



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

CÉSAR EDUARDO NAVARRO LÓPEZ

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA
SISTEMÁTICA PARA A AVALIAÇÃO DO ESTADO
DAS PONTES EXISTENTES NO BRASIL**

CAMPINAS

2020

CÉSAR EDUARDO NAVARRO LÓPEZ

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA
SISTEMÁTICA PARA A AVALIAÇÃO DO ESTADO
DAS PONTES EXISTENTES NO BRASIL**

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Estruturas e Geotécnica.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Henrique Siqueira

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO CÉSAR EDUARDO NAVARRO LÓPEZ E ORIENTADO PELO PROF. DR. GUSTAVO HENRIQUE SIQUEIRA.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS

2020

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

N228d Navarro López, César Eduardo, 1981-
Desenvolvimento de metodologia sistemática para a avaliação do estado das pontes existentes no Brasil / César Eduardo Navarro López. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Gustavo Henrique Siqueira.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Pontes. 2. Avaliação. 3. Gestão. 4. Deterioração. 5. Markov, Cadeias de. I. Siqueira, Gustavo Henrique, 1980-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Development of systematic methodology for the state evaluation of existing bridges in Brazil

Palavras-chave em inglês:

Bridges

Assessment

Management

Markov Chains

Área de concentração: Estruturas e Geotécnica

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Gustavo Henrique Siqueira [Orientador]

Saulo José de Castro Almeida

Ricardo Carrazedo

Data de defesa: 27-02-2020

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-5251-2225>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/3914294850751884>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA SISTEMÁTICA
PARA A AVALIAÇÃO DO ESTADO DAS PONTES
EXISTENTES NO BRASIL**

César Eduardo Navarro López

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

**Prof. Dr. Gustavo Henrique Siqueira
Presidente e Orientador/ FEC/UNICAMP**

**Prof. Dr. Saulo José de Castro Almeida
FEC/UNICAMP**

**Prof. Dr. Ricardo Carrazedo
Escola de Engenharia de São Carlos - USP**

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 27 de fevereiro de 2020

*Dedico este trabalho a meus pais, Victor e Antonieta. A meu irmão,
Nguyen, e a minha tia Dora, que nos protege do céu desde o 2017.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por tudo, as bênçãos recebidas e as forças para superar obstáculos e tempos difíceis na minha vida.

Agradeço a minha querida família. A meus pais, Victor e Antonieta, e a meu irmão, Nguyen, que sempre me demonstraram carinho, confiança e apoio irrestrito. Agradeço o carinho do resto da minha família. A minha noiva Gabriela, que apesar da distância e o tempo me deu seu amor e as forças necessárias para atingir meus objetivos. Também agradeço à noiva do meu irmão, Patty, por ser amiga e estar disponível sempre que eu solicitei a sua ajuda.

Agradecimento especial ao meu orientador, o Prof. Dr. Gustavo Henrique Siqueira, que sempre me deu seu apoio, inclusive antes de chegar no Brasil. Agradeço a sua amizade, paciência e valiosa orientação durante todo o curso de pós-graduação. Também agradeço aos professores Saulo, Leandro e Ricardo, membros da minha banca examinadora, por todos os conselhos e comentários para melhorar minha dissertação.

Agradeço à ANTT pelos dados fornecidos através da plataforma do Serviço de Informação ao Cidadão, indispensáveis para o progresso desta pesquisa. Agradeço à ARTESP pela colaboração cada que solicitei informações. Também agradeço à Rodovia do Aço por ter respondido minhas questões. Agradeço muito à Dra. Enga. Caroline Buratto por suas valiosas sugestões e compartilhar comigo muitas informações relacionadas a esta pesquisa.

Agradeço às autoridades, ao pessoal administrativo e aos professores da UNICAMP por ter me permitido pertencer a tão prestigiada universidade, pelo suporte recebido e por todo o aprendizado, respectivamente. Agradeço muito aos meus amigos do mestrado: Oscar, Miguel, Ingrid, Paulo, Carlos, Rafael, Bruno e Fabio; e a toda a gente do LABMEC e LABMEM por sua amizade.

Não posso deixar de estar agradecido com minha querida amiga do pensionato, Sonia, cujo carinho, atenção e alegria me fez sentir como em casa. Também não posso deixar de agradecer ao pessoal que me ofereceu sua amizade no pensionato: Guerby, Iago e Pablo.

RESUMO

As entidades responsáveis pelas pontes e viadutos da rede rodoviária do Brasil, nas esferas federais, estaduais e municipais, ainda não têm desenvolvido ou adotado um sistema que avalie o estado de condição dessas obras e resulte em um processo simples, eficiente e dinâmico. Esse sistema necessita correlacionar e centralizar procedimentos de vistorias para construção de banco de dados e usar modelos matemáticos para prever a condição futura das obras, procurando atender limitações políticas e orçamentárias. Nesse contexto, o presente trabalho procura contribuir com o desenvolvimento de um sistema básico para a avaliação da condição de pontes federais de concreto no Brasil. Para tal fim, a pesquisa começou mostrando o Estado da Arte na gestão de pontes, abordando as metodologias, a estrutura organizacional, e as técnicas de análise para modelar e otimizar o processo de deterioração e as ações de intervenção, respectivamente. Foi estudada a situação atual do país em relação à administração e controle do estado das pontes nacionais, dando maior ênfase à gestão de obras nas rodovias federais e no Estado de São Paulo. Na sequência, foi revisada a teoria para desenvolver um modelo de deterioração usando Cadeias de Markov, que incluiu as técnicas para calibrar a matriz definida pelas probabilidades que tem um elemento de mudar ou permanecer em um estado após um intervalo fixo de tempo. Feito isso com base nos tópicos previamente estudados, foi proposta uma metodologia para sistematizar a avaliação de condição de pontes federais de concreto, incluindo um código computacional que integra os procedimentos e técnicas matemáticas, assim como valida a metodologia e o algoritmo usando-os para um caso de estudo com os dados de pontes fornecidos pela ANTT. Para finalizar, são apresentadas algumas conclusões e recomendações relacionadas à situação atual da gestão de pontes no Brasil, a metodologia proposta e o código computacional desenvolvido, além de algumas recomendações para futuros trabalhos.

Palavras-chave: Pontes; avaliação da condição; gestão; modelo de deterioração; Cadeias de Markov.

ABSTRACT

The entities responsible for the bridges and viaducts of the Brazilian highway network at the federal, state and municipal levels, have not yet developed or adopted a system that assesses the condition of these works and results in a simple, efficient and dynamic process. That system needs to correlate and centralize inspection procedures to build a database and use mathematical models to predict the future condition of the works, seeking to address political and budgetary limitations. In this context, the present study seeks to contribute to the development of a basic system for the condition assessment of federal concrete bridges in Brazil. To this end, the research began showing the state of the art in bridge management, addressing methodologies, organizational structure and analysis techniques to model the deterioration process and optimize intervention actions. The current situation of the country in relation to the administration and control of the state of the national bridges was studied, giving greater emphasis to the management of works on federal highways and in the State of São Paulo. Next, the theory to develop a deterioration model using Markov Chains was reviewed, which included techniques for calibrating the matrix defined by the probabilities that an element has to change or remain in a state after a fixed step of time. Then, based on the previously studied topics, a methodology was proposed to systematize the condition assessment of federal concrete bridges, including a computer code that integrates procedures and mathematical techniques, as well as validates the methodology and algorithm using them for a case study with the bridge data provided by the ANTT. Finally, some conclusions and recommendations related to the current situation of bridge management in Brazil, the proposed methodology and the computer code developed are presented, in addition to some recommendations for future work.

Keywords: Bridges; condition assessment; management; deterioration model; Markov Chains.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Malha rodoviária no Brasil (Fonte: MTPA/EPL, 2017).....	20
Figura 1.2 - Lei de evolução de custos, Lei de Sitter (Fonte: Vitório, 2006)	21
Figura 1.3 - Distribuição de 3.306 pontes federais por faixa de idade (Fonte: Mendes, 2009).....	22
Figura 1.4 - Algumas anomalias e manifestações patológicas em pontes	23
Figura 2.1 - Silver Bridge, antes e após o acidente de 1967 (Fonte: https://structurae.net/en/structures/silver-bridge)	30
Figura 2.2 - Desabamento de ponte em Minneapolis em 2007 (Fonte: internet)	31
Figura 2.3 - Filosofias para o gerenciamento de ativos	35
Figura 2.4 - O processo de otimização (Fonte: Small et al., 1999).....	36
Figura 2.5 - Um sistema básico de gestão de pontes (Fonte: Adaptado Ryall, 2010)	38
Figura 2.6 - Estrutura modelo de um Sistema de Gestão de Pontes (Fonte: Adaptado de Steele et al., 2000)	39
Figura 2.7 - Curvas de classificação adotadas no Canadá (Fonte: Morcous e Lounis, 2005).....	45
Figura 2.8 - Fluxograma do processo de modelo de deterioração e sua ferramenta preditiva (Fonte: Adaptado de Kotze et al., 2015)	46
Figura 2.9 - Exemplo de modelo determinístico de pontes (Fonte: Adaptado de Cavalline et al., 2015)	48
Figura 2.10 - Exemplo de modelo de cadeias de Markov. (Fonte: Adaptado de Thompson e Kerr, 1999)	50
Figura 2.11 - Rede Neural Multicamadas (Fonte: Sobanjo, 1997)	52
Figura 2.12 - Estrutura geral de PONTIS (Fonte: Adaptado de Ryall, 2010).....	54
Figura 2.13 - Interface gráfica para usuários de PONTIS	55
Figura 2.14 - Exemplo de tela do aplicativo da OBMS (Fonte: Yari, 2018)	60
Figura 2.15 - O sistema HiSMIS (Fonte: Adaptado de Ryall, 2010)	63
Figura 2.16 - Tela principal do SIB-Bauwerke (Fonte: Mendes, 2009).....	64
Figura 2.17 - Tela típica de acesso as informações das obras (Fonte: Mendes, 2009)	65
Figura 3.1 - Classificação e extensão da rede rodoviária brasileira (Fonte: DNIT) ...	68
Figura 3.2 - Rodovias federais do Brasil (Fonte: MINFRA)	69

Figura 3.3 - Distribuição de rodovias federais concessionadas (Fonte: SNTT).....	70
Figura 3.4 - Ponte de concreto no estado de Mato Grosso, sobre o Rio Aripuanã, na rodovia MT-208 (Fonte: www.mt.gov.br).....	71
Figura 3.5 - Mapa rodoviário do Estado de São Paulo (Fonte: DER-SP).....	72
Figura 3.6 - Funções da ARTESP (Fonte: www.artesp.sp.gov.br).....	73
Figura 3.7 - Fluxo de relação entre as inspeções em OAEs (Fonte: Cruz et al., 2017).....	79
Figura 3.8 - Tela de início do SGO Mobile.....	81
Figura 3.9 - Tela principal de cadastro de obras do SGO v3.....	81
Figura 3.10 - Componentes da estrutura de acordo com a norma DNIT010/2004 (Fonte: Buratto et al., 2017).....	85
Figura 4.1 - Ilustração conceitual de um processo de Cadeias de Markov (Fonte: Ranjith et al., 2013).....	92
Figura 5.1 - Informações de inspeção rotineira de laje de ponte e avaliação da condição atual.....	101
Figura 5.2 - Fotos da laje da Ponte sobre o Rio dos Cachorros (Fonte: ANTT).....	101
Figura 5.3 - Dados que demonstram recondicionamento no vigamento de uma ponte.....	104
Figura 5.4 - Dados gerais para a avaliação de uma rede de pontes.....	106
Figura 5.5 - Dados básicos para o cadastro de cada ponte.....	107
Figura 5.6 - Registro de ICs no código desenvolvido.....	107
Figura 6.1 - Mapa de localização do trecho de concessão BR-101/ES.....	110
Figura 6.2 - Distribuição percentual das OAEs da concessão rodoviária BR-101/ES.....	111
Figura 6.3 - Distribuição percentual das pontes e viadutos da BR-101/ES, segundo o sistema estrutural.....	112
Figura 6.4 - Idade versus Índice de Condição para cada componente de ponte.....	113
Figura 6.5 - Dados de condição válidos para uso de modelo determinístico.....	114
Figura 6.6 - Probabilidades de transição para as Lajes.....	116
Figura 6.7 - Curva de Deterioração das Lajes usando o modelo de Markov.....	116
Figura 6.8 - Ajuste dos dados das lajes usando a técnica de regressão não linear (polinómio de grau 3).....	117
Figura 6.9 - Gráfico comparativo entre as curvas de deterioração das componentes e as pontes como um todo.....	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Colapsos de pontes brasileiras (Fonte: Internet; Vitório, 2007).....	22
Tabela 1.2 - Características das pontes federais (Adaptado: DNIT, 2004a; Santos, 2016).....	24
Tabela 1.3 - Frota de veículos por região do Brasil 2007/2017 (Fonte: CNT, 2017) .	24
Tabela 2.1 - Colapsos de pontes no mundo (Adaptado de Almeida, 2013)	31
Tabela 2.2 - Projetos de investigação europeus (Fonte: Almeida, 2013; Woodward et al., 2001; Brady et al., 2004)	33
Tabela 2.3 - Categorização dos Sistemas de Gestão de Pontes sobre diversos pontos de vista (Fonte: Almeida, 2013).....	37
Tabela 2.4 - Escala de classificação da condição da NBI	44
Tabela 3.1 - Empresas concessionárias no Brasil por estado (Fonte: Martinez, 2016)	73
Tabela 3.2 - Composição do SGO	80
Tabela 3.3 - Índices de Condição (ICs) detectados nas inspeções (Fonte: DNIT, 2004b).....	84
Tabela 3.4 - Classificação da condição de OAEs segundo os parâmetros estrutural, funcional e de durabilidade (Fonte: ABNT, 2016)	86
Tabela 3.5 - Classificação de condição segundo a especificação técnica da ARTESP	87
Tabela 3.6 - Modelo e exemplo de aplicação	88
Tabela 4.1 - Correspondência entre ICs, Estados e Probabilidades de Transição ...	90
Tabela 4.2 - Exemplo de matriz de transição com probabilidades para um processo de quatro estados de condição (Fonte: Ranjith et al., 2013).....	92
Tabela 5.1 - Alguns dados básicos de pontes da BR-101/ES	100
Tabela 5.2 - Índices de Condição de uma amostra de pontes da BR-101/ES.....	102
Tabela 5.3 - Exemplos de pontes com dados de condição a ser filtrados.....	103
Tabela 5.4 - Relações entre ICs, Estados de Condição e Probabilidades de Transição para o sistema proposto	105
Tabela 6.1 - Número e tipo de OAEs na BR-101/ES.....	111
Tabela 6.2 - Tipologias estruturais usadas nas pontes e viadutos da BR-101/ES ..	112
Tabela 6.3 - Número de Transições de Estado para as Lajes	115
Tabela 6.4 - Probabilidades transitórias das Lajes para alguns tempos	115

Tabela 6.5 - Índices de condição esperados nas lajes para dentro de 1, 3 e 5 anos

..... 119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	: <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	: Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANN	: <i>Artificial Neural Network</i> (Redes Neurais Artificiais)
ANTT	: Agência Nacional de Transportes Terrestres
ARTESP	: Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo
BCI	: Bridge Condition Index (Índice de Condição de Ponte)
BMS	: <i>Bridge Management System</i> (Sistema de Gestão de Pontes)
BRIDGIT	: <i>BRIDGE Information Technology</i>
BRIME	: <i>BRIDGE Management in Europe</i>
CBR	: <i>Case-Based Reasoning</i> (Raciocínio Baseado em Casos)
CCV	: Custo do Ciclo de Vida
CNT	: Confederação Nacional do Transporte
CR	: <i>Condition Rating</i> (Classificação de condição)
DANBRO	: <i>DANish Bridges and ROads</i>
DENATRAN	: Departamento Nacional de Trânsito
DER	: Departamento de Estradas de Rodagem
DER-SP	: Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DNIT	: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EPL	: Empresa de Planejamento e Logística S.A.
EUA	: Estados Unidos da América
FHWA	: <i>Federal Highway Administration - U.S. Department of Transportation</i>
HiSMIS	: <i>Highway Structures Management Information System</i>

IA	: Inteligência Artificial
IABMAS	: <i>International Association for Bridge Maintenance And Safety</i>
IC	: Índice de Condição
IPR	: Instituto de Pesquisas Rodoviárias
LSM	: <i>Level of Service Method</i> (Método do Nível de Serviço)
MATLAB	: <i>MATrix LABoratories</i>
MINFRA	: Ministério da Infraestrutura do Brasil
MTO	: <i>Ministry of Transportation of Ontario</i>
MPT	: Matriz de Probabilidades de Transição
MTPA	: Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil
MR&R	: Manutenção, Reparo e Reabilitação
NBI	: <i>National Bridge Inventory</i>
NBIS	: <i>National Bridge Inspection Standards</i>
NCHRP	: <i>National Cooperative Highway Research Program</i>
OAE	: Obra de Arte Especial
OBMS	: <i>Ontario Bridge Management System</i>
OLS	: <i>Ordinary Least Squares</i> (Mínimos Quadrados Ordinários)
PNV	: Plano Nacional de Viação
PONTIS	: <i>Preservation, Optimisation and NeTwork Information System</i>
PROARTE	: Programa de Manutenção e Reabilitação de Estruturas
SENAT	: Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte
SEST	: Serviço Social do Transporte
SEV	: Sistema Estadual de Viação
SFV	: Sistema Federal de Viação

SGO : Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais

SGPo : Sistema de Gestão de Pontes

SIMOV : Sistema de Monitoramento de Obras Viárias

SMV : Sistema Municipal de Viação

SNTT : Secretaria Nacional de Transportes Terrestres

SNV : Sistema Nacional de Viação

USDOT : *US Department of Transportation*

VMDAT : Volume Médio Diário Anual de Tráfego

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. Contextualização	20
1.2. Objetivos da pesquisa	25
1.2.1. Objetivo geral	25
1.2.2. Objetivos específicos.....	25
1.3. Justificativa.....	26
1.4. Organização do trabalho	27
2. GESTÃO DE PONTES – ESTADO DA ARTE	29
2.1. Antecedentes históricos.....	30
2.2. Sistemas de gestão de pontes (SGPo).....	34
2.2.1. Conceituação	34
2.2.2. Filosofias de gestão.....	35
2.2.3. Categorização dos sistemas de gestão.....	36
2.3. Desenvolvimento do sistema	37
2.4. Técnicas de análise.....	41
2.4.1. Medidas de desempenho	41
2.4.2. Modelos de deterioração	45
2.4.2.1. Modelos determinísticos.....	46
2.4.2.2. Modelos estocásticos	49
2.4.2.3. Modelos de inteligência artificial.....	52
2.4.3. Modelos de otimização.....	52
2.5. Sistemas implementados no exterior	53
2.5.1. América do Norte	54
2.5.1.1. PONTIS (EUA)	54
2.5.1.2. BRIDGIT (EUA)	57
2.5.1.3. OBMS (Canadá).....	59
2.5.2. Europa.....	61
2.5.2.1. DANBRO (Dinamarca)	61
2.5.2.2. HiSMIS (Reino Unido)	63
2.5.2.3. SIB-Bauwerke (Alemanha)	64
3. SITUAÇÃO DA GESTÃO DE PONTES NO BRASIL	67

3.1. Composição da malha rodoviária e administração da infraestrutura.....	67
3.1.1. Rodovias Federais	68
3.1.2. Rodovias Estaduais.....	71
3.1.3. Rodovias Municipais.....	74
3.2. Documentos de referência para a gestão	74
3.3. Cadastro de inventário e dados de inspeções	75
3.3.1. OAEs sob jurisdição Federal	79
3.3.2. OAEs sob jurisdição do Estado de São Paulo.....	82
3.4. Classificação da condição das obras.....	83
3.5. Plano geral de intervenção.....	87
4. MODELAGEM DA DETERIORAÇÃO USANDO CADEIAS DE MARKOV	89
4.1. O processo de Markov	89
4.2. Modelo de Cadeias de Markov	91
4.3. Formulação matricial da cadeia de Markov	94
4.3.1. Método de frequência percentual	94
4.3.2. Método de otimização baseado em regressão	95
5. PROPOSTA METODOLÓGICA PARA SISTEMA QUE AVALIA A CONDIÇÃO DE PONTES RODOVIÁRIAS FEDERAIS	96
5.1. Características gerais do sistema	97
5.2. Módulos do sistema	98
5.2.1. Categorização das obras.....	99
5.2.2. Inventário.....	99
5.2.3. Inspeção e condição.....	101
5.2.4. Análise dos dados	102
5.2.5. Previsão do desempenho	104
5.3. Código computacional.....	105
6. APLICAÇÃO DE METODOLOGIA E CÓDIGO COMPUTACIONAL EM ESTUDO DE CASO	109
6.1. Informação geral sobre a BR-101/ES.....	109
6.2. Caracterização das OAEs	110
6.3. Características da amostra de estudo.....	112
6.4. Resultados	114
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	120

7.1. Sobre a situação da gestão de pontes no Brasil.....	120
7.2. Sobre a metodologia proposta e o código computacional.....	121
7.3. Sobre os resultados do Estudo de Caso.....	122
7.4. Sobre trabalhos futuros.....	123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126
APÊNDICE A.....	132
APÊNDICE B.....	134
APÊNDICE C.....	137
APÊNDICE D.....	141
APÊNDICE E.....	156
APÊNDICE F.....	158
APÊNDICE G.....	161
ANEXO A.....	164
ANEXO B.....	167

1. INTRODUÇÃO

As pontes e viadutos são definidas como estruturas cuja principal função é transpor obstáculos de qualquer natureza e em diferentes níveis ao longo do seu trajeto. Estas estruturas são consideradas Obras de Arte Especiais (OAEs) e se destacam por dar continuidade à malha rodoviária de um país, daí que estas obras resultam de elevada importância para o desenvolvimento social e econômico das comunidades conectadas.

Estas obras merecem atenção especial devido à complexidade na sua concepção, assim como por todas as ameaças intrínsecas e externas que podem acontecer ao longo do seu ciclo de vida. A falta de manutenção adequada pode afetar a sua segurança, funcionalidade e durabilidade, podendo provocar, inclusive, a interdição, o colapso parcial ou total de uma ponte. À vista disso, é de suma importância que as entidades responsáveis por sua administração sejam capazes de implementar procedimentos e técnicas completas, simples e eficientes para avaliar as condições das pontes existentes, de tal modo que ofereçam estruturas ainda mais seguras, funcionais e duráveis, desde a sua concepção até o final do seu tempo de vida útil.

As experiências estrangeiras sugerem a implementação de um Sistema de Gestão de Pontes (SGPo), um conjunto ordenado de normas e procedimentos para auxiliar aos administradores das obras na tomada de decisões. Amparada tanto na avaliação do estado de condição como no desempenho das construções em funcionamento, a tomada de decisões deve ser fruto da escolha dos programas de intervenção mais adequados a cada projeto, ou seja, a escolha sensata entre trabalhos de manutenção, reabilitação, reparação ou substituição. Para cumprir com esses propósitos deve-se priorizar e otimizar as intervenções para não ultrapassar os recursos disponíveis.

Porém, é preciso mencionar que o sucesso de um bom controle e administração das OAEs não só depende da elaboração da parte técnica. Um sistema de gestão de pontes não cumprirá seus objetivos se não são previamente estabelecidas políticas que permitam suportar com recursos suficientes a continuidade dos trabalhos de vistorias, o registro das informações recolhidas e todas as análises e resultados posteriores.

1.1. Contextualização

Segundo o Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil, a malha rodoviária brasileira compreende 196.601 km de rodovias pavimentadas e 1.239.254 km de rodovias não pavimentadas (MTPA/EPL, 2017). Em termos de movimentação de cargas e pessoas, o transporte rodoviário no Brasil tem uma participação de mais de 61% na matriz de transporte de cargas, e de 95% na de passageiros, além de ser o principal meio de integração do país (CNT, 2017).

O controle da infraestrutura rodoviária no Brasil corre por conta de entidades federais, estaduais, municipais, além de iniciativas privadas responsáveis pelos trechos de rodovias concessionadas ou delegadas. No caso da malha rodoviária federal, implantada a partir da década de 40, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) é o órgão responsável da projeção, execução e administração das OAEs sob sua jurisdição, incluindo pontes, túneis, viadutos e passarelas. Na figura 1.1 pode-se observar a extensão e divisão da malha rodoviária nacional, assim como a condição de pavimentação das rodovias federais entre os anos de 2010 e 2016.

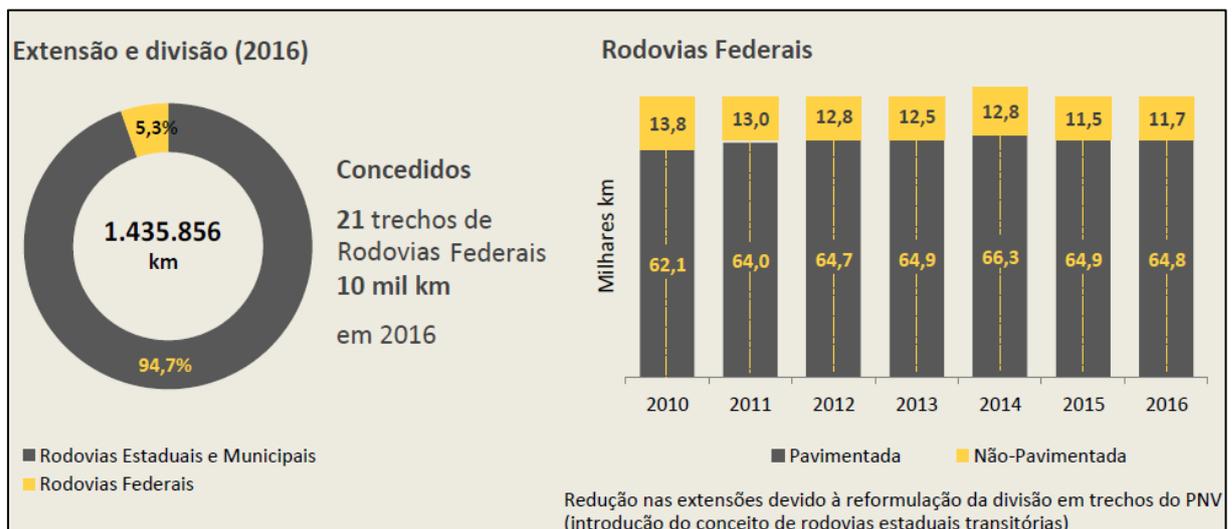


Figura 1.1 - Malha rodoviária no Brasil (Fonte: MTPA/EPL, 2017)

Estas estatísticas e o fato das pontes serem componentes essenciais da infraestrutura rodoviária só confirmam o destaque destas construções para o crescimento socioeconômico do país. Dentro do âmbito nacional, não se tem dados estatísticos que relacionem os comprimentos e os capitais investidos nas pontes com

os respectivos valores da malha rodoviária à qual pertencem. Por exemplo, no caso das pontes europeias, alguns autores (Woodward et al., 2001; Brady et al., 2004) demonstram que as pontes representam aproximadamente 2% do comprimento da rede rodoviária e cerca de 30% do valor do seu investimento. É claro que as características e condições de cada país são variáveis, mas essa diferença percentual ainda sugere a grande importância das pontes dentro de uma infraestrutura viária.

