1148 & 0,8852 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

PISTA DE ACESSO

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0411 & 0,9589 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1226 & 0,8774 & 0 \\ 0 & 0 & 0,4 & 0,6 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

BR-101/SC

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0391 & 0,9609 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0256 & 0,9744 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0923 & 0,9077 \end{pmatrix}$$

Obs1.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

Obs2.: houve nota igual a 1, mas não foi possível estimar a transição $2 \rightarrow 1$.

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA POR PARTES:

LAJE

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,027 & 0,973 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0279 & 0,9721 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0646 & 0,9354 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

VIGAMENTO PRINCIPAL

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0526 & 0,9474 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0714 & 0,9286 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0242 & 0,9758 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,1153 & 0,8847 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (1, 2, 3, 4, 5).

MESOESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0222 & 0,9778 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0283 & 0,9717 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0776 & 0,9224 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

INFRAESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0588 & 0,9412 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0351 & 0,9649 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0332 & 0,9668 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

PISTA DE ACESSO

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0274 & 0,9726 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0391 & 0,9609 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0948 & 0,9052 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

BR-116/PR

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0657 & 0,9343 & 0 \\ 0 & 0,1566 & 0,8434 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA POR PARTES:

PISTA DE ACESSO

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0515 & 0,9485 & 0 \\ 0 & 0,1132 & 0,8868 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

BR-376/PR

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0571 & 0,9429 & 0 \\ 0 & 0,0469 & 0,9531 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA POR PARTES:

LAJE

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0303 & 0,9697 & 0 \\ 0 & 0,0714 & 0,9286 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

VIGAMENTO PRINCIPAL

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,069 & 0,931 & 0 \\ 0 & 0,0602 & 0,9398 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

MESOESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,05 & 0,95 & 0 \\ 0 & 0,0753 & 0,9247 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

INFRAESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,1579 & 0,8421 & 0 \\ 0 & 0,0444 & 0,9556 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

PISTA DE ACESSO

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0182 & 0,9818 & 0 \\ 0 & 0,0299 & 0,9701 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

BR-116/PR/SC

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0364 & 0,9636 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0430 & 0,9570 & 0 \\ 0 & 0 & 0,4906 & 0,5094 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA POR PARTES:

LAJE

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0748 & 0,9252 & 0 \\ 0 & 0,1839 & 0,8161 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

VIGAMENTO PRINCIPAL

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0877 & 0,9123 & 0 \\ 0 & 0,0078 & 0,9922 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

MESOESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0556 & 0,9444 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0395 & 0,9605 & 0 \\ 0 & 0 & 0,088 & 0,912 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

INFRAESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0303 & 0,9697 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0806 & 0,9194 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1316 & 0,8684 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

PISTA DE ACESSO

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0964 & 0,9036 & 0 \\ 0 & 0,2233 & 0,7767 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

BR-116/SP/PR

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0909 & 0,9091 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0659 & 0,9341 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2509 & 0,7491 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,6316 & 0,3684 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (1, 2, 3, 4, 5).

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA POR PARTES:

LAJE

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,1915 & 0,8085 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1567 & 0,8433 & 0 \\ 0 & 0 & 0,4294 & 0,5706 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

VIGAMENTO PRINCIPAL

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0962 & 0,9038 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1977 & 0,8023 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3455 & 0,6545 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

MESOESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0678 & 0,9322 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1622 & 0,8378 & 0 \\ 0 & 0 & 0,4859 & 0,5141 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

INFRAESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0256 & 0,9744 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1556 & 0,8444 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2904 & 0,7096 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

PISTA DE ACESSO

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,045 & 0,955 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1773 & 0,8227 & 0 \\ 0 & 0 & 0,6939 & 0,3061 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

BR-393/RJ

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0345 & 0,9655 & 0 \\ 0 & 0,0949 & 0,9051 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA POR PARTES:

LAJE

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0349 & 0,9651 & 0 \\ 0 & 0,0857 & 0,9143 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

VIGAMENTO PRINCIPAL

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0484 & 0,9516 & 0 \\ 0 & 0,0391 & 0,9609 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

MESOESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0645 & 0,9355 & 0 \\ 0 & 0,028 & 0,972 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

INFRAESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0476 & 0,9524 & 0 \\ 0 & 0,0369 & 0,9631 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

PISTA DE ACESSO

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0333 & 0,9667 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0822 & 0,9178 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1316 & 0,8684 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

BR-153/SP

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,1 & 0,9 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0652 & 0,9348 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1489 & 0,8511 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA POR PARTES:

LAJE

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0625 & 0,9375 & 0 & 0 \\ 0 & 0,098 & 0,902 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1957 & 0,8043 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

VIGAMENTO PRINCIPAL

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,1111 & 0,8889 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2121 & 0,7879 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0719 & 0,9281 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

MESOESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,1481 & 0,8519 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1111 & 0,8889 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0882 & 0,9118 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

PISTA DE ACESSO

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0196 & 0,9804 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1386 & 0,8614 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3556 & 0,6444 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

BR-116/BA

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0465 & 0,9535 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1818 & 0,8182 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1034 & 0,8966 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,1667 & 0,8333 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (1, 2, 3, 4, 5).