As pontes e viadutos, durante seu ciclo de vida, estão sujeitos a vários fatores que podem diminuir as características que devem oferecer aos usuários: segurança, funcionalidade e durabilidade. A falta ou atraso no início dos trabalhos de intervenção, sejam de manutenção, reparação, reabilitação ou substituição; além de ir em detrimento da obra, tornam os trabalhos mais complexos e onerosos (Vitório, 2006). A lei de evolução dos custos, conhecida como Lei De Sitter (1984), indica que os custos de correção crescem por etapas segundo uma progressão geométrica de razão cinco. Na figura 1.2 pode-se observar a aplicação da Lei de Sitter para diferentes etapas da vida útil em uma estrutura.

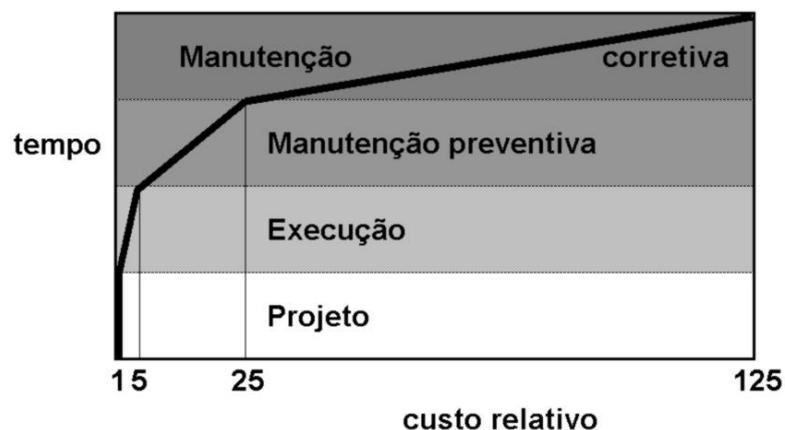


Figura 1.2 - Lei de evolução de custos, Lei de Sitter (Fonte: Vitório, 2006)

Numerosos casos de colapsos de pontes aconteceram no Brasil, com desabamento parcial ou total das estruturas; inclusive, na maioria das vezes, provocaram a perda de vidas humanas. Esses eventos desastrosos têm influenciado a sociedade, exigindo construções cada vez mais seguras, duráveis e funcionais; assim como também têm dirigido o interesse dos pesquisadores na produção de investigações e avanços na área da gestão e avaliação de pontes. A tabela 1.1 lista algumas pontes que colapsaram no Brasil nas últimas décadas e as suas causas prováveis.

Tabela 1.1 - Colapsos de pontes brasileiras (Fonte: Internet; Vitório, 2007)

Ano	Estado	Ponte	Mortes	Causa provável
1990	Pernambuco	Ponte na PE-120	n.d.	Tombamento de muro de arrimo em extremidade
2000	Pernambuco	Ponte sobre Rio Pirangi	n.d.	Ruptura de um apoio durante cheia
2005	Paraná	Ponte sobre Represa Capivari	1	Instabilidade do solo de fundação
2009	Espírito Santo	Ponte Getúlio Vargas sobre Rio Doce	1	Desgaste por enchentes
2010	Rio Grande do Sul	Ponte sobre Rio Jacuí	5	Capacidade resistente insuficiente
2013	São Paulo	Ponte sobre Rio Piracicaba	5	Falhas de construção

Os problemas mais recorrentes em pontes são devidos ao processo natural de envelhecimento e à degradação de seus materiais constitutivos ao longo do tempo. Nesse sentido, a situação geográfica e climática, própria de cada lugar, são fatores muito influentes para o estado de conservação, sobretudo à medida que aumenta a idade de uma construção. O estudo de Mendes (2009) conseguiu caracterizar 5.619 pontes federais revelando que, excluídas as obras com idades desconhecidas, 70% do montante de 3.306 obras supera a idade de 30 anos (ver figura 1.3).

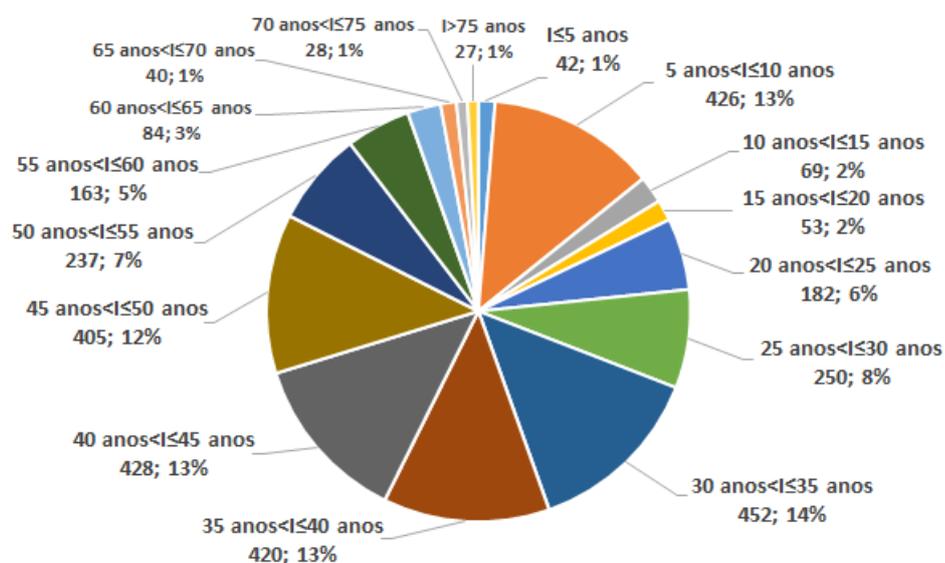


Figura 1.3 - Distribuição de 3.306 pontes federais por faixa de idade (Fonte: Mendes, 2009)

Além disso, alguns tipos de anomalias e manifestações patológicas se agravam com o aumento da idade nas pontes. A figura 1.4 exibe apenas uns exemplos: a) Deslocamento de cobertura de concreto e armaduras expostas e corroídas; b) Erosão de uma fundação; c) Aparelho de apoio com rompimento lateral; d) Junta de dilatação com fissuras e recoberta por asfalto.



Figura 1.4 - Algumas anomalias e manifestações patológicas em pontes

Outras condições que aumentam a importância dos trabalhos de manutenção e intervenção são devidas ao perfil heterogêneo das obras de infraestrutura. Pontes com diversidade etária, projetos com diferentes considerações de tráfego e capacidades de carga, dimensionamentos e detalhes que, em alguns casos, já não são mais aceitos, assim como uma grande variedade de considerações no seu projeto e execução, devido à evolução das normas técnicas brasileiras (Mendes, 2009). Por exemplo, pode-se mencionar que existe um grande número de pontes projetadas e construídas na década de 60 que utilizam o aço CAT 50, material de construção com espiras deficientes e sem a consideração da fadiga (DNIT, 2004a).

A tabela 1.2 mostra algumas características ligadas aos projetos de pontes das rodovias federais que têm mudado ou evoluído no tempo, segundo informações

apresentadas no Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias (DNIT, 2004a) e no artigo de Santos (2016). As obras, divididas por faixa etária, são relacionadas às normas usadas no seu dimensionamento, às cargas móveis de desenho e à largura da seção transversal típica das obras. A tabela 1.3 permite verificar o notável aumento do volume de tráfego nas rodovias nacionais, entre os anos de 2007 e 2017.

Tabela 1.2 - Características das pontes federais (Adaptado: DNIT, 2004a; Santos, 2016)

Ano de construção	Normas Brasileiras	Cargas móveis	Largura total (m)
Até 1950	NB-1/1946, NB-2/1946 e NB-6/1946	Compressor de 24tf, caminhões de 9tf e multidão 450kgf/m ²	8,30
1951 a 1960	NB-1/1946, NB-2/1946 e NPER/1949	Compressor de 24tf, caminhões de 12tf e multidão 500kgf/m ²	8,30
1961 a 1975	NB-1/1960, NB-2/1960 e NB-6/1960	Veículo de 36tf, multidão de 500kgf/m ² e 300kgf/m ²	10,00
1976 a 1985	NB-1/1978, NB-2/1960 e NB-6/1960	Veículo de 36tf, multidão de 500kgf/m ² e 300kgf/m ²	≥ 10,8
Depois de 1985	NB-1/1978, NB-2/1987 e NB-6/1982 (NBR 7188/84)	Veículo 45tf, multidão de 500kgf/m ² e 300kgf/m ²	12,80

Tabela 1.3 - Frota de veículos por região do Brasil 2007/2017 (Fonte: CNT, 2017)

Região	2007	2017	Crescimento 2007-2017 (%)
Brasil	46.937.138	95.009.183	102,40%
Norte	1.782.855	4.901.882	174,90%
Nordeste	6.064.683	16.252.901	168,00%
Sudeste	24.936.282	46.354.096	85,90%
Sul	10.140.670	18.771.864	85,10%
Centro-Oeste	4.012.648	8.818.440	119,80%

Por último, tampouco se pode deixar de considerar a geração de danos nas pontes ou, inclusive, o agravamento de defeitos e ou patologias pré-existentes por ação de fenômenos naturais ou acidentes acarretados pelo homem.

As pontes e viadutos no Brasil não estão isentos dos impactos negativos provocados pelos problemas e ou considerações discutidas nos parágrafos anteriores. O controle de suas obras obriga a necessidade de se aplicar sistemas de gestão de pontes práticos, eficientes e dinâmicos, não só para garantir estruturas de pontes seguras e funcionais, mas também para levar em consideração que os orçamentos públicos são limitados e precisa-se de uma alocação de recursos otimizada.

1.2. Objetivos da pesquisa

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho de pesquisa é apresentar uma metodologia que permita relacionar atividades e procedimentos técnicos usados no Brasil, além de um modelo de previsão da deterioração, para avaliar o estado de condição de um projeto ou rede de pontes existentes de concreto estrutural.

1.2.2. Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral estabelecido, este trabalho persegue os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o Estado da Arte dos Sistemas de Gestão de Pontes mais completos e que atualmente estão operando em outros países. Esta revisão deverá incluir as metodologias, a estrutura organizacional, as funcionalidades, as técnicas (modelos de desempenho e modelos de custos), aplicadas para avaliar e gerenciar o estado de suas construções;
- Revisar algumas medidas de desempenho usadas por administradoras estrangeiras para quantificar ou qualificar a condição de elementos ou projetos de pontes;
- Identificar os recursos, regulamentos, procedimentos e técnicas utilizadas pelas autoridades brasileiras para a gestão e avaliação das pontes sob sua jurisdição, de tal forma que permitam entender os pontos fortes, as deficiências, se façam comparações entre sistemas e, assim, ajudem a proporcionar informações para determinar futuros desenvolvimentos;

- Estudar a teoria de um modelo estocástico de deterioração que usa a técnica de Cadeias de Markov para estimar o processo de deterioração de uma ponte ao longo do tempo;
- Propor uma metodologia para avaliar o estado de condição de pontes e viadutos da malha rodoviária federal do Brasil, em conformidade com as características, fatores e ameaças que envolvem nossas redes de pontes;
- Desenvolver um código computacional em MATLAB que permita registrar informações básicas e dados de inspeções regulares em pontes e viadutos de um trecho viário para, após, realizar a análise dos dados e usar o modelo estocástico de Markov para prever o desempenho dessas construções;
- Realizar um estudo de caso com as pontes e viadutos de um trecho rodoviário federal brasileiro, após a coleta de dados de condição disponibilizados por alguma entidade administradora de OAEs.

1.3. Justificativa

Podem se mencionar as seguintes razões que respaldam a importância do presente estudo:

- O envelhecimento das OAEs da rede rodoviária brasileira, com uma grande porcentagem dessas obras superando a idade de trinta anos, requerem a previsão do seu desempenho através do tempo. Isso, junto a políticas adequadas ajudará a manter ou melhorar a segurança e funcionalidade das obras oferecidas aos usuários, bem como evitará que os administradores aumentem suas despesas por reparo de danos ou defeitos não previstos;
- O transporte rodoviário no Brasil continua sendo o principal meio de movimentação de mercadorias e pessoas. Portanto, resulta imprescindível concentrar os esforços para garantir o normal funcionamento das OAEs e, por consequência, contribuir na continuidade da malha rodoviária, proporcionando conforto aos usuários e beneficiando as relações humanas, econômicas e comerciais da sociedade;
- Cada organização administrando um conjunto de OAEs requer a implementação de metodologias que permitam avaliar o estado dessas obras

de maneira simples, eficiente e dinâmica, seja à nível de um projeto individual e a nível de uma rede de pontes. Dessa forma, tempos de análise mais curtos e um menor uso de recursos técnicos e financeiros podem ser alcançados, em comparação com análises que precisam maiores recursos, tempos e são mais complexos para avaliar a condição de cada ponte de uma rede;

- No Brasil não se tem um banco de dados centralizado e completo que inclua os dados e arquivos coletados durante todo o ciclo de vida das obras de arte espalhadas no território nacional. Esta situação deveria mudar com o tempo, já que ajudaria a compartilhar informações e conhecimentos através de uma base de dados comum;
- Ainda as entidades responsáveis das pontes e viadutos brasileiros não tem um sistema que avalie e administre suas obras aproveitando as vantagens de um modelo de deterioração. A previsão adequada da condição das pontes permitirá às autoridades preparar programas de investimento público ou privado a curto, médio e longo prazo para suprir as necessidades de intervenção, tendo em conta como devem ser alocados os recursos disponíveis.

1.4. Organização do trabalho

No capítulo 2 é apresentado o Estado da Arte sobre a gestão de pontes e viadutos rodoviários. Inclui as características, regulamentos, procedimentos, atividades e técnicas usadas para estimar a degradação das OAEs e como administram a demanda de ações de intervenção sobre as obras. Alguns dos principais SGPO internacionais, de sucesso e em pleno funcionamento, são tratados nesta parte, cobrindo em grande medida os pontos descritos acima.

No capítulo 3 descrevem-se as informações mais importantes sobre como as administradoras brasileiras de pontes e viadutos rodoviários abordam o gerenciamento de suas obras, permitindo uma visão geral sobre as especificidades, os atributos e as deficiências que atualmente ostentam.

No capítulo 4 é abordado com maior detalhe a teoria a respeito da aplicabilidade do modelo de Markov para o cálculo da deterioração das estruturas. As principais suposições e características da modelagem usando o método de Cadeias

de Markov são tratadas; além de falar sobre duas técnicas conhecidas para definir cada elemento da matriz que representa a probabilidade que um elemento transite ou permaneça em um estado de condição.

Baseados no conteúdo dos capítulos precedentes deste trabalho, o capítulo 5 tenta apresentar uma metodologia simples e ordenada para avaliar o estado de condição das OAEs de concreto de qualquer trecho rodoviário federal do Brasil. Em paralelo, apresentam-se as características gerais de um código computacional desenvolvido usando o *software* MATLAB, o mesmo que segue as considerações da metodologia sistemática proposta.

No capítulo 6 é apresentado um estudo de caso que procura testar e validar a metodologia do sistema e o código de computador desenvolvido no capítulo precedente. São mostradas as características das pontes e viadutos de um trecho concessionado de rodovia federal, e os resultados depois da avaliação de seus dados de condição, fornecidos graças à colaboração da ANTT.

Finalmente, no capítulo 7 são discutidas as conclusões, recomendações e resultados a que se chegou com os tópicos tratados nos diferentes capítulos deste trabalho; terminando com o delineamento de algumas recomendações para a realização de futuros trabalhos.

2. GESTÃO DE PONTES – ESTADO DA ARTE

Um fato indiscutível que está relacionado à maioria das obras de arte especiais foi que, até décadas recentes, consideráveis esforços estiveram focados no desenvolvimento de novos padrões e códigos para a concepção de novas estruturas. Existia pouco interesse no desenvolvimento de documentos que orientassem sobre a avaliação das estruturas existentes, mas essa situação mudou nas últimas três décadas através do aumento apreciável de trabalhos de investigação, programas internacionais de cooperação técnica, congressos, conferências, diretrizes e normas orientadas ao campo da gestão de pontes.

Atualmente, os diferentes processos para a gestão de pontes formam parte de metodologias sistemáticas que são reconhecidas como indispensáveis para garantir a segurança e funcionalidade de um conjunto de pontes, desde a concepção dos projetos até o final de suas vidas úteis. É assim que os Sistemas de Gestão de Pontes (SGPo) estão sendo desenvolvidos em vários países, por intermédio das entidades públicas ou privadas ligadas ao setor de transportes, centros de investigação, instituições de ensino superior e, inclusive, mediante programas de cooperação internacional. Cabe ressaltar que muitos dos atuais SGPo são usados não só para pontes, mas também para galerias (bueiros), túneis, muros de contenção e outras estruturas.

Nesta seção será apresentado o Estado da Arte na administração e controle de pontes rodoviárias existentes mediante Sistemas de Gestão, ferramentas implementadas pelas nações mais desenvolvidas para avaliar e gerenciar o estado de um conjunto de OAEs. Serão enfatizadas as características gerais e mais comuns destes sistemas, desde o ponto de vista geral da sua conceituação, seus objetivos principais, sua estrutura organizacional, suas metodologias e as técnicas de análises. Dentre essas técnicas serão abordadas as medidas de desempenho, os métodos para modelar o processo de deterioração e os custos gerados durante o ciclo de vida das pontes, necessários para otimizar a tomada de decisões. Além do mais, as especificidades de alguns dos mais relevantes sistemas estrangeiros serão apresentadas neste capítulo.

2.1. Antecedentes históricos

Pode-se dizer que o colapso acontecido no ano de 1967 no Silver Bridge, estrutura que conectava West Virginia com Ohio nos Estados Unidos da América (EUA), incentivou o aumento de práticas para a inspeção e gestão de pontes (Small et al., 1999). A falha dessa estrutura foi o resultado da ruptura instantânea de uma barra de olhal que provocou a morte de 46 pessoas. Inclusive, as investigações demonstraram que a construção não tinha passado por adequados trabalhos de manutenção e que, no momento do fatal acidente, a ponte estava recebendo mais carga da considerada no seu desenho. Na figura 2.1 se pode apreciar a magnitude da ponte Silver Bridge quando estava em operação e, como após a queda, ficou grande parte dela em ruínas.



Figura 2.1 - Silver Bridge, antes e após o acidente de 1967 (Fonte: <https://structurae.net/en/structures/silver-bridge>)

Depois do trágico acontecimento com a Silver Bridge, o congresso americano solicitou ao Departamento de Transportes dos EUA o desenvolvimento e implementação de normas para a inspeção de pontes. Foi assim que a Federal Highway Administration (FHWA) respondeu às demandas publicando no início da década de 70 as normas americanas para a inspeção de pontes (National Bridge Inspection Standards – NBIS) e criou um banco de dados de abrangência nacional (National Bridge Inventory – NBI).

Outros desabamentos ocorridos em diferentes locais do mundo, como os referidos na tabela 2.1, tiveram um grande impacto na sociedade e impulsionaram novos desenvolvimentos na área da gestão de pontes, incluindo, obviamente, a parte específica de avaliação da condição.

Tabela 2.1 - Colapsos de pontes no mundo (Adaptado de Almeida, 2013)

País	Ano	Ponte	Mortes	Causa provável
USA	1967	Silver Bridge (ponte suspensa com cerca de 40 anos)	46	Secção insuficiente e corrosão
França	1978	Ponte Wilson sobre o rio Loire (arcos de alvenaria)		Erosão em fundações
USA	1983	Ponte do rio Mianus		Fadiga do aço e ligações metálicas
USA	1987	Ponte <i>Schoharie Creek</i> e outras		Erosão em fundações
Coreia do Sul	1994	Ponte Seongsu	31	Problemas nas ligações soldadas
China	1999	Ponte arco-íris (de pedestres)	49	Abandono e falta de qualidade do aço
Portugal	2001	Ponte Hintze Ribeiro	59	Erosão em fundações
Canadá	2006	PS Concorde Boulevard	5	Rotura por corte num apoio
China	2007	Ponte Tuo River	34	Falta de reforço de aço
USA	2007	Ponte Minneapolis I-35W	12	Capacidade resistente insuficiente
USA-Canadá	2013	Ponte I-5 bridge sobre o rio Skagit		Impacto de um veículo pesado
Itália	2018	Ponte Morandi	43	Fadiga estrutural



Figura 2.2 - Desabamento de ponte em Minneapolis em 2007 (Fonte: internet)

Posteriormente, com o advento da informática no começo da década de 80, os dados e procedimentos para administrar as obras de arte passaram do papel para o computador, propiciando uma vantagem importante, o processamento da informação de uma maneira mais rápida e organizada. Inicialmente, esses sistemas computadorizados para a gestão de pontes estavam constituídos por bancos de dados para o armazenamento das informações coletadas e avaliações simples de deficiências.

No início dos anos 90, foram implementados nos EUA dois programas comerciais para a gestão de pontes, o *PONTIS*, desenvolvido pelo FHWA e, o *BRIDGIT*, pelo NCHRP. Desde as suas versões iniciais muitas modificações foram implementadas, no entanto, os procedimentos de otimização matemática não foram significativamente modificados. Atualmente, o *PONTIS* se mantém como o sistema que tem recebido ampla aceitação dos departamentos estaduais de transporte nos EUA.

As metodologias adotadas pelos diferentes sistemas de gestão são muito diversificadas, bem como a sua estruturação e as suas funcionalidades, resultado da diversidade dos próprios conjuntos de pontes, dos países envolvidos e do tipo de entidades que os desenvolvem (Almeida, 2013). As experiências positivas durante o funcionamento destes sistemas permitem reconhecê-los como fundamentais para melhorar a segurança e funcionalidade das obras de arte durante todo o seu tempo de vida útil.

Nas últimas duas décadas as investigações na área da gestão de pontes têm aumentado consideravelmente, não só na América do Norte, bem como também na Europa e Ásia. Devido ao grande espectro de temas derivados dessa área de pesquisa, os projetos de investigação e cooperação cumprem um papel importante na hora de integralizar os estudos relativos a cada tema constituinte dos sistemas de gestão.

Pode-se observar na tabela 2.2 uma lista com alguns projetos de investigação e cooperação entre instituições públicas e ou privadas de várias nações europeias que têm sido produzidas nas últimas décadas. A tabela 2.2 também inclui uma pequena descrição dos objetivos e os temas principais que são abordados por cada uma das investigações.

Tabela 2.2 - Projetos de investigação europeus (Fonte: Almeida, 2013; Woodward et al., 2001; Brady et al., 2004)

Designação Data	Entidades	Obras visadas	Objetivos e principais temáticas abordadas
BRIME <i>Bridge Management in Europe</i> 1998 - 1999	TRL (UK) BAST (Alemanha) CEDEX (Espanha) LCPC (França) NPRA (Noruega) ZAG (Eslovénia)	Sistemas de Gestão de Obras de Arte associadas a redes rodoviárias	Classificação das componentes das obras. Avaliação da capacidade de carga e fiabilidade estrutural. Implementação de monitorização e inteligência artificial. Análise de custo-benefício no âmbito da decisão.
COST345 1999-2003	Diversos países europeus	Pontes, túneis e muros de suporte a funcionar em vias rodoviárias	Inspeção, avaliação, manutenção e reparação. Caracterização dos parques de pontes rodoviárias europeias. Avaliação dos custos e receitas de utilização da gestão de obras de arte (manutenção, inspeção, reconstrução).
LIFECON 2001-2003	Finlândia Noruega Alemanha	Estruturas de betão como pontes e túneis	RAMS - Reliability, Availability, Maintainability, Safety. Exigências humanas, económicas, culturais e ecológicas. Necessidades de manutenção, reparação e modernização. Gestão de ciclo de vida de infraestruturas de betão.
Sustainable Bridges 2003-2007	Universidades, administrações e consultores (inc. Portugal)	Pontes ferroviárias	Inspeção, ensaio, monitorização e conservação. Alargar a vida útil das pontes existentes. Melhorar os sistemas de reparação e reforço de pontes. Aumentar a capacidade de carga e a velocidade de circulação na rede ferroviária europeia.
ETSI 2006-2012	Finlândia Noruega Suécia Dinamarca	Pontes rodoviárias	Custo de ciclo de vida de pontes. Custos ambientais. Valor estético e cultural das pontes.
InnoTrack 2006-2010	Donos de obras, indústrias e universidades	Infraestruturas ferroviárias	Diminuir os custos do ciclo de vida (em cerca de 30% até ao ano de 2020) e aumentar o RAMS (Reliability, Availability, Maintainability and Safety).
DuratiNet 2007-2013	Administrações, universidades e laboratórios da Europa Atlântica (inc. Portugal)	Infra-estruturas de transportes no Espaço Atlântico	Durabilidade das infraestruturas de transportes. Degradação dos materiais estruturais em regiões costeiras. Base de dados (materiais, danos, processos de deterioração, técnicas de inspeção e de reabilitação).
SBRI 2009-2012	Administrações, universidades e laboratórios (inc. Portugal)	Pontes metálicas	Lifecycle Assessment – avaliação de ciclo de vida. Lifecycle Cost – custos de ciclo de vida. Lifecycle Performance – desempenho no ciclo de vida.

É interessante mencionar que os SGPo começaram a aparecer em paralelo com os Sistemas de Gestão de Vias, entre os quais incluem tanto os sistemas relacionados com as redes rodoviárias quanto as redes ferroviárias (Mirzaei et al., 2012). Assim, estima-se que futuros desenvolvimentos englobarão diversos sistemas em um só sistema, facilitando a administração e avaliação de toda a infraestrutura de uma rede viária.

2.2. Sistemas de gestão de pontes (SGPo)

2.2.1. Conceituação

A gestão de pontes e viadutos é um processo completo que liga a inspeção e avaliação da ponte com as necessidades da sociedade e as fontes de financiamento para planejar, priorizar, financiar, organizar, ou adequar a operação, manutenção, reabilitação, modernização e substituição de uma ponte. Considera todas as atividades que acontecem durante a vida útil de uma obra de arte especial (OAE), desde o seu projeto e construção, até uma possível substituição, combinando práticas de diversas áreas como a administração, economia, finanças, engenharia, e outras, aplicadas para proporcionar segurança e funcionalidade da forma mais eficaz em termos de custos.

Um Sistema de Gestão de Pontes é uma ferramenta que auxilia aos responsáveis pelas OAEs atribuindo-lhes a capacidade de selecionar a atividade correta, na ponte certa, no tempo adequado e com o custo justo, considerando esta ferramenta como fundamental para preservar, em geral, a infraestrutura de transporte e, em particular, as pontes rodoviárias de uma jurisdição (FHWA, 2010). Para atingir esses objetivos, um SGPo deve incluir procedimentos sistematizados para coleta, processamento e atualização de dados, e recorrer a modelos matemáticos que permitam a previsão da deterioração, identificação de alternativas de intervenção, previsão de custos, determinação de políticas ótimas, previsão das necessidades financeiras a curto e longo prazo e recomendação de planos de ação que sejam consistentes com as limitações políticas e orçamentárias.

Um sistema de gestão de OAEs tem os seguintes objetivos principais, em ordem decrescente de importância:

- Garantir a segurança dos usuários e de terceiros;

- Assegurar um nível de serviço adequado, variável em conformidade com a importância e a classificação das vias;
- Assegurar a conservação do patrimônio a longo prazo e a custos apropriados.

2.2.2. Filosofias de gestão

Existem duas filosofias ou abordagens praticadas para otimizar o gerenciamento dos ativos de uma infraestrutura, a “top-down” e a “bottom-up”. A abordagem “top-down” otimiza com uma visão geral do sistema, estabelecendo níveis de serviço que são desejáveis para aplicar a toda uma rede de pontes antes da priorização de projetos de pontes individuais. Entretanto, a “bottom-up” considera que o desempenho da ponte é a principal preocupação e, portanto, procura determinar uma ação ideal para cada ponte individual, baseados no fato de que a soma de ações ótimas a nível individual fornecerá o ótimo a nível da rede. Posteriormente, as intervenções são corrigidas e priorizadas de acordo com as restrições orçamentárias (Austroads, 2013). A interação entre as duas abordagens de gestão está ilustrada na figura 2.3.

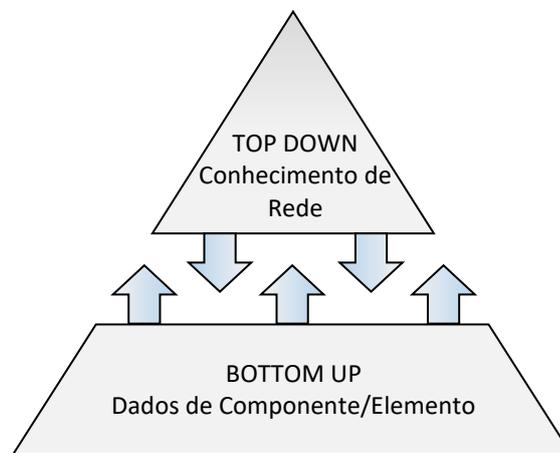


Figura 2.3 - Filosofias para o gerenciamento de ativos

A abordagem "top-down" permite uma gestão mais rápida das obras, pois os projetos individuais são determinados depois que os padrões da rede são definidos. Isso é importante quando se tem em consideração o desenvolvimento e implementação de um sistema computadorizado para a gestão de obras de infraestrutura. No entanto, o processo requer uma grande população de pontes para prover resultados significativos. A abordagem "bottom-up" usa mais tempo no

computador para otimizar pontes individuais e, assim, torna-se inadequada para grandes populações de pontes (Austroads, 2002). Na figura 2.4 pode-se observar a diferença entre as duas abordagens.

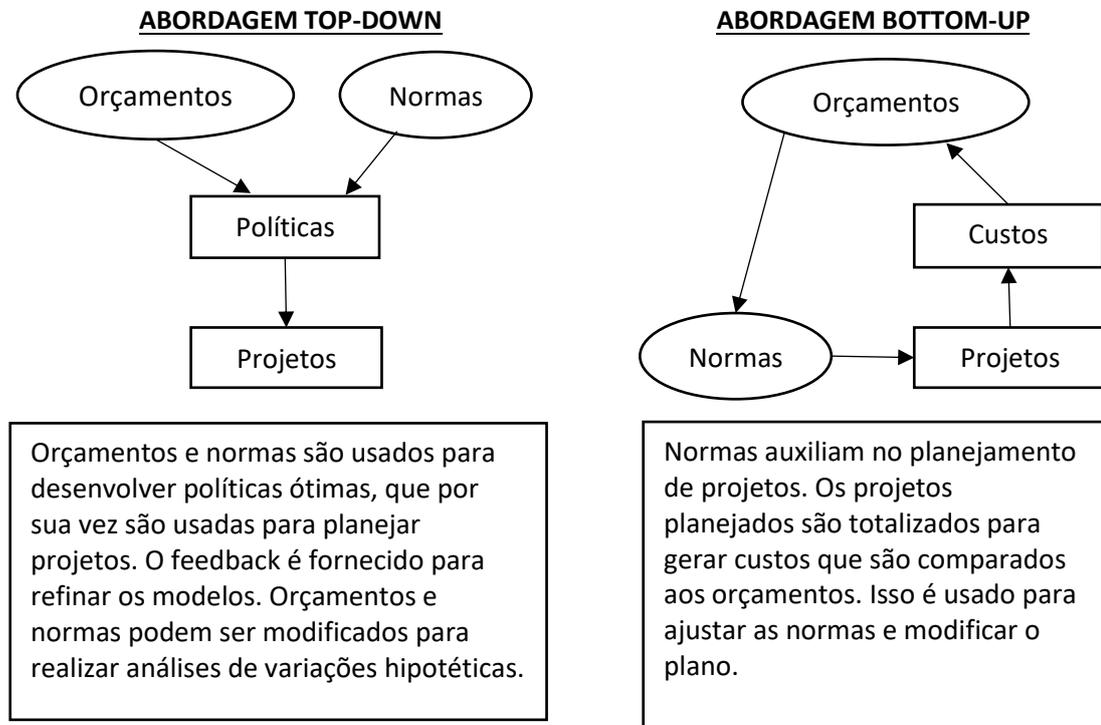


Figura 2.4 - O processo de otimização (Fonte: Small et al., 1999)

O refinamento de qualquer sistema de gestão de pontes está definido pelos objetivos da entidade administradora e os recursos disponíveis para a sua implementação. O fato da gestão de OAEs ser um processo contínuo, requer constante melhora deste sistema, devendo, portanto, integrar novas técnicas de análise de dados, melhores modelos de deterioração, melhores técnicas de otimização e melhores métodos de decisão quando estes estiverem disponíveis (Austroads, 2002).

2.2.3. Categorização dos sistemas de gestão

Diversas categorias de abordagens são adotadas pelas entidades para gerenciar as obras de arte especiais de sua jurisdição. Cada sistema desenvolvido na área da gestão de OAEs está diferenciado em função a seu objeto de análise, o tipo de avaliação considerado e o processo de decisão adotado, de acordo com a categorização apresentada na tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Categorização dos Sistemas de Gestão de Pontes sobre diversos pontos de vista (Fonte: Almeida, 2013)

Categoria	Subcategoria	Tipos
Objeto principal da análise		Rede Parques de pontes Ponte Elementos da ponte
Tipo de avaliação		Estado de Condição Avaliação de segurança Avaliação de risco
Apoio à decisão	Critérios ponderados	Desempenho estrutural Custo Outros (funcionalidade, ambiente, etc.)
	Processamento da informação	Análise multicritério Otimização
	Ações planejadas	Tarefas específicas a implementar Tipo de intervenções a realizar

2.3. Desenvolvimento do sistema

Para Lauridsen et al. (1998) um sistema de gestão de OAEs compreende vários módulos ou atividades que possibilitam uma gestão eficiente de ativos, seja mediante uma análise a nível de uma rede de pontes ou a nível de cada projeto de ponte. Também, consideram muito importante que o sistema seja desenvolvido por aquelas pessoas ou organizações que são responsáveis pela sua implementação.

No entanto, vários sistemas implementados no exterior foram desenvolvidos por terceiros, como aconteceu com o sistema *PONTIS* nos EUA, desenvolvido pela empresa *Cambridge Systematics*. Situação similar aconteceu na gestão de pontes e viadutos da malha rodoviária federal do Brasil, onde o Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais (SGO) foi desenvolvido pelo Consórcio Pontis/Maia Melo em apoio ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

Uma gestão eficaz dessas obras deverá apoiar-se em um rigoroso cadastro de todas as OAEs existentes nos trechos de uma jurisdição e num programa de

vistorias sistemáticas. Deverá incluir diversas atividades técnicas, organizacionais e administrativas com o objetivo de instituir e pôr em prática uma política que contemple a conservação, recuperação, ampliação ou substituição de obras (Vitório, 2006).

Em função do planejamento baseado em desempenho e ao manejo de dados, um sistema de gerenciamento de pontes armazena dados históricos, incluindo características, dados de inspeções, informações de classificação, usa modelos de deterioração e modelos econômicos, todos eles para prever resultados e orientar decisões a nível de rede ou nível de projeto (Cavalline et al., 2015).

A maioria dos sistemas de gestão utilizam conceitos básicos similares. Os sistemas mais simples consistem do armazenamento dos dados mais relevantes de cada estrutura. O banco de dados gerado contém, por exemplo, detalhes estruturais, registros de inspeções e históricos de manutenção, os quais são analisados por uma equipe especializada de gestores de ativos, para finalmente determinar os trabalhos mais adequados de intervenção. Sistemas mais complexos fazem uso de algoritmos para processar os dados e obter estratégias de manutenção ótimas, tendo em conta algumas restrições, como as orçamentárias (Woodward et al., 2001). Na figura 2.5 é apresentada a estrutura de um sistema básico para a gestão de OAEs.

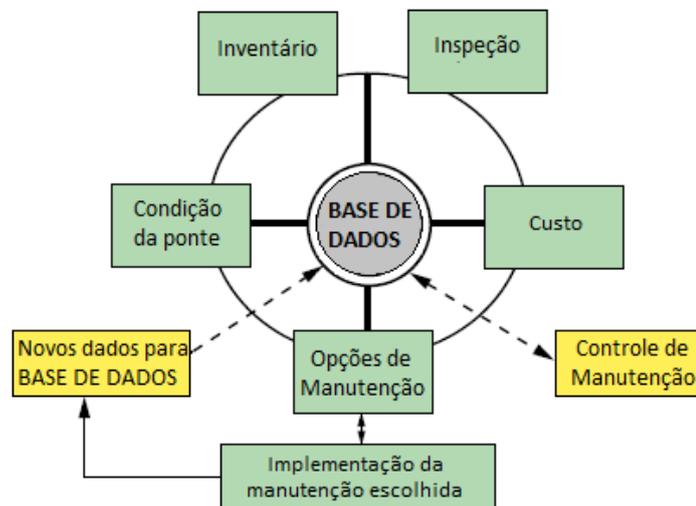


Figura 2.5 - Um sistema básico de gestão de pontes (Fonte: Adaptado Ryall, 2010)

Um SGPo é mais que uma ferramenta para a coleta de dados e ocorrências. É um sistema que analisa todas as informações e dados referentes às pontes, e que pode fazer comparações para classificar cada estrutura em ordem de importância dentro da infraestrutura geral, no que diz respeito a restrições orçamentárias e de segurança. Essencialmente, um SGPo deve ser capaz de dizer

ao gestor da OAE onde ele deveria gastar seus fundos da maneira mais eficiente. Segundo Lauridsen et al. (1998), um sistema completo de gestão não passa de apenas mais um programa de computador se não estiver composto por:

- Um conjunto de atividades inter-relacionadas para administrar pontes;
- Um conjunto de normas e diretrizes para essas atividades;
- Uma entidade para gerenciar e executar essas atividades;
- Um banco de dados contendo dados resultantes dessas atividades;
- Um conjunto de ferramentas computacionais para processar e analisar dados.

A figura 2.6 ilustra os componentes de uma possível estrutura modelo de um sistema de gestão de pontes:

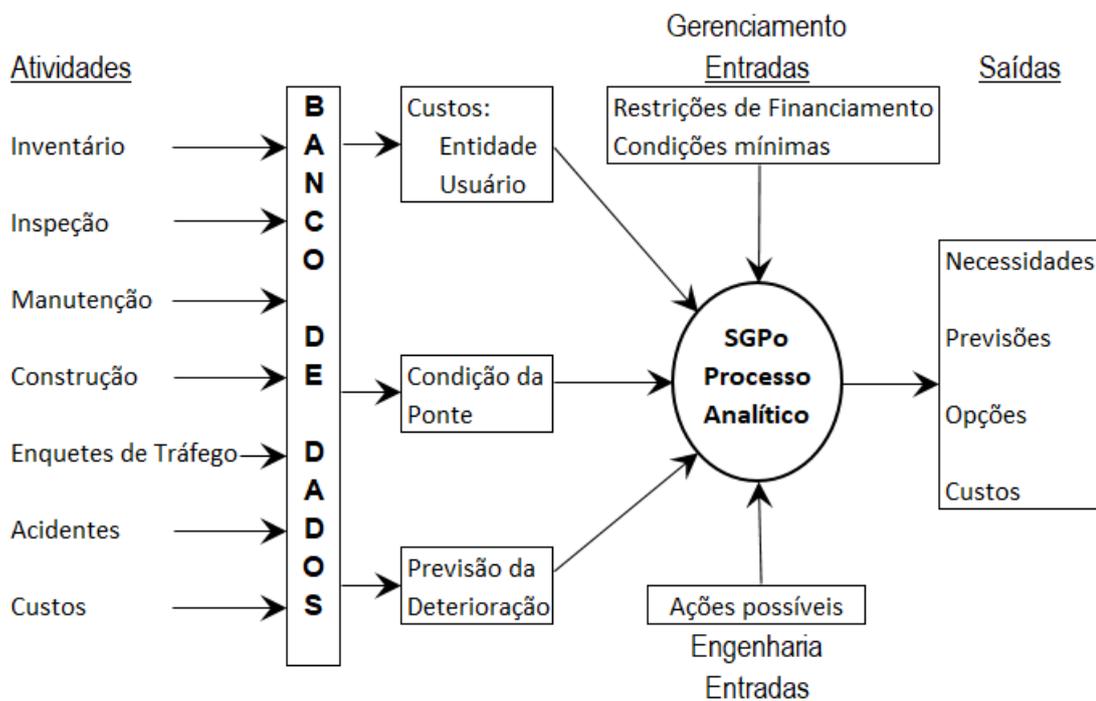


Figura 2.6 - Estrutura modelo de um Sistema de Gestão de Pontes (Fonte: Adaptado de Steele et al., 2000)

As Diretrizes Para a Gestão de Pontes da AASHTO (*AASHTO Guidelines for Bridge Management Systems*) consideram que um sistema eficiente para as pontes dos EUA deve estar baseado nessas diretrizes, sendo necessário que o sistema forneça análises e resumos de dados, utilize modelos matemáticos para fazer previsões e recomendações, e forneça os meios pelos quais políticas e programas alternativos possam ser eficientemente considerados (FHWA, 2010). Isso quer dizer que um sistema eficiente deve incluir, como mínimo, procedimentos formais para:

- Coletar, processar e atualizar dados;

- Prever a deterioração;
- Identificar alternativas de ação;
- Prever custos;
- Determinar políticas ótimas;
- Executar a previsão orçamentária de curto e longo prazo;
- Recomendar a implementação de programas e cronogramas que considerem as restrições políticas e orçamentárias.

Dentro de um sistema de gestão existem três principais tipos de modelos, isto é, modelo de deterioração, modelo de custos e modelo de otimização. Os modelos de deterioração são usados para prever a condição dos elementos em qualquer ponto no tempo e podem ser de natureza determinística ou probabilística.

No tempo atual, os modelos de custos são considerados na maioria dos sistemas de gestão de pontes. Estes permitem verificar o custo-benefício de uma estratégia de intervenção, de acordo com as despesas geradas pela ação direta de restaurar os elementos a sua condição original e, por meio dos custos indiretos gerados aos usuários, produto das alterações de tráfego.

O modelo de otimização aproveita os resultados dos modelos de custo e deterioração para definir a estratégia “ótima” para os elementos da estrutura, fazendo uso de análises de custos do ciclo de vida ou outro procedimento semelhante.

Para todos os tipos de pontes dentro de um sistema de gestão se destacam os seguintes módulos básicos:

- Inventário: inclui dados administrativos (identificação da estrutura, localização, etc.), dados técnicos básicos (tipo de estrutura, geometria, materiais, etc.), fotos e croquis da estrutura;
- Condição técnica e segurança: dados coletados através de todos os tipos de inspeções (danos, necessidade de trabalhos de manutenção, custos estimados, etc.), avaliação da condição técnica e segurança, modelos de deterioração;
- Capacidade de serviço e operação: parâmetros de serviço das estruturas (capacidade de carga, folgas, velocidade limite, etc.), avaliação da capacidade

de serviço e vida útil, eventos importantes (trabalhos de manutenção, colisões, etc.), administração de transportes acima dos padrões;

- Planejamento e orçamento: estratégias de manutenção, avaliação econômica, otimização de obras de manutenção, orçamento de curto e longo prazo.

2.4. Técnicas de análise

O nível de sofisticação de qualquer sistema de gestão está definido pelos objetivos da organização e os recursos disponíveis para a sua implementação. A gestão de pontes é um processo contínuo, por consequência a sua sistematização deve considerar frequentes melhoras, conforme novas técnicas de análise de dados são desenvolvidas, melhores modelos são estimados, melhores técnicas de otimização são desenvolvidas e melhores métodos para auxiliar na tomada de decisões são implementados (Kleywegt e Sinha, 1994).

A modelagem de desempenho é uma técnica relativamente recente para a gestão de ativos de pontes. Está sendo integrada em vários sistemas de gestão e permite quantificar, ou qualificar, o desempenho de uma estrutura em relação ao conjunto de pontes de uma rede. Esta técnica inclui o uso de medidas de desempenho e um modelo de deterioração. O fornecimento de um nível de serviço aceitável, ou a capacidade da ponte, podem ser usados para medir, com objetividade, o desempenho destas obras.

2.4.1. Medidas de desempenho

As medidas de desempenho permitem a monitoração das pontes, pois representam o desempenho dessas obras por intermédio de medidas, indicadores ou índices. A escolha de determinada medida de desempenho depende dos objetivos que a gerenciadora visa cumprir, bem como dos recursos de que disponha para avaliar suas OAEs. Selecionadas as medidas de desempenho, as informações coletadas através das vistorias de pontes permitem classificar as obras segundo os objetivos de condição, capacidade de carga, segurança ou risco (Mirzaei et al., 2012).

As medidas de desempenho podem ser usadas para comparar as condições das pontes dentro de uma rede e, frequentemente, formam parte de um modelo de priorização usado para a alocação de recursos. Além disso, estes

indicadores de desempenho podem formar a base de modelos de deterioração potencialmente úteis a nível de uma rede de OAEs, sendo parte das ferramentas que ajudam aos gestores a prever a condição de um elemento ou uma ponte inteira, aprimorando a tomada de decisões em relação à priorização de investimentos futuros.

A partir da definição e características das medidas de desempenho podem-se mencionar seus objetivos gerais (Patidar et al., 2007):

- Melhora da segurança do tráfego viário;
- Preservação da condição da ponte;
- Proteção diante de eventos extremos;
- Redução dos custos das organizações responsáveis;
- Redução dos custos gerados aos usuários destas obras.

A seleção de medidas de desempenho, para a avaliação de um problema específico, é normalmente influenciada pela política da organização, o nível de gerenciamento, o tipo de ponte, as preocupações dos interessados, etc. Pesquisas realizadas entre os principais SGPO do mundo confirmam que todos manipulam informações de condição a nível de elementos e da estrutura como um todo. No entanto, várias informações usadas para caracterizar a segurança, capacidade de carga e risco de eventos extremos são desconsideradas por alguns sistemas de gestão (Mirzaei et al., 2012).

Patidar et al. (2007) apresentam uma lista de medidas de desempenho tipicamente empregadas por muitas administradoras ao redor do mundo, cujos usos estão separados ou diferenciados pelo objetivo geral seguido. Deve-se ter em conta que as medidas de desempenho não se limitam às apresentadas abaixo, bem como qualquer um deles não deve ser considerado de uso obrigatório:

- Preservação da condição da ponte
 - Classificação de condição, índice de integridade, classificação de suficiência;
- Melhora da segurança de tráfego
 - Classificação geométrica/obsolescência funcional;
 - Classificação geométrica de tabuleiro;
 - Classificação de inventário, classificação de operação;
- Proteção contra eventos extremos

- Classificação da vulnerabilidade à erosão, fadiga, classificação da criticidade da fratura, classificação da vulnerabilidade sísmica, outra classificação de desastres (colisão, sobrecarga, provocadas pelo homem);
- Redução de custos na entidade gestora de OAEs
 - Custo inicial de entidade, custo de entidade por ciclo de vida;
- Redução de custos de usuário
 - Custo inicial de usuário (atrasos em zonas de trabalho, desvios, etc.), custo de usuário por ciclo de vida;
- Redução de impactos adversos à comunidade
 - Preservação de pontes históricas, melhora da estética/perturbação da qualidade visual.

De modo similar, Lounis et al. (2009), consideram as seguintes medidas como as mais relevantes para pontes:

- Segurança
 - Classificação de carga, capacidade de carga, índice de confiabilidade;
 - Classificação de condição, classificação de suficiência, classificação de avaliação, índice de integridade;
- Servicibilidade
 - Classificação de condição;
 - Esforços excessivos, fissuração, deformação, vibração;
- Fadiga
- Funcionalidade
 - Classificação de condição, classificação de suficiência;
 - Largura de ponte, folgas horizontais/verticais.

A preferência de uso da Classificação de Condição resulta do fato que esse método para aferir é mais fácil de ser registrado para um grande número de OAEs. Além, o objetivo de preservação da condição está relacionado a outros aspectos, sendo assim, a condição de má conservação ou as inadequações funcionais dos elementos da ponte podem levar a problemas de segurança, piora e aumento da

vulnerabilidade das obras por causa de eventos naturais ou acidentes provocados pelo homem.

Existem várias medidas de desempenho implementadas com sucesso nos sistemas de gestão de alguns países como Dinamarca, Estados Unidos, Canadá, Austrália e Suíça. Todos esses sistemas permitem armazenar as informações de inspeção a nível de diferentes elementos e da estrutura como um todo. A tabela 2.4 apresenta a escala de classificação da condição mais usada nos EUA, a Condition Rating (CR), definida através do trabalho conjunto da US Department of Transportation (USDOT) e a Federal Highway Administration (FHWA), e incluída na *National Bridge Inventory* (NBI). Possui dez (10) níveis, desde zero (0) até nove (9), onde 0 define-se como “fora de serviço” e 9 define uma “condição excelente”.

Tabela 2.4 - Escala de classificação da condição da NBI

CR	Condição	Descrição da Condição
9	Excelente	Uma nova ponte
8	Muito Bom	Sem problemas observados
7	Bom	Alguns pequenos problemas
6	Satisfatório	Elementos estruturais mostram uma pequena deterioração
5	Suficiente	Os principais elementos estruturais estão estáveis, mas podem ter pequenas perdas de seção, trincas, desagregação ou cavitação
4	Insuficiente	Perda avançada de seção, deterioração, desagregação ou cavitação
3	Grave	Perda de seção, deterioração, desagregação ou cavitação afetou seriamente os principais componentes estruturais. Falhas locais são possíveis. Fissuras por fadiga em aço ou fissuras por cisalhamento no concreto podem estar presentes
2	Crítico	Deterioração avançada dos principais elementos estruturais. Fissuras por fadiga em aço ou fissuras por cisalhamento no concreto podem estar presentes ou a cavitação pode ter removido o suporte da subestrutura. A menos que seja monitorado de perto, pode ser necessário fechar a ponte até a correção
1	Ruptura iminente	Grande deterioração ou perda de seção em componentes estruturais críticos com sensível movimento vertical ou horizontal que afeta a estabilidade da estrutura. Ponte fechada ao tráfego, mas as ações corretivas podem recolocar para um serviço leve.
0	Fora de serviço	Fora de serviço - além da ação corretiva

De outra parte, os Ministérios de Transportes de Quebec e de Ontario, no Canada, classificam o estado das OAEs com uma escala de um (1) a seis (6), tendo em conta a severidade dos danos, a importância dos elementos afetados e a sua extensão de dano (porcentagem de perda de sua seção transversal, porcentagem de perda de seu comprimento ou porcentagem de área da superfície afetada) de acordo com as curvas apresentadas na figura 2.7 (Morcoux e Lounis, 2005).

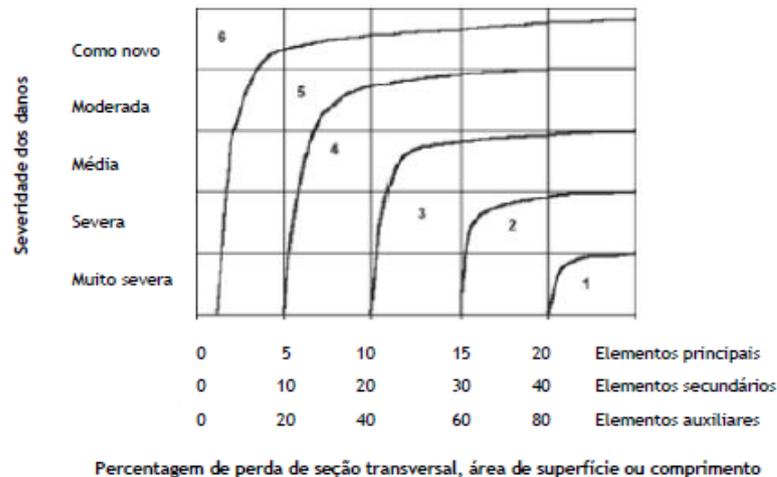


Figura 2.7 - Curvas de classificação adotadas no Canadá (Fonte: Morcoux e Lounis, 2005)

2.4.2. Modelos de deterioração

A representação do processo de deterioração de qualquer elemento ou componente de uma infraestrutura está definida pela sua taxa de deterioração. Estas taxas de deterioração são influenciadas pelos efeitos combinados de muitos fenômenos complexos, por exemplo, corrosão da armadura de reforço, degradação do concreto, deformações, retração, fissuração, fadiga, etc. Na ausência de modelos mecânicos que requerem a contribuição quantitativa desses fenômenos complexos, um modelo de deterioração que usa os dados de inspeções de pontes pode ser utilizado para estimar futuras necessidades de manutenção, reabilitação e substituição, além de priorizar trabalhos de intervenção (Agrawal et al., 2010).