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA POR PARTES:

LAJE

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,1556 & 0,8444 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1628 & 0,8372 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3448 & 0,6552 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

VIGAMENTO PRINCIPAL

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0364 & 0,9636 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2308 & 0,7692 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1633 & 0,8367 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2059 & 0,7941 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (1, 2, 3, 4, 5).

MESOESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,2308 & 0,7692 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0988 & 0,9012 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2439 & 0,7561 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

INFRAESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0385 & 0,9615 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0769 & 0,9231 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0674 & 0,9326 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

PISTA DE ACESSO

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,127 & 0,873 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1528 & 0,8472 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1579 & 0,8421 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

BR-324/BA

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,1688 & 0,8312 & 0 \\ 0 & 0,1348 & 0,8652 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4).

MATRIZ DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO ESTIMADA POR PARTES:

LAJE

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0625 & 0,9375 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1702 & 0,8298 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1471 & 0,8529 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,359 & 0,641 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (1, 2, 3, 4, 5).

VIGAMENTO PRINCIPAL

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,0732 & 0,9268 & 0 \\ 0 & 0,1507 & 0,8493 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (3, 4, 5).

Obs2.: no gráfico das curvas de deterioração por parte desse trecho não aparece vigamento principal apenas porque seu nível mínimo estimado é o 3, e para ter comparação com a nota global, a nota global inicia-se em 4 na estimativa.

MESOESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,087 & 0,913 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2581 & 0,7419 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1414 & 0,8586 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,3818 & 0,6182 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (1, 2, 3, 4, 5).

INFRAESTRUTURA

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0968 & 0,9032 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1111 & 0,8889 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0339 & 0,9661 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

PISTA DE ACESSO

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0455 & 0,9545 & 0 & 0 \\ 0 & 0,234 & 0,766 & 0 \\ 0 & 0 & 0,6 & 0,4 \end{pmatrix}$$

Obs.: níveis que compõem a matriz: (2, 3, 4, 5).

APÊNDICE C

**MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS TRECHOS RODOVIÁRIOS DE DAS
PONTES DA PESQUISA SOB A BASE RODOVIÁRIA DE RODOVIAS
FEDERAIS BRASILEIRAS E BASE DE CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA
KÖPPEN**