Um modelo de deterioração pretende estimar a condição de uma ponte ao longo do seu ciclo de vida, baseado na idade ou na condição atual da obra. No entanto, a previsão da deterioração de uma ponte não é uma tarefa fácil, tendo em conta a grande heterogeneidade nas características deste tipo de estruturas e a

variedade de fatores que podem afetar seu estado ou comportamento. Na figura 2.8 é apresentado o fluxograma do modelo de deterioração como um passo entre o conhecimento do estado da estrutura e as ações gerenciais a seguir.

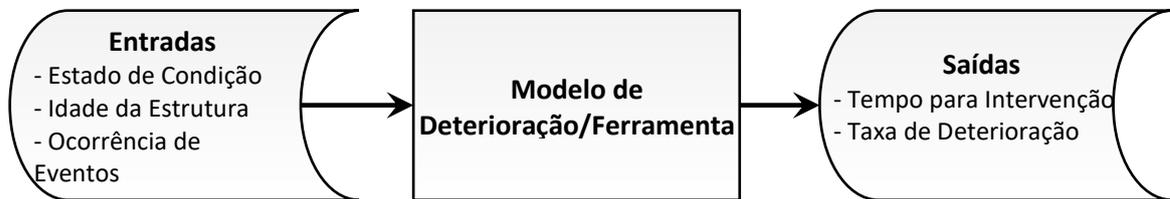


Figura 2.8 - Fluxograma do processo de modelo de deterioração e sua ferramenta preditiva (Fonte: Adaptado de Kotze et al., 2015)

Essencialmente, a modelagem emprega o registro de classificações de condição obtidos durante as inspeções periódicas. Estes modelos podem ser atualizados e recalibrados com a disponibilidade de novos dados de inspeções. Inclusive, é essencial que qualquer modelo de deterioração eficiente, inserido num sistema para a gestão de pontes, esteja em constante desenvolvimento, atualização e recalibração, na medida que se disponham de novos dados.

Maheswaran et al. (2005) consideram que um modelo de deterioração faz parte da otimização de um programa de manutenção; portanto, a implementação de um modelo pode ajudar no desenvolvimento de estratégias otimizadas para a manutenção de pontes.

Os modelos de deterioração podem ser classificados em três grandes grupos que não são mutuamente exclusivos: modelos determinísticos, modelos estocásticos e modelos de inteligência artificial.

2.4.2.1. Modelos determinísticos

São considerados os modelos que abordam de maneira mais simples a previsão da condição futura das pontes. Esses modelos são baseados em propriedades estatísticas que oferecem relativa facilidade computacional.

A previsão da deterioração, de um elemento ou componente da OAE, depende da capacidade de determinar uma equação, que é função de certos parâmetros, como a condição atual, o tipo de material, a idade do elemento, a condição ambiental, o volume de tráfego, a seleção de ações de manutenção e reabilitação.

Para descrever a relação entre os fatores que influem na deterioração (e.g., a idade) e a condição das obras, estes modelos usam análises estatísticas simples, como a média, o desvio padrão, os métodos de extrapolação linear, a regressão, o ajuste de curvas, etc. (Jiang e Sinha, 1989; Morcoux, 2011). O resultado de tais modelos são valores determinísticos que representam a condição futura de um ativo de infraestrutura, sem considerações probabilísticas envolvidas.

Alguns dos métodos determinísticos mais usados para determinar as taxas de deterioração de pontes são (Agrawal e Kawaguchi, 2009):

- Curva de duração média na transição de estados, na qual a duração média, ΔT , entre dois estados de condição sucessivos, é determinada estatisticamente;
- Curva de classificação média, na qual a classificação de condição média é determinada para diferentes idades dos elementos, conseguindo a curva de classificações médias versus a idade;
- Curva de classificação mínima, baseada na plotagem da classificação de condição mínima de um elemento específico em função da idade do elemento;
- Mínimos Quadrados Ordinários (OLS, pelas siglas em inglês), tipo de método de mínimos quadrados lineares usado para estimar a classificação de condição em função de diferentes fatores que afetam a deterioração do elemento da ponte.

No gráfico da figura 2.9 observa-se um típico modelo determinístico onde o eixo das ordenadas está formado pelos valores discretos das Classificações de Condição (0 - 9), entanto que no eixo das abcissas temos a idade das pontes em anos. Assim, o modelo liga linearmente cada ponto que relaciona um valor da classificação da condição com a idade média das pontes que apresentam tal classificação de condição. Destaca-se também que diante uma base de dados com insuficientes classificações de condição abaixo de 3 o modelo extrapola, projetando a inclinação da reta definida entre as condições 3 e 4.

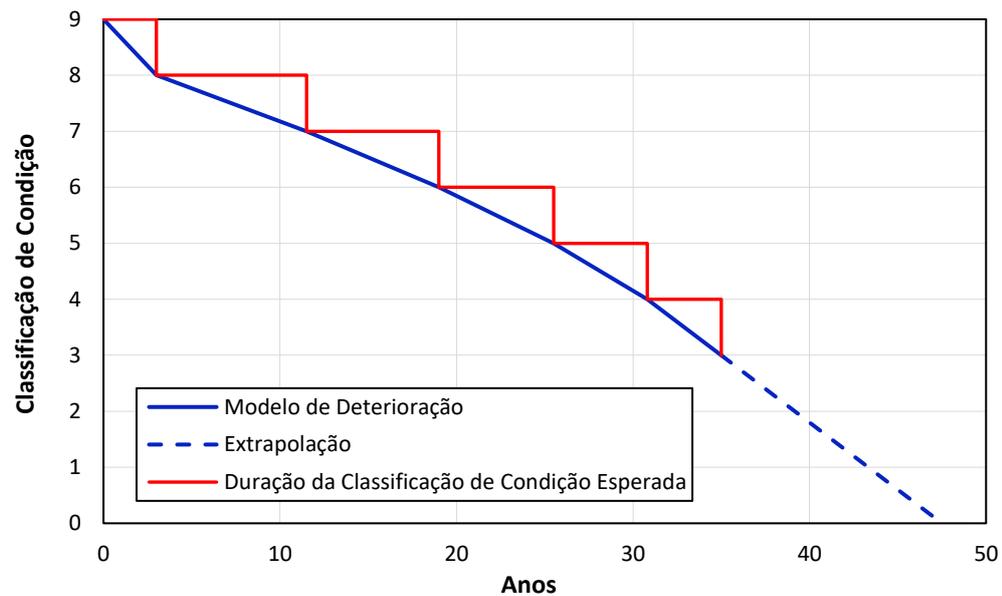


Figura 2.9 - Exemplo de modelo determinístico de pontes (Fonte: Adaptado de Cavalline et al., 2015)

Apesar de sua facilidade de desenvolvimento e implementação, os modelos determinísticos estão associados a algumas limitações críticas e inerentes (Agrawal e Kawaguchi, 2009; Cavalline et al., 2015; Jiang e Sinha, 1989; Morcous, 2011; Austroads, 2013):

- Desprezam a incerteza devida à natureza estocástica do processo de deterioração das estruturas, as propriedades estatísticas fora do comum, a existência de variáveis explicativas não observadas e o efeito de não considerar a duração das classificações de condição;
- Estimam a deterioração dos ativos de infraestrutura sem considerar trabalhos de manutenção, evitando a dificuldade de estimar os impactos das estratégias de intervenção;
- Geralmente as técnicas determinísticas de regressão concedem resultados razoáveis dentro dos limites dos dados disponíveis. Então, sua projeção, além desses limites, pode ser significativamente enganosa e limitar severamente a confiabilidade preditiva de um SGPO;
- Preveem a condição média de uma família de ativos de infraestrutura, independentemente da condição atual e do histórico de condições de cada ativo.

- Um dos principais problemas destes modelos é estabelecer a função de forma da equação que melhor se adapta aos dados;
- Desconsideram a deterioração devida à interação entre componentes, como a do tabuleiro da ponte e as juntas do tabuleiro;
- Têm dificuldade para se atualizar quando novos dados são obtidos. Nesse caso, é necessário repetir todo o procedimento de cálculo das taxas de deterioração, o que é computacionalmente caro.

Atualmente os modelos determinísticos continuam sendo usados e desenvolvidos para determinar os índices de deterioração de OAEs, aproveitando a grande disponibilidade de ferramentas estatísticas. Todavia, é inegável reconhecer que têm perdido relevância diante da presença de alternativas com maiores vantagens, como por exemplo os modelos estocásticos.

2.4.2.2. Modelos estocásticos

A nível internacional são os mais implementados em sistemas de gestão de pontes, permitindo prever a condição futura dos elementos e componentes das obras. Estimam o processo de degradação de forma probabilística e supõem que a taxa de deterioração, para algum tempo futuro, é independente do histórico de condições, só dependendo da condição atual do ativo de infraestrutura.

Os modelos estocásticos tratam o processo de deterioração de uma estrutura através de uma ou mais variáveis aleatórias. Dessa forma, são capazes de capturar a incerteza e aleatoriedade do processo de deterioração, superando uma das principais limitações dos modelos determinísticos e melhorando a acurácia na previsão futura do desempenho. Butt et al. (1987) demonstraram que os modelos probabilísticos fornecem melhores capacidades de extrapolação quando comparados com os modelos determinísticos, e podem ser facilmente integrados em processos de otimização de SGPO dinâmicos, resultando em estratégias de manutenção, reabilitação e substituição mais eficientes e efetivas.

Os modelos estocásticos podem ser classificados como baseados no estado ou baseados no tempo. Para os modelos baseados no tempo, como as cadeias de Markov, o processo de deterioração é modelado através da probabilidade de passar de um estado de condição a outro, num período de tempo fixo e discreto. Por

outro lado, em modelos baseados no tempo, a extensão de tempo que um elemento de ponte permanece num determinado estado de condição é modelado como uma variável aleatória que segue certa distribuição de probabilidades. Um exemplo de distribuição aplicável para descrever o processo de deterioração é a distribuição do tipo Weibull.

Entre os modelos estocásticos mais usados para prever a deterioração de uma OAE destaca-se o modelo de cadeias de Markov. As suas primeiras aplicações remontam ao início dos anos 60, onde eram aproveitados para resolver problemas de manutenção e reparo. Ainda assim, maior aprofundamento esteve ligada à previsão do desempenho de pavimentos (Butt et al., 1987), para depois ganhar difusão na análises de tipos e componentes de pontes (Jiang et al., 1988; Cesare et al., 1992), e tubos de águas pluviais (Micevski et al., 2002).

De forma sucinta, o modelo de cadeias de Markov representa o processo de deterioração como uma série finita de estados discretos que são derivados da informação de inspeções periódicas, onde o elemento avaliado tem associado uma probabilidade por se manter num estado ou mudar para um estado inferior, no decorrer de um período de tempo fixo. Definido também como um processo “sem memória”, onde o seguinte estado de condição da estrutura depende só da atual condição da estrutura e não de seu histórico de condições. Uma típica cadeia de Markov para quatro estados de condição é apresentada na figura 2.10.

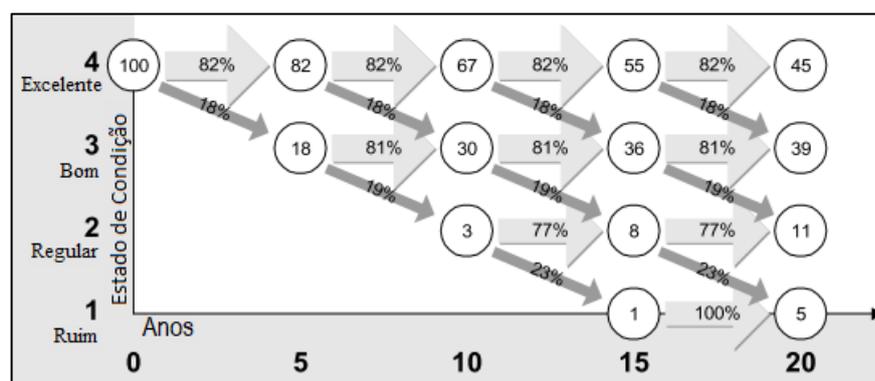


Figura 2.10 - Exemplo de modelo de cadeias de Markov. (Fonte: Adaptado de Thompson e Kerr, 1999)

Apesar que os modelos Markovianos consideram a incerteza do processo de deterioração, assim como a condição atual de um elemento para prever sua deterioração, duas das principais fraquezas dos modelos determinísticos, estes

modelos sofrem outras limitações, conforme ressaltam Agrawal e Kawaguchi (2009), Cavalline et al. (2015), Kotze et al. (2015), Madanat et al. (1995):

- Supõem independência de tempo, desconsiderando a influência real do tempo no processo contínuo de deterioração. Contudo, tenta-se diminuir o efeito dessa limitação dividindo as pontes de cada categoria em vários grupos de idade.
- Algumas considerações destes modelos podem ser impraticáveis; por exemplo, assumir intervalos de tempo de transição discretos, considerar uma amostra constante de pontes, e trabalhar com probabilidades estacionárias de transição;
- Não modelam os efeitos de várias variáveis independentes que influenciam na deterioração dos elementos de uma estrutura. Por causa disso, se confia num agrupamento predefinido de um conjunto de pontes, dentro de categorias homogêneas, para conseguir uma análise estatística mais significativa;
- Para determinar as probabilidades de transição se pressupõe que a condição de um componente pode-se manter ou piorar. Assim, evita-se a dificuldade de calcular os elementos da matriz de transição para casos onde foram realizados trabalhos de melhoramento;
- Alguns pesquisadores como Madanat et al. (1995) consideram inadequado o uso de regressão linear (método de otimização) para determinar as probabilidades de transição, pois a variável dependente, a classificação de condição, é discreta e ordinal, e não contínua como presume a regressão linear;
- Não consideram com eficiência a influência ou interação que pode existir entre os mecanismos de deterioração de diferentes componentes de ponte,
- Não existe uma relação clara entre os estados de condição (de tipo qualitativo) e os parâmetros físicos quantitativos, como as propriedades do material, as condições de estresse, os comportamentos estruturais e outros;
- Precisa a atualização das probabilidades de transição à medida que novos dados são obtidos.

Apesar de ter várias limitações, os modelos Markovianos continuam sendo os mais usados em diferentes SGPo, e.g., o PONTIS e o BRIDGIT. Isso é porque

esses modelos outorgam bons níveis de acurácia e são de relativa facilidade de desenvolvimento e implementação através de um programa de computador. Maiores detalhes para o desenvolvimento de um modelo de deterioração usando cadeias de Markov serão tratados no capítulo 4 desta pesquisa.

2.4.2.3. Modelos de inteligência artificial

Os modelos de Inteligência Artificial (IA) utilizam técnicas de computador que visam automatizar comportamentos inteligentes. A inteligência artificial consiste em vários métodos que têm sido aproveitados em uma série de aplicações como os Sistemas especializados, as Redes Neurais Artificiais (Artificial Neural Network - ANN), o Raciocínio Baseado em Casos (Case-Based Reasoning - CBR), entre outros (Agrawal e Kawaguchi, 2009).

As Redes Neurais Artificiais são uma metodologia de modelagem estatística não linear de dados. A figura 2.11 ilustra a configuração de uma Rede Neural Artificial proposta por Sobanjo (1997), onde a modelagem da deterioração usa e relaciona a idade da ponte, como dado de entrada, e a condição da ponte, como dado de saída, estabelecendo relações complexas a partir do estudo de cinquenta (50) superestruturas de pontes que foram usadas para treinar e testar a rede.

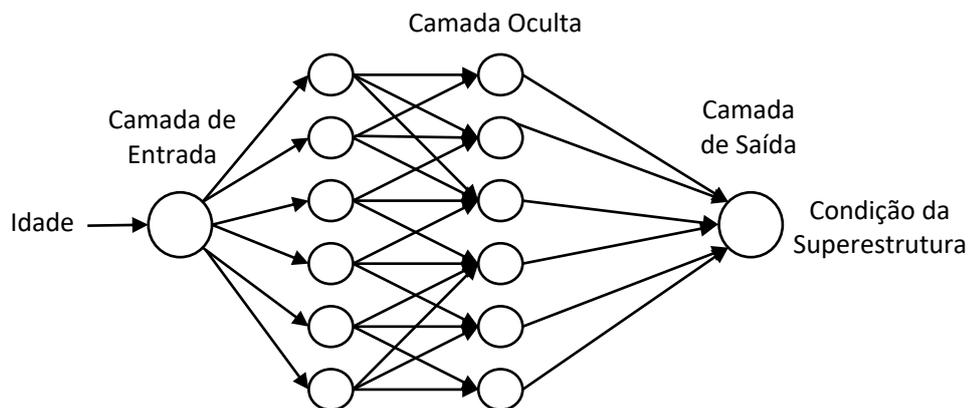


Figura 2.11 - Rede Neural Multicamadas (Fonte: Sobanjo, 1997)

2.4.3. Modelos de otimização

Uma análise econômica de longo prazo, que considere os custos totais durante todas as etapas de uma ponte, incluindo custos de projeto, construção, manutenção, demolição, custos e benefícios ao usuário, pode ser usada para planejar

e programar os trabalhos de intervenção dentro de um sistema de gerenciamento de pontes (de Brito e Branca, 1994).

O Custo do Ciclo de Vida (CCV) de projetos além de um período de 25 a 30 anos devem ser executados com cautela devido:

- As dificuldades para prever o futuro;
- A falta de bancos de dados bem estabelecidos, com a informação da condição das pontes para suportar a previsão;
- A natureza artificial do processo de ciclo de vida, quando a contribuição de custos futuros de manutenção para um valor presente líquido seria insignificante e dentro da faixa de precisão esperada de qualquer estimativa atual (Van Reyk, 1997).

O objetivo dos desenvolvimentos relacionados com os CCV das pontes é minimizar os custos totais (Frangopol, 1999). Efetivamente, a vida de uma estrutura é estendida mediante manutenção essencial e/ou preventiva, realizada no momento apropriado. A manutenção essencial aumenta a probabilidade que uma ponte não atinja um estado de deterioração que não foi previsto no seu desenho e, de outro lado, a manutenção preventiva visa retardar a taxa de deterioração enquanto é possível, mas não necessariamente melhorando a confiabilidade. Frangopol (1999) afirma que a análise de CCV deve considerar o valor do dinheiro no tempo, mas não considera quando o tempo influência nos custos de tal forma que os valores diminuam.

2.5. Sistemas implementados no exterior

Internacionalmente se tem desenvolvido vários sistemas de gestão de pontes, cada um deles com diferentes graus de complexidade, sucesso e recursos disponibilizados. Existe uma variedade de metodologias adotadas, estruturas de organização e funcionalidades, que são resultado das características particulares dos conjuntos de pontes dos países envolvidos, e do tipo de organizações que os desenvolve. Porém, cabe ressaltar que por razões comerciais ou questões de exclusividade, as metodologias envolvidas não são mais conhecidas do que as apresentadas em publicações acadêmicas.

Dentre os diferentes desenvolvimentos destacam-se os esforços nos EUA, os sistemas *PONTIS* e *BRIDGIT*, sistemas comerciais amplamente conhecidos e adotados por diferentes administradores locais para a gestão de pontes, sendo o *PONTIS* o único sistema utilizado por usuários estrangeiros. A seguir se apresentam os desenvolvimentos e as capacidades de alguns dos principais sistemas da América do Norte e Europa.

2.5.1. América do Norte

2.5.1.1. PONTIS (EUA)

O *PONTIS*, atualmente denominado *AASHTOWare Bridge Management*, foi desenvolvido em 1992 pela *Optima Incorporated* e *Cambridge Systematics*. Continua sendo amplamente utilizado como o principal software de gerenciamento de pontes para agências de transporte nos EUA (licenciado em 44 estados), e tem significativa presença internacional. A figura 2.12 apresenta a estrutura geral deste sistema.

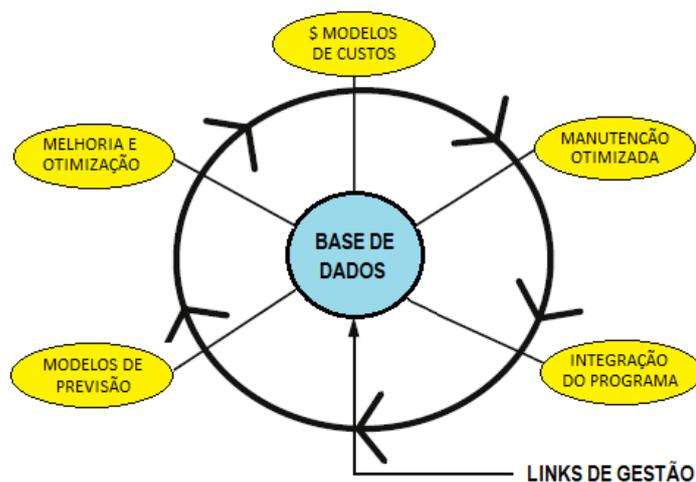


Figura 2.12 - Estrutura geral de PONTIS (Fonte: Adaptado de Ryall, 2010)

As agências que utilizam este sistema procuram uma variedade de necessidades para os elementos de pontes: armazenamento de dados de inventário e inspeção, modelagem de deterioração, planejamento de projeto e análise de desempenho, e orçamento de uma rede. A figura 2.13 apresenta a interface gráfica de usuário na sua versão 5.1.2.

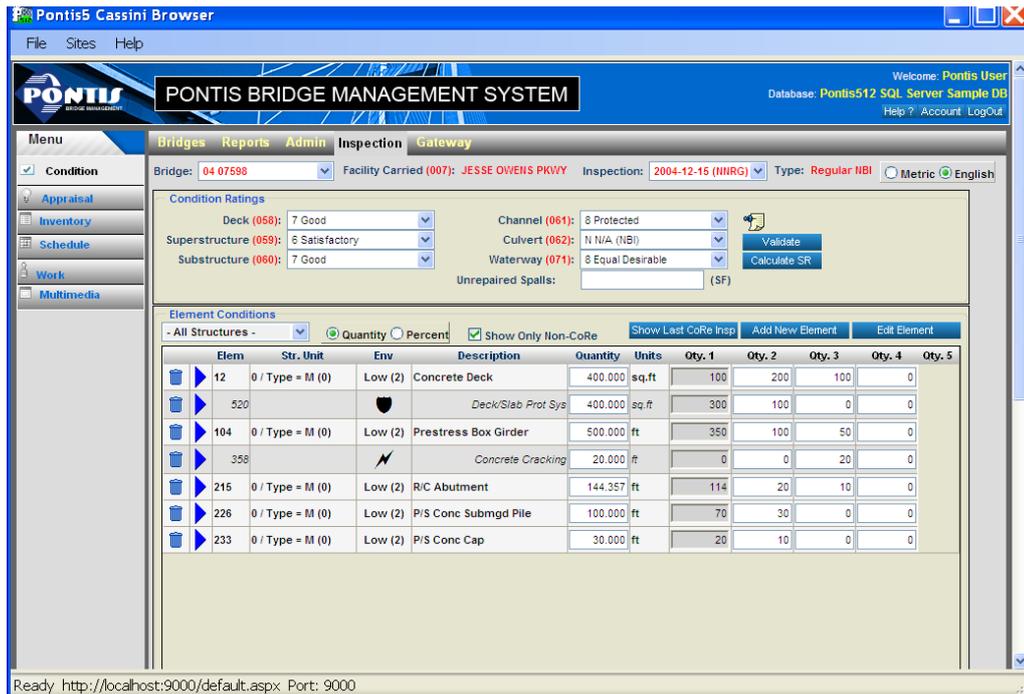


Figura 2.13 - Interface gráfica para usuários de PONTIS

Este sistema está composto por vários módulos, alguns dos quais trabalham em segundo plano, e só são chamados a partir dos módulos que possuem uma interface de usuário. Apresenta quatro módulos principais com interface de usuário, listados e discutidos a seguir (Austroads, 2013):

a) Banco de dados

Inclui todos os dados de inventário, inspeção e condição; além das informações e dados decorrentes de melhoras por manutenção e custos gerados ao usuário. *PONTIS* armazena esses dados com base nas diretrizes de codificação do sistema da *National Bridge Inventory* (NBI).

b) Módulo de manutenção, reparação e reabilitação (MR&R)

Este módulo usa modelos de deterioração e custos de manutenção para escolher estratégias de manutenção de custo mínimo para até 160 tipos de elementos estruturais. O módulo de MR&R não considera diretamente as restrições de financiamento pois assume que existe financiamento irrestrito para as ações tipicamente menos caras de MR&R. Se a jurisdição não tem dinheiro suficiente em seu orçamento para certos trabalhos de MR&R, pode-se superar esse aspecto do software usando um relatório padrão do *PONTIS* que classificará as ações de MR&R em ordem decrescente de relação custo-benefício.

c) Módulo de aprimoramento

É usado para identificar possíveis ações de melhoria e priorizá-las junto com a ação de MR&R. O *PONTIS* tem três opções de melhoria disponíveis para o usuário, sendo que as duas primeiras estão baseadas na largura da via existente e na folga vertical. A terceira melhoria é a substituição por uma estrutura funcionalmente superior, baseada em uma combinação de ampliação, aumento, capacidade de carga e consideração de MR&R. As decisões são baseadas no custo unitário de tais melhorias e de MR&R, em comparação com o custo de reposição.

d) Módulo de integração

Este módulo combina os resultados de manutenção dos elementos da ponte e os projetos de melhoria em um único programa recomendado a nível de projeto de ponte. Esse recurso usa uma classificação de custo-benefício para definir prioridades e respeita os requisitos e orçamentos de qualificação do programa de financiamento. Deve-se notar que isso é feito assumindo que todos os MR&R podem ser pagos e, em seguida, programar as melhorias mais benéficas possíveis com relação ao orçamento.

Considera uma abordagem de análise da rede do tipo *top-down*, que pode ser usado para otimizar o financiamento para os trabalhos de manutenção, reparação e reabilitação; também para melhorar as estruturas a nível de rede, de acordo com um orçamento específico (Khan, 2000). O sistema modela a deterioração dos elementos da ponte como um processo de Markov, que envolve o tempo dividido em períodos iguais e discretos.

O *PONTIS* promove os seguintes benefícios segundo a Cambridge Systematics (2006):

- Novas funções na otimização da preservação a longo prazo são consideradas como alvos de condição;
- A administração recebe o máximo de benefícios do financiamento de melhoria escassa, analisando o nível ideal de investimento. É capaz de equilibrar as condições das pontes, o desempenho e os custos de preservação a longo prazo;

- As funções avançadas de gerenciamento de dados são usadas para organizar o inventário completo, os dados de inspeção e as condições detalhadas dos elementos da ponte.

O sistema apresenta algumas limitações em certos aspectos mencionados a seguir (Austroads, 2013):

- É um software muito complicado e com uma licença de uso cara que requer esforço e pessoal especializado para gerenciar as pontes de uma rede rodoviária;
- A modelagem da deterioração usando Cadeias de Markov tem limitações quanto à falta de correlação entre condições históricas e previstas. As informações iniciais para definir as taxas de deterioração e a probabilidade que tem um elemento de ponte para mudar a sua condição atual são fornecidas por meio do esclarecimento de especialistas. Seu modelo de deterioração depende muito do julgamento desses especialistas, ao invés das características físicas das pontes;
- Embora o manual de procedimentos do programa esteja disponível, é muito difícil entender todas as partes e, para a maioria dos usuários, ele será apresentado como um sistema do tipo “caixa preta”;
- O processo de decisão de Markov tem uma limitação na estimativa da probabilidade de transição quando as pontes recebem ações de manutenção reparo ou reabilitação. Como resultado, essa limitação inerente faz parte do processo de tomada de decisões do sistema. O *PONTIS* tentou resolver o problema separando o módulo de gerenciamento de melhoras do processo de previsão e, dessa forma, os dados de condição das obras melhoradas não são considerados na estimativa das probabilidades de transição.

2.5.1.2. *BRIDGIT (EUA)*

O *BRIDGIT* é um SGPo destinado a atender às necessidades de agências com uma grande ou pequena rede de pontes, facilitando orientações sobre decisões de gerenciamento a nível de rede e ações de intervenção a nível de projeto. O sistema aprovisiona orientações sobre a alocação ótima de recursos para a rede de pontes, considerando os orçamentos e suas restrições. O sistema *BRIDGIT* foi desenvolvido no âmbito do *National Cooperative Highway Research Project*, patrocinado pela

AASHTO (projetos NCHRP 12-28 (3) A, B e C) e é um sistema multiusuário baseado em computador, que é de fácil implementação e utilização (Hawk, 1999).

O sistema baseia-se no custo do ciclo de vida e na análise incremental de custo-benefício. É semelhante ao PONTIS em arquitetura e capacidade. O *BRIDGIT* analisa, principalmente, as classificações de condição das pontes, as taxas de deterioração e a otimização de custos para um trabalho de MR&R. Os módulos básicos do *BRIDGIT* são (Austroads, 2002):

a) Módulo de inventario

Um banco de dados flexível com a capacidade de aceitar itens definidos pelo usuário.

b) Módulo de inspeção

Coleta de dados históricos de inspeções com base em um sistema de classificação de condição semelhante ao usado no sistema *PONTIS*, com a capacidade de informar em detalhe a nível de cada componente ou elemento por vão de ponte.

c) Módulo de MR&R

Tem a capacidade de planejar, programar, monitorar programas plurianuais, e rastrear ações históricas de intervenção e custos relacionados a pontes individuais da rede.

d) Módulo de análise

Planos de trabalho otimizados, elaborados com base em informações armazenadas em módulos de inventário, inspeção e modelos baseados em parâmetros definidos pelo usuário.

e) Módulo de modelos

Permite ao usuário visualizar ou modificar modelos e tabelas para ser usados no processo de otimização e, assim, permitir que o usuário personalize o *BRIDGIT* de acordo com as políticas que o administrador pretende usar na rede de pontes.

O *BRIDGIT* utiliza modelos de deterioração de Markov para prever os futuros estados de condição de elementos de pontes, de perfis de ciclo de vida e de análise incremental de custo/benefício para a otimização de orçamentos. O modelo é aplicado a nível de elemento, com matrizes de probabilidade de transição pré-

definidas na base dos estados de condição. Unidades de elementos e sistemas de proteção podem estar em qualquer um dos estados de condição, em um determinado período de tempo. O *BRIDGIT* é fornecido com modelos de deterioração padrão, que podem ser alterados para refletir as condições da autoridade da ponte, se desejado. Informações históricas podem ser usadas para atualizar as probabilidades de transição de deterioração ao longo do tempo.

Foi relatado que o *BRIDGIT* tem a capacidade de lidar com os inventários de muitos milhares de pontes e, por isso, é adequado para implementação em nível estadual ou nacional e, ainda assim, é ideal para autoridades menores de pontes, carentes de tecnologias da informação dedicadas à manutenção dos seus *sistemas* (Hawk, 1999). Além disso, Hawk afirmou que o *BRIDGIT* é ideal para agências menores porque:

- É um SGPo completo, incluindo a análise de um inventário completo do NBI;
- Não exige a compra de qualquer *software* adicional ou licenças de *software*;
- Tem requisitos mínimos de hardware (pode ser instalado em um computador pessoal razoavelmente potente);
- É um verdadeiro sistema a nível de rede que analisa cada ponte separadamente;
- É fácil de implementar;
- É fácil de operar por usuários ocasionais e não requer treinamento intensivo.

O *BRIDGIT* tem uma arquitetura similar ao *PONTIS*, portanto apresenta limitações similares às indicadas no item 2.5.1.1.

2.5.1.3. OBMS (Canadá)

O *Ontario Bridge Management System* (OBMS) foi desenvolvido e implementado pelo Ministério de Transportes de Ontario (MTO), no final da década de 90 (Thompson e Kerr, 1999). Posteriormente foi modificado pelo desenvolvedor ITX Stanley e introduzido a várias outras províncias no Canadá. Na figura 2.14 se observa uma tela do programa informático da OBMS em sua versão 2.5, incluindo módulos para: inventário (identificação, descrição e avaliação), elementos, inspeções, históricos de trabalhos e arquivos (fotos, relatórios e croquis).

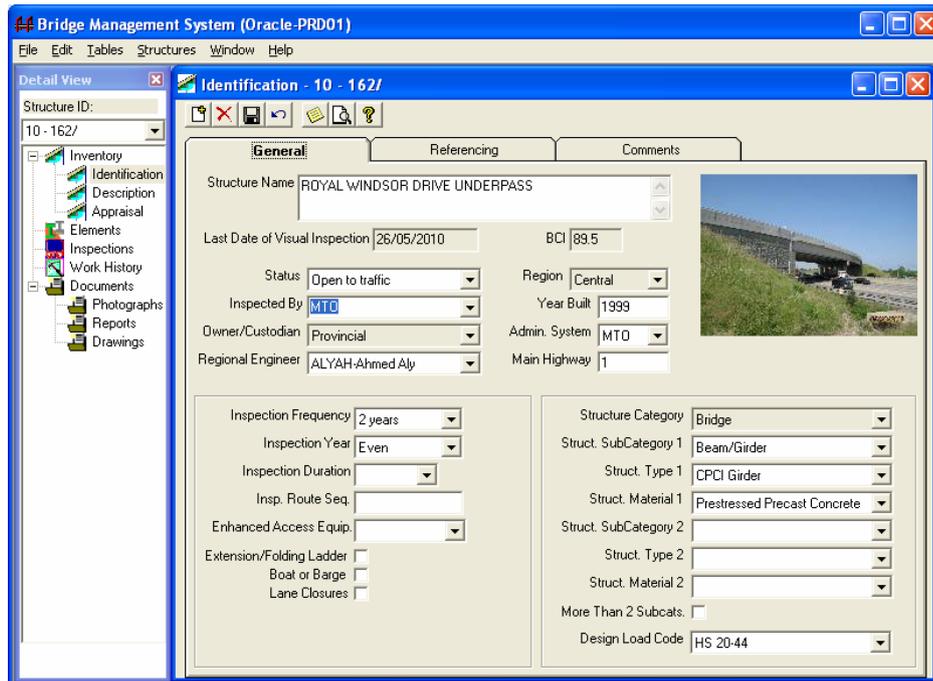


Figura 2.14 - Exemplo de tela do aplicativo da OBMS (Fonte: Yari, 2018)

No OBMS existem três modelos principais (Khazada & In, 2012):

a) Modelo de deterioração

O OBMS, como a maioria dos SGPO, usa o modelo de deterioração Markoviano para prever a deterioração das pontes.

b) Modelo de conhecimento

Sugere um método de reabilitação quando existem alternativas para escolher. As árvores e tabelas de decisão estão baseadas no manual de reabilitação de estruturas do MTO e no manual de revestimento de aço estrutural.

c) Modelo de custos

Neste modelo as estimativas de custo para as alternativas de ação são baseadas nos custos unitários dos itens propostos.

O processo de tomada de decisões inclui monitoramento, identificação de necessidades, desenvolvimento de políticas, configuração de prioridades, orçamento e alocação de fundos. O MTO usa o *Bridge Condition Index* (BCI) para avaliar as condições da ponte com base no valor econômico remanescente das estruturas. Os resultados das análises a nível de projeto e a nível de rede são consistentes porque a análise a nível de rede está baseada nos modelos a nível de projeto.

As necessidades de análise a nível de elemento são impulsionadas por um modelo de deterioração Markoviano. A escolha da forma do modelo de deterioração tende a ser impulsionada por certos fatores exclusivos das pontes, que não são exibidos em grande escala em outros tipos de ativos. Isto inclui um estado de condição muito pequeno e de vida longa, que não é suave ao longo do tempo, fortemente sensível a fenômenos que não são observados em inspeções visuais. Como mencionado anteriormente, outros SGPO, incluindo *PONTIS* e *BRIDGIT*, escolheram este tipo de modelo. Como os modelos do OBMS foram totalmente orientados desde uma análise do ciclo de vida a nível de projeto, tornou-se possível modificar os modelos Markovianos, calculando-se os fatores de ajuste a nível da rede para as probabilidades de deterioração (Austroads, 2013).

Uma pesquisa comparativa entre as diferenças de *PONTIS* e OBMS, efetuada por Thompson et al. (1999), destaca algumas capacidades do OBMS:

- A *PONTIS* usa uma análise a nível de rede em seus modelos, enquanto a OBMS usa uma análise a nível de elemento e a nível de rede em sua modelagem, o qual é mutuamente consistente;
- O OBMS incorpora dados de inspeção detalhados, que descrevem com maior precisão os principais componentes, tão diferentes como, por exemplo, os tabuleiros de pontes e os sistemas de pintura, o qual permite suportar de melhor forma a análise de suas condições e necessidades;
- O OBMS usa o modelo de deterioração de Markov e, conseqüentemente, está sujeito às mesmas limitações que o *PONTIS*. Conforme mencionado anteriormente, a principal preocupação com o uso desse método é a suposição de que a deterioração futura depende apenas do estado da condição atual, e não do tempo ou de qualquer outro atributo do elemento ou da ponte.

2.5.2. Europa

2.5.2.1. DANBRO (Dinamarca)

O DANBRO é o atual sistema de gestão de pontes da Dinamarca. Este sistema computadorizado foi desenvolvido em 1988 como resultado da colaboração da Danish Road Directorate e a empresa de consultoria COWI-consult. Gerencia aproximadamente 2.500 pontes na Dinamarca e 10.000 pontes na Tailândia e outros

países como Croácia, Honduras, Malásia, Colômbia, Arábia Saudita e México (Lauridsen e Lassen, 1999).

Essencialmente, o objetivo do *DANBRO* era facilitar um sistema que ajudasse aos tomadores de decisão a realizar seu trabalho, com um objetivo inicial dirigido a desenhar o sistema, sendo que o sistema poderia capturar e armazenar apenas dados suficientes para atingir esse objetivo (Lauridsen e Lassen, 1999).

Cada administrador de pontes tem necessidades diferentes, daí que a estrutura do *DANBRO* é modular, com a inter-relação entre os módulos individuais. Assim, cada proprietário pode escolher que módulos implementar e a que módulos podem acessar os usuários. A estrutura modular do sistema está composta por:

- a) O módulo de informação básica
Contém bases de dados administrativas e estruturais, principais registros de inspeções e programas para geração de relatórios.
- b) O módulo de manutenção
Contém informações sobre componentes de ponte para manutenção regular, possíveis trabalhos de correção em componentes, e a capacidade de gerar ordens de serviço.
- c) O catálogo de preços
Contendo taxas unitárias para vários tratamentos com base em taxas propostas, usadas para apoiar a estimativa de reparos.
- d) O módulo de otimização
Opera no nível da rede a partir de informações fornecidas pelas Principais Inspeções; um processo iterativo determina as estruturas mais econômicas para reparar e aquelas estruturas em que a reparação pode ser adiada; o método do valor presente líquido é usado para encontrar as alocações ótimas ao longo de um período orçamentário de cinco anos.
- e) O módulo de orçamento e custo
Lida com alterações no orçamento ou nos trabalhos de recuperação ao longo do ano, e em qualquer momento pode dar as despesas esperadas para um ano.
- f) O módulo de experiência

Contém informações sobre o tipo de dano e localização, e armazena as despesas históricas de cada estrutura.

2.5.2.2. HiSMIS (Reino Unido)

O HiSMIS foi um sistema de gerenciamento de pontes desenvolvido pelos consultores Rendel, Palmer e Tritton, no Reino Unido. É fácil de usar, possui um grande volume de armazenamento de dados e permite gerenciar outras estruturas além das pontes, como por exemplo túneis, bueiros, pavimentos e muros de arrimo, sendo portanto um dos sistemas mais completos. A estrutura do sistema HiSMIS pode-se observar na figura 2.15.

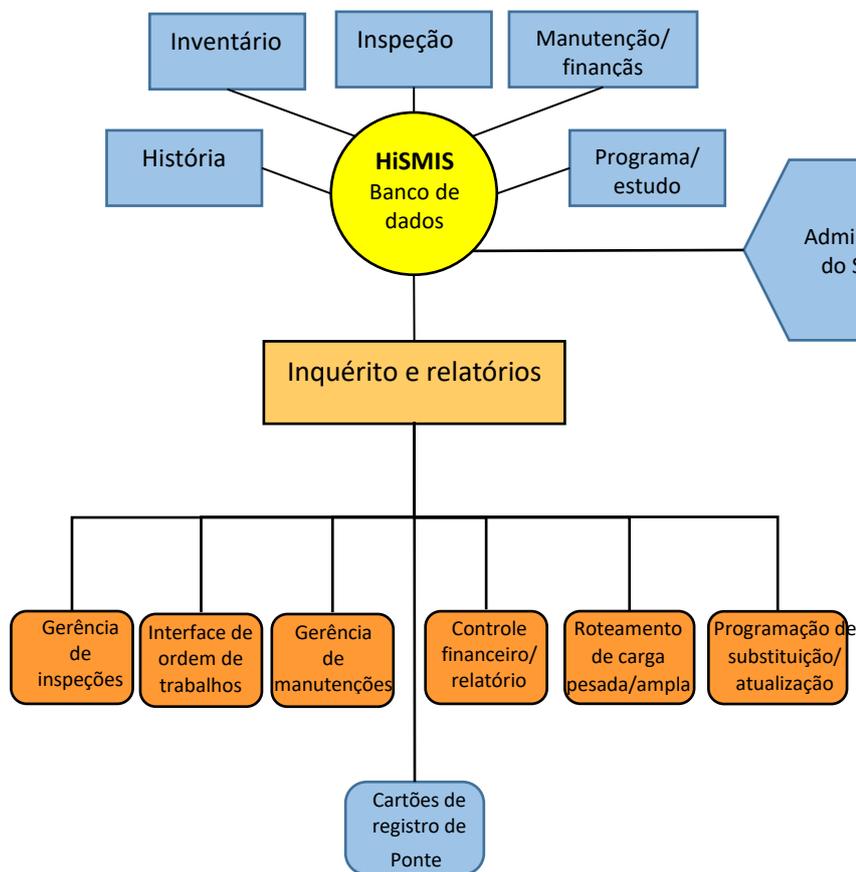


Figura 2.15 - O sistema HiSMIS (Fonte: Adaptado de Ryall, 2010)

O sistema incluiu cinco módulos diferentes (Austroads, 2002):

a) Módulo de inventário

Para o armazenamento dos detalhes invariáveis de uma ponte.

b) Módulo de inspeção

Para registrar as informações de todos os tipos de inspeções.

c) Módulo de manutenção

Um banco de dados com as necessidades de MR&R, programação e custos.

d) Módulo de história

Registro de quaisquer mudanças feitas na estrutura.

e) Módulo de programa/estudo

Módulo específico para armazenar detalhes adicionais definidos pelo usuário.

A saída através de relatório é concebida mediante um gerador de consulta, bem como há um módulo para administração local do software. Foi relatado que o sistema é amplamente utilizado em todo o Reino Unido e adotado pelas autoridades do Sri Lanka, Bahrein e Hong Kong. Em suas primeiras versões o sistema não incluía modelagem da deterioração e procedimentos de otimização para gerenciamento de futuros orçamentos (Blakelock, 1993).

2.5.2.3. SIB-Bauwerke (Alemanha)

O sistema alemão é supervisionado pelo BAST (Instituto Federal de Pesquisas Rodoviárias), responsável por aproximadamente 37.110 pontes. A figura 2.16 apresenta a tela principal do sistema alemão e a figura 2.17 uma tela onde são inseridas informações gerais e de inspeção de pontes.



Figura 2.16 - Tela principal do SIB-Bauwerke (Fonte: Mendes, 2009)

The screenshot displays the SIB-BAUWERKE software interface. At the top, it shows 'Bundesland XXXXX' and the title 'SIB-BAUWERKE' with 'Bauwerk' on the right. The main data area includes:

- Bauwerksnummer:** 5426601 (Interne Bwnr.)
- Bauwerksname:** Brücke B 285 über Leuchbachgraben bei Fladungen (NOME DA OBRA)
- Nächstgelegener Ort:** Fladungen (CIDADE MAIS PRÓXIMA)
- Amt:** Straßenbauamt Schweinfurt (GESTOR)
- Interner Sortierschlüssel:** B285 Nst 158/1 (CÓDIGO INTERNO)
- Verwaltung:** Fladungen (ADMINISTRAÇÃO / CUSTÓDIA)
- Bauwerkslängen:** Brücke 7,70 m (COMPIMENTO DA OBRA)
- Bemerkungen:** *** NOTAS

On the right side, there is a vertical toolbar with buttons: 'Tabelle', 'Suchen', 'Neu', 'Löschen', 'Ändern', 'Kopieren', 'BwNr änd.', 'Amt ändern', 'Zurück', 'DETAILHAMENTO DA OBRA', 'Teilbauwerke', and 'Übersicht'. Below the main data area, there are sections for 'ULTIMA INSPEÇÃO' (with 'INSPECTOR' and 'QUANTIDADE DE OBRAS DETALHADAS'), 'Letzte Bearbeitung: 08.05.2003 11:00:42' (with 'ALTERAR' and 'KOPIAR'), 'Bearbeiter: RUEGAMER' (with 'ALTERAR NÚMERO' and 'ALTERAR GESTOR'), and 'Anzahl Teilbauwerke' (set to 1). At the bottom, there are tabs for 'IMAGENS Bilder', 'DESENHOS Zeichnungen', 'DOCUMENTOS Dokumente', and 'RESUMO'.

Figura 2.17 - Tela típica de acesso as informações das obras (Fonte: Mendes, 2009)

O banco de dados existente no *SIB-Bauwerke*, assim como em outros sistemas rodoviários (por exemplo, TT-SIB, NW-SIB) são integrados para abastecer dados para os módulos seguintes (Haardt e Holst, 2008; Mendes, 2009):

a) Módulo BMS-MV

Para o fornecimento de todas as informações necessárias ao banco de dados. O módulo propõe alternativas tecnicamente razoáveis para cada dano observado nas estruturas em questão. Além disso, são propostas combinações de alternativas para minimizar os custos globais. As estratégias e as combinações delas são consideradas por um período de seis (6) anos. O BMS-MV também inclui um banco de dados abrangente.

b) Módulo BMS-MB

Compara os benefícios econômicos de cada estratégia de manutenção, fundamentalmente considerando a diferença entre os custos para o usuário de utilizar ou não os procedimentos recomendáveis para cada caso. Os resultados são direcionados para a análise do conjunto de pontes correspondentes à malha de rodovias ou a trechos específicos dela.

c) Módulo BMS-EP

É responsável pela escolha do melhor conjunto de estratégias para todas as pontes dentro de um período de seis (6) anos. O objetivo principal deste módulo é alcançar o melhor estado geral de todas as pontes da malha rodoviária, dado um determinado cenário orçamentário para cada ano, ou determinar o orçamento necessário para atingir o nível ótimo de qualidade de todas as pontes da malha rodoviária.

d) Módulo BMS-SB

É destinado à previsão dos custos de manutenção para médio e longo prazo, baseados no estado atual das pontes.

Se apresenta no Apêndice A um resumo dos SGPo revisados neste capítulo. As informações estão baseadas segundo referências indicadas no texto deste capítulo. É conveniente indicar que as informações não disponíveis (n.d.) geralmente se devem às restrições de certos sistemas para informar à comunidade algumas de suas características.

3. SITUAÇÃO DA GESTÃO DE PONTES NO BRASIL

As entidades responsáveis da administração da malha rodoviária do país não estão isentas da necessidade de implementar sistemas cada vez mais completos, eficientes e atualizados para controlar o natural decaimento das condições de suas obras. Os processos e atividades de gestão implementados no Brasil, sobretudo o que corresponde à parte de cadastramento e monitoramento de obras, são as de maior consideração e continuam sendo aperfeiçoadas pelas principais gestoras das rodovias nacionais.

Similar ao que acontece com as gestoras internacionais de pontes, cada agência nacional, administradora ou fiscalizadora de uma rede de OAEs, pode utilizar ou definir processos e procedimentos mínimos que se devem cumprir para controlar, manter ou recuperar as boas condições de suas obras. No caso dos trechos de rodovia onde as entidades públicas não desempenham administração direta, elas cumprem a função de regular e fiscalizar o mando das infraestruturas rodoviárias por meio de programas de concessão, geralmente outorgadas a empresas privadas.

Referente ao nível de aprofundamento e aperfeiçoamento dos sistemas de gestão usados pelas empresas concessionárias, pode-se dizer que os procedimentos ou métodos usados para definir que obras devem ser recuperadas são variáveis, tal como o tipo de trabalho e quando devem ser feitos. Porém, a maioria tem por semelhança o uso de normas locais relacionadas aos requisitos e procedimentos para a coleta de dados de inspeções, tal como a utilização de medidas de classificação de condição que são parecidas na grande maioria.

Este capítulo tem por objetivo mostrar uma visão geral sobre a gestão das pontes e viadutos das rodovias brasileiras, dando maior ênfase às características e procedimentos seguidos pelas administradoras das OAEs espalhadas ao longo das principais rodovias federais do país, contudo, também se apresentam informações básicas sobre a gestão das obras no Estado de São Paulo.

3.1. Composição da malha rodoviária e administração da infraestrutura

Segundo Barat (1978) citado por Martinez (2016), o Brasil optou a partir da década de 1950 pelo crescimento do transporte rodoviário para atender a demanda da sociedade e da economia nacional. Inicialmente devido à crescente demanda de

transporte doméstico de carga foi que realmente as autoridades começaram a investir mais em infraestrutura viária. A malha rodoviária brasileira experimentou maior expansão nas décadas de 60 e 70, período no qual cerca de 20% do total de gastos do setor público, conforme Relatório do Banco Mundial, foi destinado a construção e manutenção de infraestrutura rodoviária (Martinez, 2016).

Foi a partir da Lei nº 5917 de 10 de setembro de 1973 que deu como resultado do planejamento de desenvolvimento global das vias de transporte do país o Plano Nacional de Viação (PNV), vigente e com alterações até o momento. É assim como o PNV classifica a malha rodoviária nacional em Sistema Rodoviário Federal (SRF), Sistema Rodoviário Estadual (SRE) e Sistema Rodoviário Municipal (SRM). Atualmente, o Brasil ocupa a quarta posição no ranking mundial de maiores malhas rodoviárias, alcançando uma extensão de aproximadamente 1.559.800km. A figura 3.1 compara a extensão dos sistemas rodoviários do país, demonstrando uma extensão de rodovias municipais muito superior às estaduais e as federais.



Figura 3.1 - Classificação e extensão da rede rodoviária brasileira (Fonte: DNIT)

3.1.1. Rodovias Federais

Geralmente, as estradas de rodagem das rodovias federais interligam dois ou mais Estados da Federação (ver figura 3.2). As rodovias federais foram definidas pela Lei 12.379 de 06 de janeiro de 2011, que dispõe sobre o Sistema Nacional de Viação (SNV) e são os órgãos de gestão os responsáveis de implementar as políticas de infraestrutura contidas no Sistema Federal de Viação (SFV), compreendendo sua operação, manutenção, restauração ou reposição, adequação de capacidade e ampliação, mediante construção de novas vias, dentre outras atribuições. De acordo

com a sua orientação geográfica, a malha federal, composta pelas rodovias conhecidas pelo prefixo BR, dividem-se em rodovias radiais, cuja quilometragem a contar inicia em Brasília; rodovias longitudinais, iniciadas a partir do litoral; rodovias transversais; rodovias diagonais e rodovias de ligação.



Figura 3.2 - Rodovias federais do Brasil (Fonte: MINFRA)

Além disso, a mesma Lei que dispõe sobre o SNV indica que as rodovias federais devem cumprir um dos seguintes requisitos: promover a integração regional, interestadual e internacional; ligar capitais de Estados entre si ou ao Distrito Federal; atender a fluxos de transporte de grande relevância econômica e, prover ligações indispensáveis à segurança nacional.

No âmbito das rodovias federais, a autoridade sobre a infraestrutura e estrutura operacional corresponde, em princípio e por padrão, ao Governo Federal, representado pelo DNIT, autarquia ligada ao Ministério da Infraestrutura (MINFRA).

Existem outros mecanismos para administrar as rodovias federais, como a Rodovia Delegada, cuja responsabilidade pelos programas de operação, manutenção, conservação, restauração ou construção de rodovias é transferida a um

Município, Estado ou Distrito Federal por intermédio de convênio de delegação com o DNIT. Também se tem a figura da Rodovia Concedida, transferida por processo à iniciativa privada para exploração, obrigando a empresa concessionária à execução de todos os trabalhos necessários para garantir as boas condições dos ativos, assim como a qualidade do serviço oferecido aos usuários. Por último, a Rodovia Delegada a Município, Estado ou Distrito Federal, com o encargo de exercitar o processo de transferência, a regulação, supervisão e fiscalização de iniciativa privada.

A administração por concessão promove o ingresso de investimentos privados que permitem ao Governo Federal oferecer uma operação, manutenção e melhora constantes em trechos vitais para o desenvolvimento social e econômico do país. Segundo informações tomadas do site oficial do MINFRA, 12,8% (9.697 km) da malha rodoviária federal são administradas por meio de concessões reguladas pela ANTT. Na figura 3.3 pode-se visualizar o mapa do país com a distribuição dos trechos concessionados.