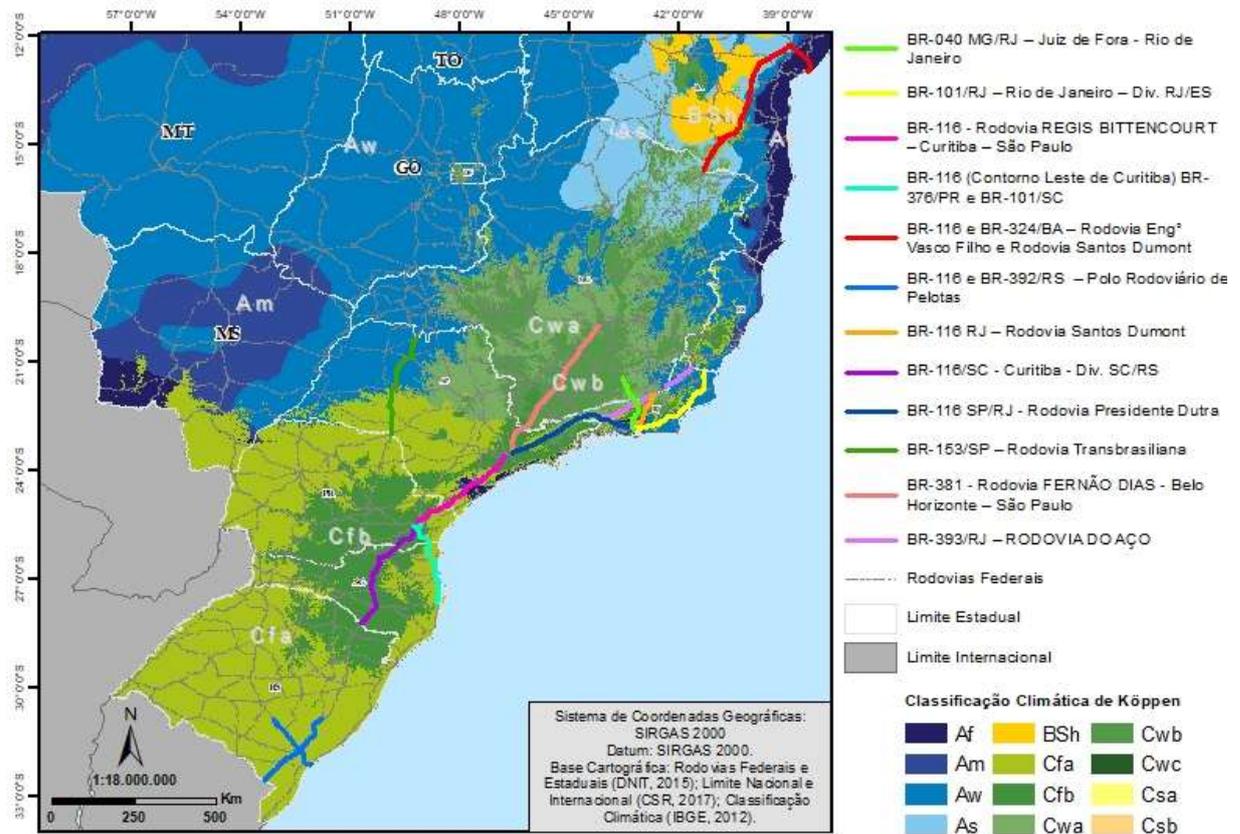


Figura C.1 - Mapa de localização dos trechos rodoviários de das pontes da pesquisa sob a base rodoviária de rodovias federais brasileiras e base de classificação climática köppen

APÊNDICE D

**ROTINA IMPLEMENTADA NA LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO R
COM AS FUNÇÕES PRINCIPAIS PARA OS CÁLCULOS
NECESSÁRIOS PARA AS ANÁLISES POR CADEIAS DE MARKOV**

```
#####
# Funcao para potencia de Matriz
#
# input:
# x = matriz
# k = potencia
#
# output:
# matriz x elevada a potência k: x^k
#####
Pn <- function(x,k){
  r <- diag(dim(x)[1])
  for(i in 1:k){
    r <- r%%x
  }
  r
}
#####
# Função: Construção da matriz de transição de probabilidades para 5 níveis
#
# input:
# notas - os dados devem estar dispostos da seguinte maneira:
#         colunas: anos (OBS.: se houve algum ano sem inspeção,
#         a coluna correspondente a este ano deve
#         conter todos os valores iguais a zero)
#         linhas: pontes
#
```

```

# output:

# MPT: matriz 5x5 de probabilidades de transição

#

# obs: 1) consideramos todas as pontes para a estimativa;

# 2) conservamos todos os níveis;

# 3) eliminamos transições de intervenção (aumento de nota);

# 4) eliminamos transições com diferença maior que 1 entre notas (ex: 4 -> 2)

#####

MPT_5niveis <- function(notas){

  P <- matrix(rep(0,25), nrow = 5, ncol = 5) # P é a matriz de transição final.

  n <- dim(notas)[1] # n é o numero de pontes totais

  for(i in 1:n){

    for(j in 2:dim(notas)[2]){

      aux1 <- notas[i,j-1]

      aux2 <- notas[i,j]

      P[aux1,aux2] <- P[aux1,aux2] + 1

    }

  }

  P[upper.tri(matrix(nrow = 5, ncol = 5))] <- 0 # retira transições de intervenção (aumento de notas)

  # retirando transições de 2 notas!

  for(i in 1:3){

    for(j in i:3){

      P[j+2,i] <- 0

    }

  }

  for(i in 1:5){

```

```

    if(P[i,i] == 0){P[i,i] <- 1}
  }

  P <- round(apply(P,2,function(x) x/rowSums(P)),4) # Matriz P final: probabilidades de transição.
P
}

#####

# Função de previsão de degradação de uma ponte
#
# input:
# dist_inicial: distribuição inicial para a MPT
#      (entrada de zeros e 1 na entrada
#      equivalente ao estado inicial)
# tempo: até quantos anos deseja-se obter a previsão (escalar)
# P: matriz de transição de probabilidades
#
# output:
# vetor de tamanho (tempo + 1), em que a i-ésima entrada do vetor é correspondente
# ao valor esperado da nota da ponte no (i-1)-ésimo ano.
#####

previsao.func <- function(dist_inicial, tempo, P){
  Notas_previsao<- NULL
  Notas_previsao[1] <- sum(dist_inicial * c(1:5))
  for(i in 2:(tempo + 1)){
    Notas_previsao[i] <- sum((dist_inicial %*% Pn(P,i-1)) * c(1:5))
  }
  Notas_previsao
}

```