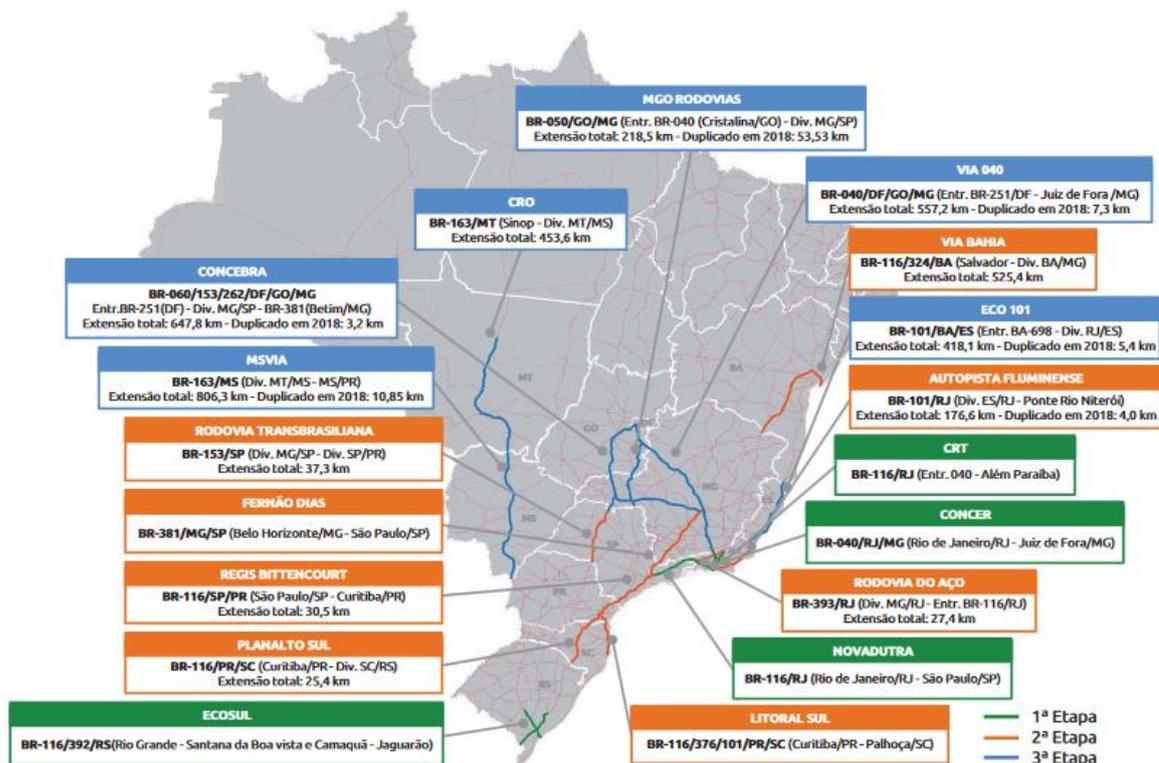


Figura 3.3 - Distribuição de rodovias federais concessionadas (Fonte: SNTT)

Sabe-se também que a primeira etapa de concessão de rodovias federais se realizou entre 1994 e 1998 (6 contratos), prosseguindo uma segunda etapa entre 2008 e 2009 (8 contratos) e uma terceira que se estendeu entre 2013 e 2015 (8

contratos). A quarta etapa teve início no começo de 2018 e até o final de 2019 foram assinados três novos contratos.

3.1.2. Rodovias Estaduais

No que concerne as rodovias estaduais, estas podem incluir rodovias, pontes, viadutos e tuneis caracterizados por ter início e fim dentro das demarcações territoriais de cada estado. O PNV estabelece a obrigatoriedade dos Estados Federativos de elaborarem seu respectivo Sistema Rodoviário Estadual. É dentro do Sistema Estadual de Viação (SEV) que se define a situação física das rodovias; tal como o conjunto detalhado de informações padronizadas sobre as mesmas.

Para delinear uma rodovia pertencente ao Sistema Rodoviário Estadual se deve satisfazer, pelo menos, alguma condição, por exemplo, conectar a Capital do Estado às sedes de municípios, conectar as sedes municipais entre si, conectar duas ou mais rodovias federais e/ou estaduais, conectar as rodovias federais ou municipais com outros modais de transporte, etc. Conforme a posição geográfica, as rodovias estaduais podem-se dividir entre rodovias radiais, transversais e longitudinais.



Figura 3.4 - Ponte de concreto no estado de Mato Grosso, sobre o Rio Aripuanã, na rodovia MT-208 (Fonte: www.mt.gov.br)

O controle das rodovias estaduais é atribuição do respectivo Governo de Estado, que também tem a faculdade de conceder a gestão e exploração rodoviária à iniciativa privada. Corresponde ao Departamento de Estradas de Rodagem (DER), autarquia representativa do Governo de Estado, administrar o sistema rodoviário estadual, sua integração com as rodovias municipais, federais e sua interação com os demais modos de transporte.

No que tange ao Estado de São Paulo, consoante as informações facilitadas no site oficial do DER-SP (www.der.sp.gov.br), a soma das rodovias federais, estaduais e municipais, que cruzam seu território, somam cerca de 199.660 km, tornando-se o maior sistema estadual de transporte rodoviário do Brasil. Até 2018, só as rodovias de domínio estadual se estendiam por aproximadamente 22.101,59 km, valor distribuído em 14.575,32 km de rodovias sob administração do DER-SP. Na figura 3.5 se observam as rodovias estaduais de São Paulo onde os traços grossos de diferentes cores correspondem aos trechos concessionados.

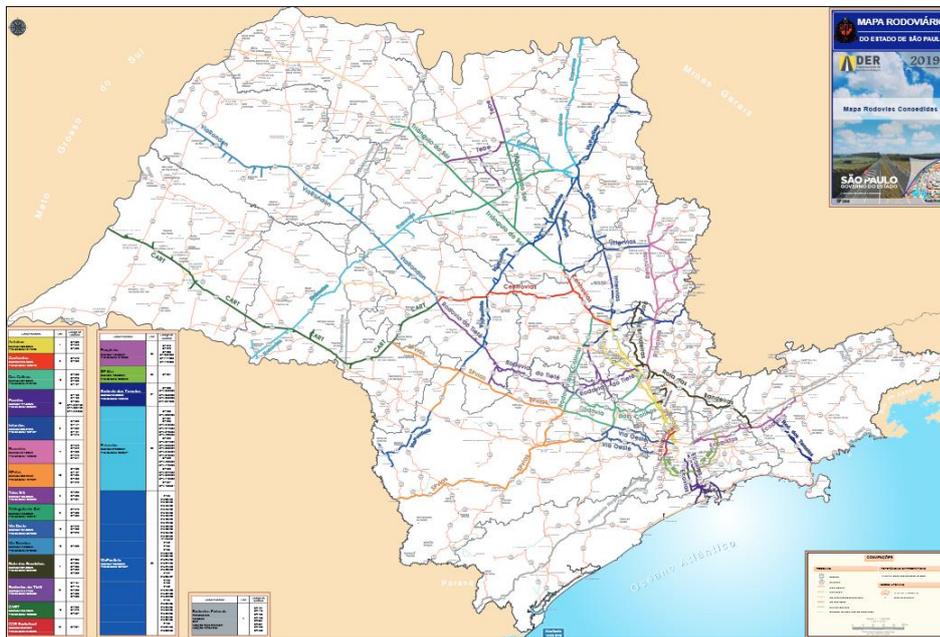


Figura 3.5 - Mapa rodoviário do Estado de São Paulo (Fonte: DER-SP)

O Programa de Concessões Rodoviárias do Estado de São Paulo foi instituído em março de 1998. A principal finalidade foi, e continua sendo, suprir as necessidades de investimentos na infraestrutura de transporte para favorecer o desenvolvimento do Estado e garantir conforto e segurança aos usuários.

Foi assim que a Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP) foi criada em 2002 como autarquia de regime especial, com o intuito de regular e fiscalizar o Programa de Concessões Rodoviárias, além do Transporte Coletivo Intermunicipal de Passageiros e todos os serviços de transporte público delegados no Estado de São Paulo. Na figura 3.6 são apresentadas as relações e as funções de atuação da ARTESP.



Figura 3.6 - Funções da ARTESP (Fonte: www.artesp.sp.gov.br)

Hoje em dia, o Estado de São Paulo soma vinte (20) Concessionárias, cobrindo aprox. 8.401 km de rodovias. Na tabela 3.1 são apresentadas as Empresas Concessionárias que atualmente operam no país, distribuídas por cada Estado.

Tabela 3.1 - Empresas concessionárias no Brasil por estado (Fonte: Martinez, 2016)

Estado	Concessionária
Mato Grosso	Rota do Oeste / Morro da Mesa
Mato Grosso do Sul	MS Via
Goiás	Via 040 / MGO Rodovias / CONCEBRA
Pernambuco	Rota dos Coqueiros / Rota do Atlântico
Bahia	Bahia Norte / CLN / Via Bahia
Minas Gerais	Concer / Fernão Dias / Nascentes das Gerais / Via 040 / MGO Rodovias / CONCEBRA
Espírito Santo	Rodosol
Rio de Janeiro	Concer / CRT / Fluminense / LAMSA / NovaDutra / Ecoponte / Rodovia do Aço / Rota 116 / ViaLagos
São Paulo	AutoBan / Autovias / CART / Centrovias / Colinas / Ecopistas / Ecovias / Fernão Dias / Intervias / NovaDutra / Régis Bittencourt / Renovias / RodoAnel / Rodovias do Tietê / Rota das Bandeiras / SPvias / SPMar / Tamoios / Transbrasiliana / TEBE / Triângulo do Sol / Vianorte / ViaOeste / Viarondon
Paraná	Caminhos do Paraná / Ecocataratas / Econorte / Ecovia / Litoral Sul / Planalto Sul / Régis Bittencourt / RodoNorte / Viapar
Santa Catarina	Litoral Sul / Planalto Sul
Rio Grande do Sul	Concepa / Ecosul

3.1.3. Rodovias Municipais

A malha viária de um município pode estar composta por rodovias e vias expressas, pontes e túneis, que interligam localidades dentro de um mesmo município. As situações físicas das rodovias e o conjunto detalhado de suas informações padronizadas estão definidas no Sistema Municipal de Viação (SMV).

A responsabilidade pela administração da infraestrutura rodoviária e estrutura operacional das rodovias municipais recai sobre o governo do Município; porém, essa administração pode ser efetivada tanto por administração direta como por concessão à iniciativa privada.

3.2. Documentos de referência para a gestão

No capítulo 2 desta pesquisa evidenciou-se que todos os SGPO implementados no exterior estão formados por um acúmulo de atividades e procedimentos que auxiliam aos administradores na tomada de decisões, principalmente procurando a segurança estrutural e a conservação das obras. Essa situação implica a necessidade de padronizar certos procedimentos, como a coleta de dados de inventário e de classificações de condição, para conformar uma base de dados que resulte em avaliações e previsões de condição mais confiáveis, coerentes e eficazes. Cabe mencionar que não existe uma única norma ou diretriz que oriente na gestão integral das OAEs, mas se estão disponíveis documentos para realizar certas atividades ou procedimentos.

Os gestores das pontes e viadutos rodoviários do Brasil têm alguns documentos de abrangência nacional ou estadual para utilização, principalmente referidas à realização de inspeções, possibilitando um posterior diagnóstico dos elementos ou componentes das pontes, e assim, planejar e programar possíveis trabalhos de intervenção. A seguir são apresentados os documentos mais relevantes.

a) Norma NBR 9452 - Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto (ABNT, 2016).

Documento elaborado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Estabelece os requisitos exigíveis para a realização de inspeções em pontes, viadutos e passarelas de concreto, além da apresentação dos resultados das inspeções. Classifica as OAEs segundo os critérios de estado operacional e o

urgenciamento de ações de recuperação, aplicados aos parâmetros de segurança estrutural, funcional e durabilidade. Com data de 27 de setembro de 2019 entrou em vigor a última versão desta norma.

b) Norma DNIT 010/2004-PRO - Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido - Procedimento (DNIT, 2004b)

Documento elaborado pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias do DNIT. Fixa as condições exigíveis para a realização de inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido. Também, apresenta o planejamento e o procedimento para a realização das inspeções, fixando os diversos tipos e suas respectivas frequências de realização. Mantem-se vigente a primeira edição de 2004.

c) Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias (DNIT, 2004a)

Trata em maior profundidade os procedimentos e métodos para inspecionar pontes, tanto de concreto armado, concreto protendido e aço. Inclui recomendações para a realização de inspeções submersas.

d) ET-00.000.000-0-C21/002 - Controle das Condições Estruturais, Funcionais e de Durabilidade das Obras de Arte Especiais (ARTESP, 2007)

Iniciativa do Governo do Estado de São Paulo, mais precisamente da Diretoria de Investimentos da ARTESP. Esta especificação técnica considera um conjunto de atividades e procedimentos para assegurar a realização de trabalhos de manutenção ou outras ações requeridas nas OAEs em Concessão. Desse modo aponta a garantir a manutenção e adequar a segurança e funcionalidade das obras. Para cumprir com seus objetivos define procedimentos para cadastro, inspeções de campo, ensaios, diagnóstico preliminar e definitivo, planejamento de prioridades de intervenção, acompanhamento e registro de recuperações, avaliação de desempenho e planejamento com atualizações de dados e registros. Mantem-se vigente desde o ano de 2007.

3.3. Cadastro de inventário e dados de inspeções

Sabe-se que uma gestão eficiente de pontes se suporta no cadastramento e monitoramento das obras existentes, que por sua vez devem permitir elaborar, manter e atualizar uma base de dados envolvendo as mais variadas informações

relativas a inventário, gerenciamento de inspeções, monitoração da condição, registro de relatórios e ações de intervenção; quer dizer, durante todo o ciclo de vida das obras.

Na atualidade, o país não tem um sistema de cadastro único e de alcance nacional que armazene todas as informações de inventário, dados de inspeções e classificação de condição de cada ponte espalhado no território brasileiro. Pelo contrário, aparentemente cada administrador, público ou privado, constrói sua própria base de dados compilando documentos em físico ou operando diferentes ferramentas computacionais para digitalizar e armazenar a informação coletada.

Portanto, resulta importante conhecer os tipos de inspeções, as definições e características desses procedimentos, compreendendo que uma base de dados se confecciona apoiado nos trabalhos de cadastro e vistorias de campo. Nesta seção vamos tratar o básico das inspeções segundo os regulamentos mais usados no Brasil: a norma do DNIT, DNIT 010/2004-PRO; a Norma Brasileira, ABNT NBR 9452; e a especificação paulista da ARTESP, ET-00.000.000-0-C21/002.

Antes de lidar com os tipos de inspeções é conveniente definir a inspeção de pontes. De acordo com a norma do DNIT, a inspeção de pontes se define como “a atividade técnica especializada que abrange a coleta de elementos, de projeto e de construção, o exame minucioso da ponte, a elaboração de relatórios, a avaliação do estado da obra e as recomendações, que podem ser de nova vistoria, de obras de manutenção, de obras de recuperação, de reforço ou de reabilitação”.

A norma DNIT 010/2004-PRO e a norma NBR 9452:2016 possuem grandes semelhanças nas definições e características de quatro tipos de inspeções, a saber: Inspeção Cadastral, Inspeção Rotineira, Inspeção Extraordinária e Inspeção Especial. Adicionalmente, a norma do DNIT define um quinto tipo, a Inspeção Intermediária. Todos esses tipos de inspeções são definidos nas seguintes linhas:

a. Inspeção Cadastral

Primeira inspeção que se realiza em uma ponte, obrigatoriamente depois de sua construção ou quando a obra é submetida a importantes alterações estruturais. Deve conter todos os elementos de projeto e construção, enquanto o trabalho de campo deve ser dirigido por uma equipe que inclua um inspetor qualificado. Servirá

de referência para todas as futuras inspeções. O Anexo A apresenta o modelo de ficha que sugere o normativo do DNIT para uma Inspeção Cadastral.

b. Inspeção Rotineira

Vistoria de acompanhamento periódico. A frequência recomendada para a norma do DNIT é de máximo a cada dois (2) anos, enquanto a NBR 9452:2016 estipula um tempo máximo de um (1) ano. Registra a existência de novos defeitos ou sucessos, bem como verifica visualmente a evolução de danos observados em uma inspeção anterior. Veja no Anexo B o modelo de Ficha de Inspeção Rotineira.

c. Inspeção Extraordinária

É uma vistoria não programada, solicitada para avaliar um dano estrutural excepcional, causado pelo homem ou pela natureza. A norma do DNIT faz ênfase no tipo e tamanho de dano sofrido, podendo limitar o volume de tráfego, a magnitude da carga transportada e a intervenção da OAE. A frequência de execução desta inspeção depende da ocorrência de um evento ou acidente que possa afetar significativamente o estado de uma ou várias OAEs.

d. Inspeção Especial

Inspeção visual pormenorizada, realizada com periodicidade não superior a cinco (5) anos e liderada por um inspetor sênior. A NBR 9452:2016 considera que esses cinco (5) podem ser postergados até oito (8) anos quando a OAE apresenta boas condições de durabilidade. Devem ser realizadas quando a inspeção Cadastral ou a inspeção Rotineira revelam defeitos graves ou críticos na estrutura da obra, em pontes que se distinguem por sua complexidade, ou em situações especiais, como antes e durante a passagem de cargas excepcionais.

e. Inspeção Intermediária

Definida apenas na norma do DNIT. Monitora uma deficiência suspeitada ou já detectada, tal como um pequeno recalque de fundação, uma erosão incipiente, um encontro parcialmente descalçado, o estado de um determinado elemento estrutural, etc. É realizada prévia sugestão de inspeção cadastral ou rotineira.

De outro lado, apesar que a ET-00.000.000-0-C21/002 recomenda a utilização da norma NBR 9452 e, por conseguinte, a consideração aos tipos de inspeções contidos nela, a especificação da ARTESP tem suas próprias definições e condições exigíveis para quatro tipos de inspeções tratados a seguir:

a. Cadastramento Inicial

Atividades de primeira pesquisa e coleta de dados (documentos e inspeções de campo) disponíveis sobre as OAEs de uma concessão. O cadastro inicial das informações de arquivos compreende: elementos de projeto original, registros de As-Built, registros de ensaios, registros de ações temporárias, registros de recuperações, registros de ocorrências acidentais.

b. Inspeção Inicial

Primeira inspeção que deve ser efetuada em todas as OAEs e dentro do primeiro ano de iniciadas as operações por parte da concessionária. Composta de cadastramento inicial de campo e um diagnóstico inicial sobre o estado das obras, incluindo elementos de patologia, elementos de terapia e classificação segundo estado operacional e urgenciamento de ações.

c. Inspeção Rotineira

Inspeções periódicas realizadas para controlar o desempenho das OAEs durante e após sua construção, além de avaliar e classificar a condição das obras. Os dados recolhidos na atividade são registrados em fichas técnicas segundo modelo disponibilizado na norma. Deve ser efetuada no máximo a cada um (1) ano e ser apresentada na data de aniversário do contrato de concessão com tolerância máxima de três meses.

d. Inspeção Especial

Inspeção mais precisa e detalhada, previamente requerida por Inspeção Inicial ou Rotineira que planeja ações de curto prazo em uma OAE. Deve conter mapeamento completo das anomalias visíveis, terapia trazendo o diagnóstico da obra, as intervenções e o prazo em que as mesmas devem ocorrer baseando-se nas informações de Inspeção Inicial ou Rotineira mais recente. Deve ter frequência de realização a cada cinco (5) anos, conforme recomendação na NBR 9452.

Na figura 3.7 se apresenta o esquema de fluxo elaborado por Cruz et al. (2017) para evidenciar todas as etapas de vistoria de pontes e viadutos e suas relações, de acordo ao disposto no normativo do DNIT, ARTESP e NBR 9452. Contempla todos os processos e atividades que devem ser considerados para um melhor acompanhamento das OAEs.

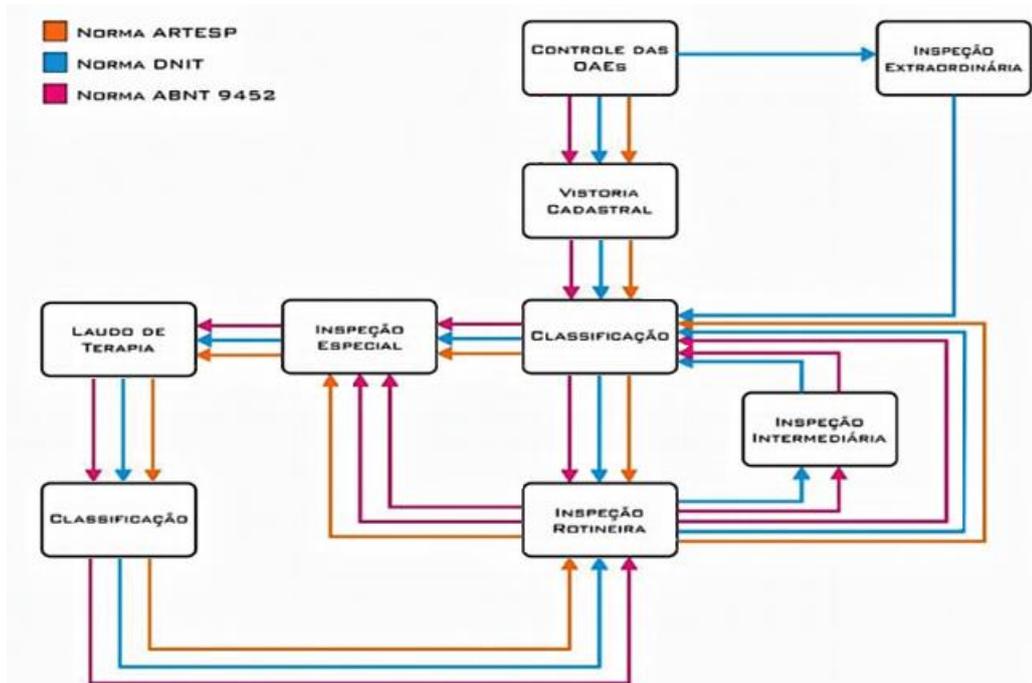


Figura 3.7 - Fluxo de relação entre as inspeções em OAEs (Fonte: Cruz et al., 2017)

3.3.1. OAEs sob jurisdição Federal

Todas as obras são inspecionadas e cadastradas segundo a norma DNIT 010/2004-PRO. Porém, quando as atividades requerem maior aprofundamento, sobretudo em técnicas e procedimentos complexos, também são consideradas as recomendações da NBR 9452 e o Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias.

Como se mencionou no item “a” da seção 3.3, a Inspeção Cadastral é principalmente realizada logo após a construção de uma ponte. No entanto, a maior parte do parque de obras é de avançada idade e não possuem, praticamente, registros físicos dessas atividades, sendo então obrigatória a realização dessas atividades tanto nas construções antigas como nas obras novas e ou relativamente novas. Devido a isso, o DNIT iniciou no ano de 2012 um plano de cadastramento de obras, enquanto são exigidas às empresas Concessionárias a execução de Inspeções Cadastrais em todas as suas pontes dentro do primeiro ano de operações.

Por outro lado, as Concessionárias têm regulada, dentro de suas atividades de operação, a prática de Inspeções Rotineiras, sendo obrigadas a realizá-las em intervalos regulares de um (1) ano. As informações e recomendações decorrentes devem constar no Relatório Anual de Monitoração de OAEs, documento que deve ser previamente revisado e aprovado pela ANTT.

Resulta adequado dizer que geralmente as Concessionárias recorrem à terceirização das atividades de inspeção, além da avaliação do estado das construções e o requerimento de trabalhos de intervenção para um prazo médio de tempo. As empresas de Consultoria devem ser especialistas e com experiência na inspeção de pontes, contar com o pessoal técnico qualificado e o equipamento necessário que permita atender as demandas das normas locais, bem como cumprir os padrões próprios dos administradores e das empresas externas.

Alternativamente, uma Inspeção Cadastral ou Inspeção Rotineira pode recomendar a realização de outros tipos de inspeções normalizadas, como podem ser a Inspeção Especial ou a Inspeção Intermediária. As informações e recomendações obtidas dessas inspeções são registradas em relatórios individualizados, respeitando as diretrizes das Fichas de Inspeção Rotineiras. Como já foi relatado no item c da seção 3.3, a demanda de uma Inspeção Extraordinária normalmente está associada a um desastre natural ou um evento causado pela ação humana, mas a resposta da estrutura se vê refletida na presença de novos defeitos ou inclusive a piora de alguma patologia existente. Por conseguinte, depois da inspeção e o diagnóstico dos componentes afetados, a condição final da ponte pode ter diminuído drasticamente, possivelmente requerendo a interdição da obra e uma intervenção de emergência.

Para o registro das obras de domínio federal o DNIT dispõe desde 1994 do Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais (SGO), um *software* que sistematiza uma série de procedimentos e rotinas, como por exemplo: o levantamento de dados cadastrais e de inspeções (de acordo com a Norma DNIT 010/2004-PRO), registros fotográficos, vídeos, croquis e outros (DNIT, 2017). Atualmente, o SGO do DNIT é a ferramenta computacional brasileira mais completa para administrar OAEs, embora só seja aproveitada com as obras federais sob administração direta. A tabela 3.2 mostra os módulos inter-relacionados que compõem o SGO, enquanto a figura 3.8 exhibe a tela inicial do módulo SGO Mobile e as opções disponíveis.

Tabela 3.2 - Composição do SGO

Módulo	Função
SGO Web	Análise e aprovação de vistorias técnicas, emissão de relatórios
SGO Inspector	Inclusão de dados da vistoria (fotos, croquis, vídeos e outros)
SGO Mobile	Auxílio no preenchimento de fichas cadastrais e de inspeção



Figura 3.8 - Tela de início do SGO Mobile

Até 2018, a base de dados do DNIT tem cadastradas 8.336 OAEs espalhadas nas Rodovias Federais do país, sendo que 6.134 estão sob a administração direta do DNIT e as restantes em trechos rodoviários sob Concessão, Estaduais Coincidentes, Convênios Administrativos e Atos Legais (Queiroz et al., 2018). No entanto, resulta necessário dizer que dentro dessa base de dados não estão apenas adicionadas pontes e viadutos como OAEs, senão também passarelas, túneis, bueiros e muros de contenção. A figura 3.9 exibe a tela do SGO Mobile para a opção de Cadastro de Obras, cujo detalhamento compreende o preenchimento de uma grande variedade de informações em diferentes abas.

Identificação	Carac. Funcionais	Rotas Alternativas	Aspectos Especiais	Elementos Componentes	Deficiências Funcionais	Substituição
OAE: 60277	Identificação: Ponte s/ o Rio São Marcos					
Altitude (m): 811,00	Latitude: 17° 2,080'					
Longitude: 47° 9,809'						
Tipo de Estrutura: Viga de concreto armado						
Natureza da Transposição: Ponte						
Sistema Construtivo: Moldado no local						
Unit: UL 6 / 12						
Rodovia / UF: BR040 / MG						
Trecho (PIM): D40BMS0090						
Local na Rodovia (Km): 0,00						
Cidade mais Próxima: Paracatu						
Dimensões (Comp x Larg): 270,00 x 10,00						
Tipo de Administração: Administração Direta						
Administrador: Depto Nac de Infra-Estrutura e Transport						
Projetista: Sérgio Marques de Souza						
Construtor: Soc. Engª Comércio Ltda - Construtores						
Trem-Tipo: 24						
Ano de Construção: 1958						
Localização do Projeto: 6ª UNIT						
Local Doc/ots Construção:						
Local Documentos Diversos:						
Period. Inspeção (Anos): 2						
Equipamento de Inspeção: Não						
Melhor Época p/ Inspeção: Jun à Nov						
Arquivo de Vídeo: c:\sgo\videos\video.mpg						
Data de Cadastramento: 11/02/2004						

Figura 3.9 - Tela principal de cadastro de obras do SGO v3

3.3.2. OAEs sob jurisdição do Estado de São Paulo

Em princípio todos os gerenciadores de pontes do Sistema de Rodovias Estaduais utilizam a versão vigente da norma ABNT NBR 9452. O documento da Associação Brasileira de Normas Técnicas está orientado a exigir condições para a realização de vistorias de pontes e viadutos de concreto. No caso específico das empresas Concessionárias do Estado de São Paulo utilizam em primeira instância a Especificação Técnica da ARTESP, o ET-00.000.000-0-C21/002.

O documento da ARTESP orienta sobre as atividades de cadastro e de inspeções, bem como o controle do estado das pontes, providenciando diagnósticos de estado e recomendações para futuras ações. Geralmente os administradores complementam com a norma NBR 9452 as recomendações para realizar procedimentos mais detalhados ou para responder a questões omitidas na especificação da ARTESP. Contudo, as Concessionárias não usam apenas o documento da ARTESP para a coleta de dados e informações, mas também para implementar um plano geral de prioridades de recuperação em suas obras.

Nas OAEs Concessionadas os trabalhos de Cadastramento e Inspeção Inicial devem ser realizados dentro do primeiro ano de iniciadas as operações das empresas privadas. Por outro lado, as Inspeções Rotineiras são efetuadas regularmente uma vez cada ano e, como acontece frequentemente com as Concessionárias federais, os trabalhos de vistorias são terceirizados a consultorias especializadas, contratadas diretamente pela Concessionária. Como produto dessas inspeções os resultados e recomendações são incluídos em relatórios que passam pela supervisão da ARTESP.

Qualquer necessidade de uma Inspeção Especial resulta de um caso de emergência, sendo geralmente solicitada por recomendação de uma Inspeção Cadastral ou Rotineira. A Inspeção Especial é mais detalhada para que a patologia da OAE seja facilmente localizada. Faz parte da Inspeção Especial o Relatório de Terapia para correção do problema.

As autoridades responsáveis das OAEs de São Paulo, inclusive as consultorias terceirizadas, não utilizam uma única ferramenta de computador para cadastrar as informações e dados das atividades técnicas realizadas em suas pontes. Geralmente usam *softwares* ou aplicativos móveis para cada atividade, sem contar o

registro de planos, programas de intervenção e relatórios. Entre os aplicativos digitais mais usados podemos mencionar:

- Planilhas Eletrônicas de Excel

A maioria das Concessionárias efetuam o controle de estado de condição de suas OAEs mediante planilhas automatizadas. Muito usado por sua ampla disponibilidade e simplicidade;

- Sistema de Monitoramento de Obras Viárias (SIMOV)

Ferramenta para a gestão e monitoramento de obras de um sistema viário. Desenvolvida pela empresa de informática e tecnologia chamada ZENSY. O sistema permite controlar os dados das obras, catalogar danos e falhas, planejar os serviços e custos de manutenção.

- SIG-ArcGIS

Conjunto de ferramentas de computador amplamente utilizadas para realizar o referenciamento geográfico de um inventário de obras. Produzidos e comercializados pela ESRI, têm aplicativos com plataforma para computador e, também, aplicativos com plataforma móvel, tanto para a captura e gerenciamento de informações em campo como para a publicação e gestão *web*.

3.4. Classificação da condição das obras

Posterior à realização das inspeções de campo em uma rede de pontes, as equipes técnicas realizam o diagnóstico de cada componente de obra para determinar seu estado real de condição, atribuindo um valor discreto a esse estado através do uso de medidas de desempenho. Tanto nas últimas edições da norma de abrangência nacional, ABNT NBR 9452, como na edição única da norma federal, DNIT 010/2004-PRO, apresentam medidas de desempenho análogas aos sistemas estrangeiros. Sobretudo consideram os tipos de avaliações que priorizam o estado de conservação e o nível de segurança estrutural das obras. As medidas de desempenho podem ser atribuídas aos elementos da ponte, aos componentes da ponte e a toda a ponte.

As normas brasileiras definem algumas medidas de desempenho como uma escala de Notas Técnicas. Essas notas são atribuídas em função das observações empíricas (inspeção visual do elemento) e do julgamento de

especialistas. De agora em diante, para homogeneizar os diferentes nomes dados a essas medidas de desempenho, qualquer menção de Índice de Condição (IC) se referirá, implicitamente, a uma Nota Técnica ou Classificação de Condição.

No âmbito federal a norma do DNIT (2004b) estabelece uma classificação baseada em códigos numéricos, associando cada valor à insuficiência estrutural e à condição de estabilidade observada em um componente inspecionado visualmente. Com uma escala de ICs que vai de um (1) a cinco (5), avalia a condição de instabilidade de precária à boa, com vistas a danos no elemento estrutural em suas ações corretivas (Cruz et al., 2017). A tabela 3.3 mostra as classificações do DNIT 010/2004-PRO.

Tabela 3.3 - Índices de Condição (ICs) detectados nas inspeções (Fonte: DNIT, 2004b)

NOTA	DANOS NO ELEMENTO / INSUFICIÊNCIA ESTRUTURAL	AÇÃO CORRETIVA	CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE	CLASSIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DA PONTE
5	Não há danos nem insuficiência estrutural.	Nada a fazer.	<i>Boa</i>	<i>Obra sem problemas</i>
4	Há alguns danos, mas não há sinais de que estejam gerando insuficiência estrutural.	Nada a fazer; apenas serviços de manutenção	<i>Boa</i>	<i>Obra sem problemas importantes</i>
3	Há danos gerando alguma insuficiência estrutural, mas não há sinais de comprometimento da estabilidade da obra.	A recuperação da obra pode ser postergada, devendo-se, porém, neste caso, colocar-se o problema em observação sistemática.	<i>Boa aparentemente</i>	<i>Obra potencialmente problemática</i> Recomenda-se acompanhar a evolução dos problemas através das inspeções rotineiras, para detectar, em tempo hábil, um eventual agravamento da insuficiência estrutural.
2	Há danos gerando significativa insuficiência estrutural na ponte, porém não há ainda, aparentemente, um risco tangível de colapso estrutural.	A recuperação (geralmente com reforço estrutural) da obra deve ser feita no curto prazo.	<i>Sofrível</i>	<i>Obra problemática</i> Postergar demais a recuperação da obra pode levá-la a um estado crítico, implicando também sério comprometimento da vida útil da estrutura. Inspeções intermediárias são recomendáveis para monitorar os problemas.
1	Há danos gerando grave insuficiência estrutural na ponte; o elemento em questão encontra-se em estado crítico, havendo um risco tangível de colapso estrutural.	A recuperação (geralmente com reforço estrutural) ou em alguns casos, substituição da obra deve ser feita sem tardar.	<i>Precária</i>	<i>Obra crítica</i> Em alguns casos, pode configurar uma situação de emergência, podendo a recuperação da obra ser acompanhada de medidas preventivas especiais, tais como: restrição de carga na ponte, interdição total ou parcial ao tráfego, escoramentos provisórios, instrumentação com leituras contínuas de deslocamentos e deformações, etc.

Segundo o padrão normativo do DNIT cada OAE está subdividida em cinco (5) grandes componentes: Laje, Vigamento Principal, Mesoestrutura, Infraestrutura e Pistas/Acessos. Para cada um dos componentes é atribuído um IC que reflete seu nível de dano, seu estado de segurança estrutural e estabilidade; enquanto o IC da ponte (Nota Técnica Global) resulta do menor valor entre os ICs dos componentes (veja-se a figura 3.10).

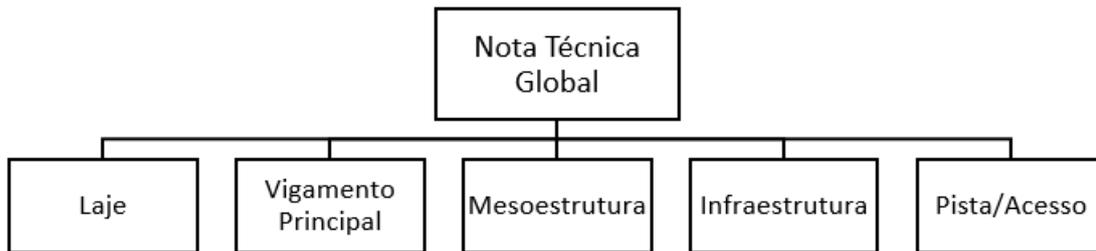


Figura 3.10 - Componentes da estrutura de acordo com a norma DNIT010/2004

(Fonte: Buratto et al., 2017)

De acordo com a pesquisa de Queiroz et al. (2018), as últimas inspeções realizadas pelo DNIT em aproximadamente 4.742 OAEs da rede rodoviária federal indicaram que cerca de cinquenta e oito por cento (58%) das obras apresentam uma condição boa (com notas 4 e 5), trinta e oito por cento (38%) estão com uma condição de regular (nota 3) e em menor medida, quatro por cento (4%), experimentam uma condição problemática (notas 1 e 2).

Agora, em referência à norma NBR 9452:2016, esta também estabelece requisitos de desempenho para as OAEs. Estipula uma escala de notas de classificação que varia de um (1) a cinco (5), representando a nota um (1) uma condição crítica, a nota cinco (5) está associada a uma condição excelente, enquanto as notas restantes entre esses valores extremos estão ligadas a uma condição ruim, regular e boa.

Essas notas técnicas devem ser associadas aos parâmetros estrutural, funcional e durabilidade. Além disso, associa as anomalias ao item inspecionado, ao tipo de material constituinte, e a tipologia construtiva. Essa norma ainda propõe um fluxograma de atividades permitindo ao profissional o enquadramento e gerenciamento do processo de inspeção, seja qual for o tipo de inspeção (Cruz et al.,

2017). Na tabela 3.4 são apresentadas as classificações de condição segundo a ABNT NBR 9452:2016.

Tabela 3.4 - Classificação da condição de OAEs segundo os parâmetros estrutural, funcional e de durabilidade (Fonte: ABNT, 2016)

NOTA	CONDIÇÃO	CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL	CARACTERIZAÇÃO FUNCIONAL	CARACTERIZAÇÃO DE DURABILIDADE
5	<i>Excelente</i>	A estrutura apresenta-se em condições satisfatórias apresentando defeitos irrelevantes e isolados.	A OAE apresenta segurança e conforto aos usuários.	A OAE apresenta-se em perfeitas condições devendo ser prevista manutenção de rotina.
4	<i>Boa</i>	A estrutura apresenta danos pequenos e em áreas, sem comprometer a segurança estrutural.	A OAE apresenta pequenos danos que não chegam a causar desconforto ou insegurança ao usuário.	A OAE apresenta pequenas e poucas anomalias, que comprometem sua vida útil, em região de baixa agressividade ambiental.
3	<i>Regular</i>	Há danos que podem vir a gerar alguma deficiência estrutural. Mas não há sinais de comprometimento da estabilidade da obra. Recomenda-se acompanhamento dos problemas. Intervenções podem ser necessárias a médio prazo.	A OAE apresenta desconforto ao usuário, com defeitos que requerem ações de médio prazo.	A OAE apresenta pequenas e poucas anomalias que comprometem a sua vida útil, em região de moderada à alta agressividade ambiental ou a OAE apresenta moderadas a muitas anomalias, que comprometem sua vida útil, em região de baixa agressividade ambiental.
2	<i>Ruim</i>	Há danos que comprometem a segurança estrutural da OAE, sem risco iminente. Sua evolução pode levar ao colapso estrutural. A OAE necessita de intervenções significativas a curto prazo.	A OAE com funcionalidade visivelmente comprometida com riscos de segurança ao usuário, requerendo intervenções de curto prazo.	A OAE apresenta moderadas a muitas manifestações patológicas, que comprometem sua vida útil, em região de alta agressividade ambiental.
1	<i>Crítica</i>	Há danos que geram grave insuficiência estrutural na OAE. Há elementos estruturais em estado crítico, com risco tangível de colapso estrutural. A OAE necessita de intervenção imediata, podendo ser necessária restrição de carga, interdição total ou parcial ao tráfego, escoramento provisório e associada instrumentação, ou não.	A OAE não apresenta condições funcionais de utilização.	A OAE encontra-se em elevado grau de deterioração, apontando problema já de risco estrutural e/ou funcional.

A especificação técnica da ARTESP, a ET-00.000.000-0-C21-002-R01, tem como âmbito de aplicação as OAEs localizadas no Estado de São Paulo. Além de regulamentar os procedimentos de vistorias, permite classificar as construções segundo dois critérios fundamentais, o urgenciamento e o estado operacional, aplicados a três parâmetros: estrutural, funcional e durabilidade. As administradoras paulistas respeitam a divisão da norma NBR 9452, onde cada OAE pode estar

subdividida em cinco (5) componentes: Superestrutura, Mesoestrutura, Infraestrutura, Encontros e Pistas.

Essas inspeções rotineiras permitem medir o desempenho atual dos elementos ou componentes das obras na base dos critérios de classificação encaixados na Especificação Técnica ET-00.000.000-0-C21-002- R01. Então, como resultado da inspeção, são atribuídas letras ao estado operacional da obra, isto é, A (Bom), B (Regular) e C (Ruim). Atrélado às letras, que evidenciam o estado operacional de uma OAE, seguem também índices numéricos que variam de zero (0) a cinco (5) para caracterizar a celeridade das intervenções, ou seja, zero (0) para intervenções imediatas e cinco (5) para intervenções em até cinco (5) anos.

Tabela 3.5 - Classificação de condição segundo a especificação técnica da ARTESP

URGENCIAMENTO			ESTADO OPERACIONAL		
Classe de Ações	Prazo (1)	Tipo	Bom	Regular	Ruim
Imediata	0	0			C
Curto Prazo	No 1º ano	1			
	No 2º ano	2			
Médio Prazo	No 3º ano	3	A	B	
	No 4º ano	4			
Longo Prazo	5º ano (2)	5			

Notas:

- A data "zero" de contagem dos prazos é a emissão da Inspeção Inicial, que, de sua vez, deve ser executada no 1º ano de concessão.
- O prazo tipo 5 significa a partir do início do 5º ano.
- Cada nova Inspeção Rotineira estabelecerá nova data "zero" de contagem dos prazos desde que não haja prazos definidos em Inspeção Especial.

3.5. Plano geral de intervenção

Os administradores das pontes brasileiras limitam a acurácia de seus sistemas ao monitorar a condição das estruturas, planejar e programar as ações de intervenção em base à decisão de um time de especialistas em gestão de ativos. Enquanto isso, as técnicas de modelagem para prever o desempenho futuro das obras ainda não são empregadas.

Os administradores das pontes concessionadas da rede federal determinam as ações a seguir segundo os resultados apresentados no Relatório de

Monitoramento Anual das OAEs. O monitoramento das pontes e viadutos incluem as informações das inspeções rotineiras, a classificação de condição das pontes, além da programação de intervenções.

O DNIT exige uma programação de intervenção segundo o IC atribuído no diagnóstico de condição. O critério de desempate para pontes com a mesma nota técnica pode ser feito através do volume de tráfego (VMDAT), 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 utilizados pelo DNIT e as empresas do programa de concessões rodoviárias (Buratto, 2019).

Situação similar acontece com as obras do Estado de São Paulo. Tanto o DER-SP como as empresas do programa de concessões definem seus planos de intervenção com base dos diagnósticos de condição de suas obras. Em função do estado operacional e o urgenciamento são determinadas as ações de curto (1 e 2 anos), mediano (3 e 4 anos) e longo prazo (5 anos). Na tabela 3.6 é mostrado um exemplo da ET-00.000.000-0-C21/002 para diagnosticar a condição de uma ponte. Após ter classificado cada um dos componentes da ponte segundo os parâmetros estrutural, funcional e durabilidade, a condição da ponte inteira resulta ser a classificação mais desfavorável.

Tabela 3.6 - Modelo e exemplo de aplicação

PARÂMETROS	COMPONENTES						CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO OS PARÂMETROS
	Superestrutura	Mesoestrutura	Infraestrutura	Encontros (1)		Pista	
				Estrutura	Complementos		
ESTRUTURAL	C1	B2	B2	C2	C2	*	C1
FUNCIONAL	A5	*	*	A4	A5	C1	C1
DURABILIDADE	C2	A4	A4	B2	B2	B3	C2

Nota: (1) Discriminam-se por encontro/estrutura os componentes do encontro que pertencem à estrutura principal da OAE. Por encontro/complementos entendem-se os demais componentes do encontro que não pertencem à estrutura principal, ou seja, laje de aproximação, aterros e taludes etc.

4. MODELAGEM DA DETERIORAÇÃO USANDO CADEIAS DE MARKOV

Atualmente não se concebe um SGPO completo que não inclua um modelo de deterioração para prever o desempenho futuro dos elementos das OAEs. Assim sendo, sua implementação é fundamental para otimizar as alternativas de intervenção, uma vez que ajudam a escolher e definir os planos e programas de intervenção para uma ponte individual ou rede de pontes.

Os modelos estocásticos são apropriados para a tomada de decisões em ambientes de incerteza, situação que corresponde ao processo de deterioração de uma ponte, onde a incerteza e aleatoriedade do processo são consideradas como uma ou mais variáveis aleatórias. A aplicação de um modelo deste tipo permite estimar a probabilidade com a qual um elemento ou toda a estrutura se degrada de uma quantia específica, previamente estabelecida e em um determinado intervalo de tempo. A previsão da condição futura depende apenas da condição atual da infraestrutura e não da condição histórica, característica que pode ser considerada uma limitação (Kotze et al., 2015).

Neste capítulo, iremos tratar as características mais ressaltantes da modelagem do processo de deterioração usando o método de cadeias de Markov, onde serão apresentadas as formulações para o cálculo da condição esperada de um elemento de ponte no decorrer do tempo. Também, serão explicadas as duas técnicas mais empregadas para calcular a Matriz de Probabilidades de Transição (MPT) e como alguns investigadores aplicaram o método de Cadeias de Markov para avaliar um conjunto de pontes; o qual permitirá entender melhor o aproveitamento da técnica e como seu uso se pode ajustar a uma amostra de pontes brasileiras que serão estudadas no Capítulo 5, de modo a sistematizar sua aplicação, adaptando-o à realidade nacional.

4.1. O processo de Markov

Os modelos probabilísticos discretos baseados no estado e o tempo são efetivos para prever a deterioração de ativos de infraestrutura (Madanat et al., 1995). Estes modelos são representados pelo processo de Markov, o qual aproveita a definição de um conjunto de Estados, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_t\}$, para representar o processo de

degradação de um ativo de infraestrutura e, também, para determinar as possibilidades e probabilidades que tem um elemento para mudar ou manter seu estado de condição, após um período fixo de tempo. Os estados discretos de condição podem ser associados a alguma medida de desempenho, por exemplo aos Índices de Condição (IC) utilizados nas OAEs da rede federal.

Na tabela 4.1 pode-se observar a correspondência entre os Estados de Markov (S), os Índices de Condição (IC) e as probabilidades de transição (p_{ij}) de um sistema específico que representa todo o processo de deterioração através de cinco (5) estágios aparentados a cinco (5) estados de condição.

Tabela 4.1 - Correspondência entre ICs, Estados e Probabilidades de Transição

		IC=5	IC=4	IC=3	IC=2	IC=1
		S=1	S=2	S=3	S=4	S=5
IC=5	S=1	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{14}	p_{15}
IC=4	S=2	p_{21}	p_{22}	p_{23}	p_{24}	p_{25}
IC=3	S=3	p_{31}	p_{32}	p_{33}	p_{34}	p_{35}
IC=2	S=4	p_{41}	p_{42}	p_{43}	p_{44}	p_{45}
IC=1	S=5	p_{51}	p_{52}	p_{53}	p_{54}	p_{55}

Estes modelos probabilísticos são comumente usados para prever o desempenho de diferentes ativos de infraestrutura, pois têm a facilidade de se adaptar aos sistemas de gestão que coletam dados por meio de inspeções periódicas e atribuem medidas para definir a condição de cada ponte (Micevski et al., 2002). Inclusive, pesquisadores como Agrawal e Kawaguchi (2009), consideram que são muito úteis quando não há suficiente informação sobre a condição histórica das pontes.

O processo de Markov tem três principais vantagens para sua consideração na modelagem da deterioração. Em primeiro lugar, é capaz de refletir as incertezas de várias variáveis explicativas como a idade, o volume de tráfego, o clima, o tipo e ou material da estrutura, etc. Em segundo lugar, a previsão do estado futuro é baseada no estado atual, portanto o modelo é incremental. E, finalmente, pode ser aplicado a nível de uma rede com muitos elementos ou componentes envolvidos, o que exige eficiência nos cálculos.

4.2. Modelo de Cadeias de Markov

O modelo de Cadeias de Markov é um caso especial do processo de Markov cujos parâmetros de estado e tempo são discretos. Está baseado no conceito de dano cumulativo probabilístico, quer dizer que estima mudanças e o decaimento nas condições dos componentes ao longo de múltiplos períodos de transição (Muñoz et al., 2016). Seu desenvolvimento pode ser considerado como uma série de transições entre certos estados de condição.

Em um processo estocástico de deterioração, quando a probabilidade de transição de um estado futuro depende apenas do estado presente, mas não dos estados passados, o processo é definido como processo de Markov de primeira ordem. Para um processo estocástico $(X_t, t \in T)$, se a probabilidade condicional pode ser expressa na forma da equação 4.1, então, $(X(t), t \in T)$ é uma Cadeia de Markov com parâmetros discretos. E, considerando que o estado futuro só depende do estado atual, da equação 4.1 pode ser deduzida a equação 4.2

$$p_{ij} = P(X_{t+1} = i_{t+1} | X_t = i_t, X_{t-1} = i_{t-1}, \dots, X_1 = i_1, X_0 = i_0), \quad (4.1)$$

$$p_{ij} = P(X_{t+1} = i_{t+1} | X_t = i_t) \quad (4.2)$$

Onde

i_t é o estado do processo no tempo t ; e

P é a probabilidade condicional de qualquer evento futuro, dado o evento presente e os passados.

Essas probabilidades formam a chamada Matriz de Probabilidades de Transição (MPT) da Cadeia de Markov. Cada elemento na MPT representa a probabilidade de transição de um estado a outro depois de um intervalo de tempo. Considera-se que o processo é estacionário quando a probabilidade de se movimentar entre os diferentes estados permanece constante, independentemente do tempo. Isto quer dizer que o sistema é completamente descrito pelas probabilidades de transição que formam a MPT. Aprecia-se na equação 4.3 que a MPT está representada por uma matriz “ P ” de ordem “ n ”, onde esse valor, por sua vez, também descreve o processo de deterioração como “ n ” estados discretos de condição.

$$P = [p_{ij}] = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Os elementos da matriz P são representados por $P_{i,j}=p_{ij}$, definidos como a probabilidade que tem um elemento de ponte para transitar de um estado “i” a outro estado “j”, além que também se pode apresentar a probabilidade de permanecer no mesmo estado de condição ($P_{i,i}=p_{ii}=1-P_{i,j}$), justo depois de um período de transição. A modo de exemplo, na tabela 4.2 podemos ver uma matriz de transição com certos valores das probabilidades de transição para um sistema formado por quatro etapas ou Estados de Markov ($n=4$). Enquanto isso, a figura 4.1 ilustra o processo de Cadeias de Markov com as variações ou permanências de estado e as probabilidades contidas na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Exemplo de matriz de transição com probabilidades para um processo de quatro estados de condição (Fonte: Ranjith et al., 2013)

Estado de Condição	Estado 1	Estado 2	Estado 3	Estado 4	Σ
1	0,4	0,3	0,2	0,1	1
2	0	0,5	0,3	0,2	1
3	0	0	0,7	0,3	1
4	0	0	0	1	1

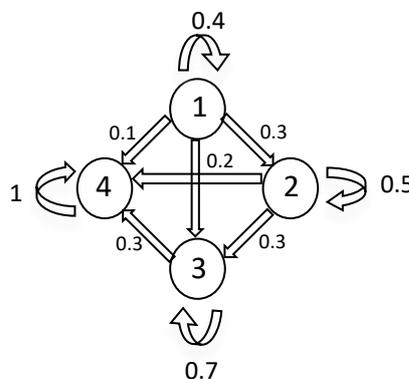


Figura 4.1 - Ilustração conceitual de um processo de Cadeias de Markov (Fonte: Ranjith et al., 2013)

Os trabalhos de Jiang et al. (1988) e Cesare et al. (1992) mostraram que neste tipo de análise existem três suposições básicas que ajudam a simplificar a matriz da equação 4.3:

- Todos os termos p_{ij} , onde j é maior que i , devem ser zerados abaixo da diagonal principal porque é assumido que a deterioração deve ocorrer sem o melhoramento por intervenção;
- A análise dos dados de deterioração das pontes de várias jurisdições mostrou que a probabilidade de um elemento decair por mais de um estado, depois de um único ciclo de inspeção, é negligenciada;
- A soma dos valores de cada linha da MPT deve ser igual a um. Dessa maneira, a seguinte relação deve ser respeitada:

$$\sum_j^n p_{ij} = 1 \quad (4.4)$$

Em consequência, os “n” termos de p_{ii} são necessários e suficientes para definir completamente a MPT. A equação 4.5 denota como fica a MPT para um processo de deterioração formado por cinco estados de condição discretos ($n=5$).

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & 1 - p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{22} & 1 - p_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{33} & 1 - p_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 1 - p_{44} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

O último termo da matriz é igual a um ($p_{55}=1$) porque o estado de condição não pode ficar pior ou melhor e, em vez disso, permanece preso naquele estado. Assumindo um processo estacionário, o vetor de estado para qualquer tempo t , $Q_{(t)}$, pode ser obtido pela multiplicação do vetor de estado inicial, $Q_{(0)}$, pela matriz de transição P elevada à potência t , isto é:

$$Q_{(t)} = Q_{(o)} \cdot P^t \quad (4.6)$$

Sendo R' a transposta do vetor de índices de condição $R = [5 \ 4 \ 3 \ 2 \ 1]$, o valor estimado do índice de condição pela cadeia de Markov, $E_{(t,P)}$, está definida pela seguinte multiplicação (Jiang et al., 1988):

$$E_{(t,P)} = Q_{(t)} \cdot R' \quad (4.7)$$

A taxa de deterioração a qualquer idade pode ser definida como a inclinação da curva de classificação de condição da equação 4.7.

4.3. Formulação matricial da cadeia de Markov

As probabilidades de transição de um modelo Markoviano podem ser determinadas a partir do julgamento de especialistas ou fazendo análise de dados de observação empírica. Valendo-se da segunda opção, a posteriori mais certa, a matriz de transição P da equação 4.5 pode ser calculada atendendo as seguintes técnicas:

4.3.1. Método de frequência percentual

Esta técnica é a mais simples para obter os termos da MPT diretamente dos dados de condição de um banco de dados. A probabilidade p_{ij} de transição da condição de um elemento de ponte desde o estado “i” até o estado “j” pode ser estimada usando a seguinte equação (Yi Jiang et al., 1988):

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (4.8)$$

Onde “ n_{ij} ” é o número de transições do estado “i” para o estado “j” dentro de um determinado período de tempo, e “ n_i ” é o número total de elementos no estado “i” antes da transição. Na ausência de dados de pontos suficientes para completar a matriz, as probabilidades de transição perdidas podem ser derivadas usando uma relação linear como descrita abaixo (neste caso, p_{23}):

$$\frac{p_{22}}{p_{33}} = \frac{p_{12}}{p_{23}} \quad (4.9)$$

4.3.2. Método de otimização baseado em regressão

Este método utiliza uma função de otimização não linear para minimizar a soma das diferenças absolutas entre a curva de regressão, que melhor se ajusta aos dados de condição, e as condições previstas usando o modelo adotado de cadeias de Markov. A função objetivo e as restrições deste problema de otimização podem ser formuladas da seguinte forma (Agrawal e Kawaguchi, 2009; Jiang et al., 1988):

$$\min \sum_{t=1}^N |Y_{(t)} - E_{(t,P)}| \quad \text{sujeito a } 0 \leq p_{ii} \leq 1 \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, I \quad (4.10)$$

Onde N é o número total de períodos de transição. O índice I representa o número de probabilidades desconhecidas, por exemplo, para I=4; p=um vetor de comprimento I=[p₁₁, p₂₂, ... , p_{ii}]; e Y_(t) é a média das classificações de condição no tempo t. Para se obter os valores das probabilidades de transição p_{ii}, i=1, 2, ... , I; a função objetivo da equação 4.10 pode ser minimizada por uma abordagem de programação não linear com restrições.

5. PROPOSTA METODOLÓGICA PARA SISTEMA QUE AVALIA A CONDIÇÃO DE PONTES RODOVIÁRIAS FEDERAIS

A falta de suficiente informação pública no Brasil, referente à área de administração e controle de projetos de pontes, não permite ter certeza se a grande maioria das obras por administração direta estão sendo devidamente inventariadas e submetidas a programas regulares e periódicos de monitoramento, conforme aos regulamentos oficiais. No que diz respeito às obras sob administração privada, sabe-se que os Programas de Concessões das rodovias federais e do Estado de São Paulo começaram a ser instituídas a partir da segunda metade da década de 90. Então, pode-se dizer que a maioria das concessionárias não têm muitos anos operando e, portanto, ainda o número de trabalhos de vistorias realizadas em suas obras não lhes permite ter uma extensa base de dados.

Precisamente, face ao exposto no parágrafo acima, entende-se que o principal problema para o desenvolvimento de um sistema próprio de avaliação de pontes reside na ausência de uma base de dados grande e confiável. O número de pontes de cada jurisdição é geralmente grande, mas ainda a desvantagem é a falta de suficientes dados de vistorias para avaliar com maior certeza o desempenho das obras, sem negligenciar o registro de um adequado histórico de dados de condição, do histórico de dados de manutenção, além do histórico de outras intervenções. Também resulta apropriado mencionar que essa situação se deve ao fato que as entidades brasileiras têm que lutar contra as limitações de recursos técnicos, humanos e orçamentários, evidenciando que o país ainda requer políticas adequadas e uma alocação de recursos consistente para mudar o panorama nos próximos anos.

Este capítulo tem por objetivo mostrar a metodologia de um sistema integrado por atividades e procedimentos básicos para avaliar, de forma simples, eficiente e dinâmica, o estado de condição de um grupo de pontes pertencentes a uma rodovia federal do país. Complementarmente ao sistema proposto, serão tratadas as suposições e características de um código simples de computador, desenvolvido com o *software* MATLAB, com o intuito de inter-relacionar os procedimentos e métodos propostos para avaliar a condição de pontes nacionais. Por último, a metodologia do sistema proposto e o código computacional serão validados através de sua aplicação em um estudo de caso, para o qual se utilizará um conjunto

de dados de OAEs pertencentes a um trecho rodoviário federal, material fornecido pela ANTT.

5.1. Características gerais do sistema

O sistema proposto para avaliar a condição de OAEs tem como objetos principais de análise os componentes de pontes e os projetos de pontes inteiras, para os quais se procura prever seu desempenho ou deterioração. O tipo de avaliação deste sistema considera o estado de conservação e a segurança estrutural, sob a perspectiva de decaimento natural nas condições das obras.

Anteriormente a pesquisa de Mendes (2009) permitiu verificar que o maior número de pontes da rede federal tem como material constituinte o concreto estrutural, i.e., concreto armado e concreto protendido. Essa característica também foi verificada nos relatórios de monitoramento anual das pontes concessionadas para o estudo de caso. É por esse motivo que existe um maior acervo de normas e documentos técnicos para desenvolver as diferentes etapas de um projeto de pontes de concreto estrutural, incluindo, como foi observado no Capítulo 3, as atividades técnicas realizadas após a entrada em serviço das obras. Portanto, a metodologia apresentada está focada na avaliação da condição de pontes e viadutos de concreto armado ou concreto protendido, localizadas no decurso de um trecho de rodovia federal.

Em termos gerais a proposta metodológica também poderia ser aplicada a obras de outro tipo de material, por exemplo, pontes de aço estrutural, embora esteja principalmente apontada a avaliar a condição de pontes de concreto. Para conseguir estender a aplicação desta metodologia a outros materiais teria que ser superado o principal inconveniente, que hoje em dia não se dispõem de procedimentos específicos de inspeção e medidas de desempenho (ICs) associadas e adaptadas aos defeitos e às patologias presentes em construções com outros tipos de materiais.

Basicamente o banco de dados da metodologia de avaliação proposta deve estar formado pelos dados coletados da Inspeção Cadastral e das Inspeções Rotineiras realizadas em cada OAE, respeitando os procedimentos de vistoria e os critérios de classificação de condição exigidos na norma DNIT 010/2004-PRO. A regularidade no período de execução das inspeções rotineiras é vital para não acumular erros no momento de prever a condição futura das pontes.

Supõe-se que todas as OAEs que são consideradas para análise pertencem a um mesmo trecho de rodovia. Além disso, se deve ter em conta que uma maior acurácia dos resultados estará associada à consideração de certas variáveis explicativas, como pertencer a uma mesma região ou trecho de rodovia com as mesmas condições ambientais e climáticas, a idade, o volume de tráfego, a importância da via, etc.

Todo sistema, e este não é a exceção, requer trabalhar com o registro histórico de ações de manutenção e de outras intervenções, pois assim, podem-se detectar as classificações de componentes que mostram melhoras e não são adequadas para modelar o natural decaimento de condição das pontes. No caso de avaliar uma série de OAEs e não dispor desses registros históricos, o sistema tem que ultrapassar essa limitação através de ferramenta computacional, a qual deve utilizar linhas de código para filtrar e omitir o efeito de possíveis intervenções passadas. Assim, para a determinação dos elementos da MPT, o sistema deve aproveitar as transições de estado efetuadas antes e depois do período de intervenção.

Outra característica da metodologia está referida ao uso de um modelo estocástico de deterioração, mais precisamente o modelo que utiliza Cadeias de Markov. Assim, o sistema proposto aproveita a simplicidade e a precisão adequada desse modelo, mesmo no caso que as obras do trecho avaliado não tenham um grande registro de dados de condição para modelar seu processo de deterioração. O modelo utiliza a abordagem de frequência percentual para estimar os elementos da MPT.

5.2. Módulos do sistema

Para todas as pontes e viadutos que cumprem com as características gerais do sistema, descritos na subseção 5.1, se recomendam os seguintes módulos básicos:

- **Categorização**
Pré-classificação e agrupamento de pontes segundo a idade, clima, região, volume de tráfego (VMDAT), tipo de material e ou estrutura, importância da via, etc.
- **Inventário**

Registro de informações extraídas das atividades de inspeção cadastral. Inclui identificação e localização da estrutura, informações físicas e geométricas, tipologia da estrutura, fotos e croquis da estrutura e fotos de danos e patologias divididas por componente.

- **Inspeção e condição**

Registro dos demais tipos de inspeções, sobretudo as rotineiras. Registro de informações e dados de intervenções passadas. Registro dos diagnósticos de componentes (lajes, vigamento principal, mesoestrutura, infraestrutura e pistas/aceessos). Índices de condição segundo normativo DNIT (tabela 3.3).

- **Análise de dados coletados**

Filtragem de dados de inspeções por melhoramento de condições, recondicionamento, piora abrupta por acidentes, erros no preenchimento de dados e subjetividade nas inspeções.

- **Previsão do desempenho**

Aplicação de modelo de deterioração probabilístico usando Cadeias de Markov. Calibragem da MPT usando a técnica da frequência percentual. Determinação da MPT para cada componente e para as pontes como um todo.

5.2.1. Categorização das obras

As pontes e viadutos do trecho rodoviário sob análise devem ser submetidas a uma pré-classificação antes da modelagem da deterioração. Isto é feito com o intuito de incorporar os efeitos de fatores externos (idade, volume de tráfego, região, clima, tipo de estrutura, material da estrutura, etc.) na modelagem da deterioração, permitindo, afinal, uma calibração mais realista e precisa das taxas e curvas de deterioração dos componentes ou pontes inteiras, diferenciadas por categoria.

5.2.2. Inventário

O inventário de um sistema deve estar nutrido pelos dados básicos de cada ponte de rede ou trecho rodoviário que, em primeiro lugar, devem ser coletados por meio de Inspeção Cadastral. Posteriormente, caso exista alguma alteração na obra, os dados podem ser modificados ou acrescentar o registro do inventário.

Os dados coletados devem ser cuidadosamente selecionados, tendo em consideração o tamanho da amostra disponibilizada, a qualidade e adequação dos dados, de modo que forneça a avaliação mais abrangente e acurada possível. Na parte do cadastro deve considerar os seguintes dados mínimos:

<u>Identificação e localização:</u>	<u>Informação geométrica:</u>	<u>Tipologia estrutural:</u>
ID da estrutura	Nro. de vãos	Tabuleiro tipo
Nome da obra	Comprimento total	Tipos de vãos
Obstáculo transposto	Largura total	
Sentido	Largura de pista	
Km	Nro. de vigas	
Classe de rodovia	Nro. linhas de pilares	
Região	Nro. Pilares por linha	
Latitude	Nro. juntas de dilatação	
Longitude	Restrição de altura	
Classe portante		
Ano de construção		
VMDAT		

Na tabela 5.1 se observa uma amostra de dados básicos de pontes e viadutos pertencentes à rodovia BR-101/ES. Esses e alguns outros dados de cadastro foram pegados dos relatórios de monitoramento anual feitos pelas concessionárias das rodovias federais. Entre os dados incluídos na tabela temos alguns dados de identificação (denominação da obra, trem tipo), localização (rodovia, km, pista), informação geométrica (comprimento total, largura total) e tipologia estrutural (ponte viga de concreto armado).

Tabela 5.1 - Alguns dados básicos de pontes da BR-101/ES

Denominação da obra	Rodovia	Km+m	Pista	Tipo de Estrutura	Trem Tipo	Compri. total (m)	Largura Total (m)
Ponte Rio Abissínia	BR-101/ES	068+038	N/S	Viga de concreto armado	TB-36	30.00	8.40
Ponte Rio Preto do Sul	BR-101/ES	078+220	N/S	Viga de concreto armado	TB-36	49.40	10.00
Ponte Rio Guaraná	BR-101/ES	188+650	N/S	Viga de concreto armado	TB-36	31.70	10.00
Viaduto-Passagem inf.	BR-101/ES	202+350	N/S	Viga de concreto armado	TB-36	28.30	9.00
Ponte Rio Itapira	BR-101/ES	222+450	N/S	Viga de concreto armado	TB-24	52.60	8.30
Ponte Rio Fundão	BR-101/ES	229+200	N/S	Viga de concreto armado	TB-24	62.30	10.20
Ponte Rio Timbuí	BR-101/ES	239+900	N/S	Viga de concreto armado	TB-36	42.00	10.00

5.2.3. Inspeção e condição

Os resultados das atividades técnicas realizadas para auscultar visual e fisicamente as pontes de um trecho rodoviário são usados depois para classificar a condição de cada obra, de forma similar às práticas estrangeiras que também objetivam a segurança estrutural e o estado de conservação. Sendo assim, as condições exigidas no normativo do DNIT são adequadas e não requerem considerações adicionais.

Para esta proposta a classificação de condição (IC) diagnosticada nas vistorias é atribuída a cada componente de ponte, de modo similar ao realizado nestes tempos pelas Concessionárias federais. Convém indicar novamente que, de acordo com o normativo do DNIT, cada ponte é avaliada segundo cinco (5) componentes, isto é: Lajes, Vigamento Principal, Mesoestrutura, Infraestrutura e Pista/Acesso. Na figura 5.1 é apresentada a parte da ficha de inspeção rotineira do DNIT onde consta a Nota Técnica (IC) e as informações da avaliação visual do ano 2012 para a Laje da Ponte sobre o Rio dos Cachorros em Santa Catarina, pertencente à rodovia BR-116/PR. De outro lado, na letra (a) da figura 5.2 observa-se a vista inferior do tabuleiro da ponte e na letra (b) o detalhe de desagregação do concreto com exposição e oxidação da armadura do balanço lateral da obra.

1. LAJE		Nota técnica:	3	Local	Quantidade
Buraco (abertura)	() Existe	() Iminente			
Armadura exposta	(x) Muito oxidada	() Grande incidência		Balancos laterais	
Concreto desagregado	(x) Muita intensidade	() Grande incidência		Faces lateral e inferior dos balancos	
Fissuras	(x) Forte infiltração	() Grande incidência		Faces lateral e inferior dos balancos	
Marcas de infiltração	(x) Forte	(x) Grande incidência		Laje e balancos laterais	
Aspecto do concreto	() Má qualidade				
Cobrimento	(x) Ausente / Pouco			Laje e balancos laterais	

Figura 5.1 - Informações de inspeção rotineira de laje de ponte e avaliação da condição atual

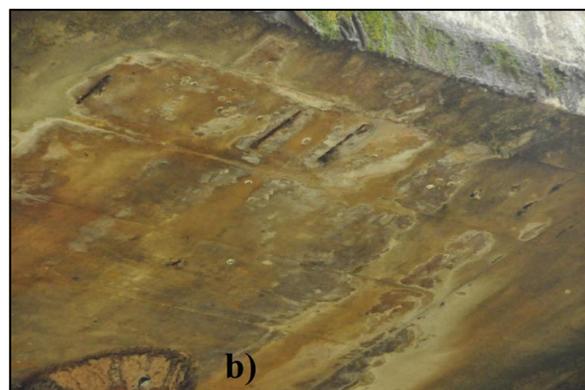


Figura 5.2 - Fotos da laje da Ponte sobre o Rio dos Cachorros (Fonte: ANTT)

A tabela 5.2 apresenta uma lista de pontes e viadutos existentes da rodovia BR-101/ES onde são mostrados os ICs de cada componente, correspondentes ao monitoramento do ano 2013. Note-se que o critério adotado nessa jurisdição estabelece que o IC global de cada ponte é igual ao menor IC dos componentes.

Tabela 5.2 - Índices de Condição de uma amostra de pontes da BR-101/ES

Id.	Denominação da OAE	ICs do Ano 2013					
		Lajes	Vig. Principal	Meso-estrutura	Infra-estrutura	Pistas / Acessos	Ponte (Global)
001	Ponte Rio Itapira	2	2	4	3	3	2
002	Ponte Rio Fundão	3	3	4	3	4	3
003	Ponte Rio Timbuí	4	4	4	5	4	4
004	Viaduto - Passagem inferior	4	4	4	5	4	4
005	Viaduto - Passagem inferior	4	4	4	5	4	4
006	Ponte Canal dos Escravos	4	5	4	4	3	3

Os dados de inventário junto com as classificações de condição das vistorias rotineiras conformam o banco de dados que, seguidamente, deve ser analisada e modelada.

5.2.4. Análise dos dados

Os dados de condição de qualquer ponte se tornam inadequados para a modelagem da deterioração quando não se dispõem de seus registros históricos de intervenções. Nessas circunstâncias não se sabe exatamente que obras foram melhoradas e em que medida esses dados podem alterar o cálculo de um modelo que considera o natural decaimento nas condições de uma obra.

Em vista do descrito no parágrafo anterior, dentro do código computacional vários filtros têm sido considerados e implementados para remover dados de condição (ICs) que foram afetados por:

- Trabalhos de melhoramento (recuperação, reparo e reabilitação);
- A subjetividade dos inspetores;
- Acidentes ou eventos naturais que provocaram quedas anormais e repentinas nos ICs;
- Preenchimento errôneo de índices.

A título de exemplo, a tabela 5.3 mostra três casos de pontes onde a transição entre os ICs ressaltados em amarelo deve ser desprezada antes de realizar a modelagem da deterioração. Na primeira ponte acontece uma grande melhoria na condição da componente laje durante a transição entre a inspeção do ano 2014 (IC=2) e a inspeção do 2015 (IC=5). A segunda ponte apresenta decaimento de condição em mais de um IC durante a transição entre a inspeção do ano 2015 (IC=4) e a inspeção do 2016 (IC=2). Finalmente, na terceira ponte não está disponível o IC do ano 2015, talvez devido à omissão de trabalhos de vistoria naquele ano, fazendo com que as transições entre os anos 2014-2015 e 2015-2016 sejam desconsideradas para a calibração de sua correspondente matriz de probabilidades.

Tabela 5.3 - Exemplos de pontes com dados de condição a ser filtrados

Id.	Denominação da OAE	Índice de Condição - Lajes					
		2013	2014	2015	2016	2017	2018
001	Ponte Rio Yabari	2	2	5	5	5	5
002	Ponte Beira Rio	4	4	4	2	2	2
003	Viaduto Mario Salcedo	4	4	n.d.	3	3	3

Quando houver omissão da inserção de IC para algum componente de ponte, seja por causa de, e.g., problemas de acessibilidade durante a vistoria ou erro humano no preenchimento de dados, o código realiza a filtragem desprezando os ICs produto dessas ocorrências. Se a falta de dados é significativa, o algoritmo não mostrará resultados de previsão dessa componente e, o estado de condição futura da ponte será determinado em função do menor IC entre os outros componentes avaliados.

A filtragem por recondicionamento de classificação se deve realizar para todas as OAEs onde são apreciadas ICs ilógicos para a idade das obras. No algoritmo desenvolvido foi limitada essa situação julgando que uma OAE, depois de trinta (30) anos no melhor dos casos pode chegar a ter IC=4. Como exemplo a figura 5.3 permite apreciar alguns ICs do vigamento principal de uma ponte, com mais de cinquenta (50) anos de idade, que mantem um IC igual a cinco (5). O algoritmo considera, julgando razoável, que depois de trinta (30) anos qualquer componente de ponte deve experimentar certa degradação em seu estado.

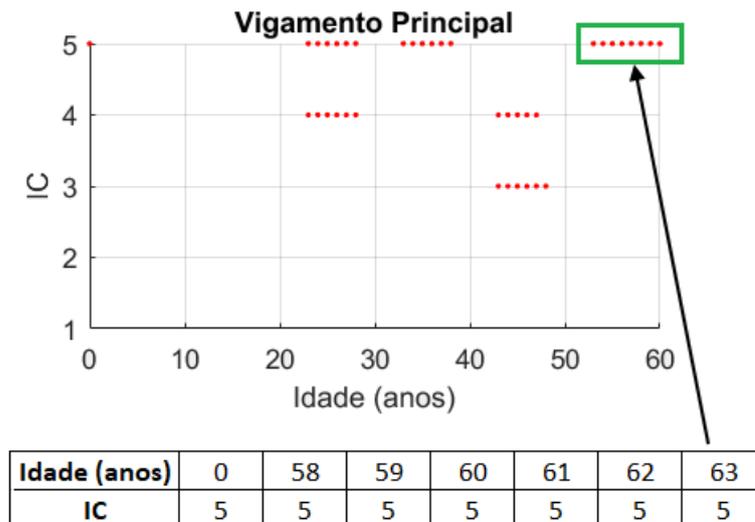


Figura 5.3 - Dados que demonstram recondição no vigamento de uma ponte

5.2.5. Previsão do desempenho

A seleção e desenvolvimento de um modelo de deterioração adequado à realidade brasileira está fortemente influenciada pela qualidade, quantidade e disponibilidade de dados históricos de inspeções e intervenções. De igual modo, também desempenham um papel importante na hora da escolha, o nível de complexidade de um método tentativo e a demanda de recursos técnicos e orçamentários para a sua implementação.

Sob essa perspectiva, atualmente os modelos determinísticos e estocásticos têm maiores possibilidades de aplicação no território nacional. Não obstante, os modelos estocásticos têm a grande vantagem de não precisar de uma amostra extensa de dados de pontes. Segundo alguns autores, como Kotze et al. (2015), a demanda de dados para desenvolver um modelo determinístico requer ao menos dez (10) anos de registros de dados de inspeções para gerenciar as obras de forma eficaz e eficiente.

Conseqüentemente, o sistema utiliza o modelo de Cadeias de Markov. A modelagem da deterioração aplicado a pontes e viadutos federais de concreto estrutural se define pelo número de estados de condição e o cálculo dos elementos da MPT. A norma DNIT 010/2004-PRO contempla cinco (5) ICs (segundo tabela 3.1), os quais são aparentados com cinco (5) Estados de Markov, isto quer dizer que, o IC=5 é definido como Estado 1; o IC=4 é definido como Estado 2; e assim sucessivamente

até que o IC=1 é definido como Estado 5. Não obstante, a ordem da MPT para um conjunto de pontes federais diminui a quatro (4) já que, segundo regulamentos federais, não está permitido que a condição de uma ponte caia para um IC=1, sem antes a obra ficar interditada e intervinda.

Tabela 5.4 - Relações entre ICs, Estados de Condição e Probabilidades de Transição para o sistema proposto

		IC=5	IC=4	IC=3	IC=2
		S=1	S=2	S=3	S=4
IC=5	S=1	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{14}
IC=4	S=2	p_{21}	p_{22}	p_{23}	p_{24}
IC=3	S=3	p_{31}	p_{32}	p_{33}	p_{34}
IC=2	S=4	p_{41}	p_{42}	p_{43}	p_{44}

De forma complementar e em conformidade com as simplificações tratadas na seção 4.2 desta pesquisa, a MPT fica definida como se observa na equação 5.1. Os elementos da MPT que devem ser estimados são p_{11} , p_{22} e p_{33} .

$$MPT = \begin{bmatrix} p_{11} & 1 - p_{11} & 0 & 0 \\ 0 & p_{22} & 1 - p_{22} & 0 \\ 0 & 0 & p_{33} & 1 - p_{33} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

A probabilidade de transição do Estado mais baixo, p_{44} , é igual a um (1) porque não há possibilidade de transição para um estado inferior. Para o cálculo dos elementos da MPT o código utiliza a abordagem de frequência percentual estudada na subseção 4.3.1. Assim, finalmente, o vetor de estado de qualquer OAE da rede, para qualquer tempo t , é estimado multiplicando a MPT, elevada à potência t , e o vetor de condição atual, como foi apresentada na equação 4.6.

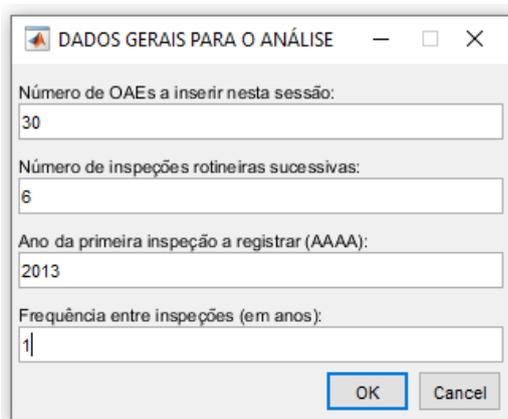
5.3. Código computacional

Com a intenção de relacionar atividades técnicas de inspeção, procedimentos para criar e analisar arquivos de dados, além de uma técnica para

prever a deterioração de pontes, desenvolveu-se uma rotina computacional usando a linguagem de programação MATLAB, versão R2016b, baseada nas características gerais e os módulos de sistema propostos nas seções precedentes deste capítulo.

Assim sendo, a finalidade desta rotina de computador é prever o desempenho de pontes de concreto estrutural para um horizonte de longo prazo. Para esse fim o código permite ao usuário construir o banco de dados de um conjunto de pontes federais de concreto com os dados coletados nas inspeções cadastrais e rotineiras, permitindo também o registro dos ICs das obras, para seguidamente realizar a filtragem de dados e a modelagem da deterioração usando o método de Cadeias de Markov.

O algoritmo considera linhas de código para construir um banco de dados mediante o preenchimento de caixas de diálogo. Observe-se na figura 5.4 a caixa de diálogo que facilita o preenchimento de dados gerais para a avaliação de uma série de pontes. O número de pontes para análise, assim como o número de inspeções rotineiras sucessivas podem ser alterados em futuras sessões de uso. Caso contrário acontece com os valores da “Frequência entre inspeções” e o “Ano da primeira inspeção”, inalteráveis após a sua entrada na caixa de diálogo.

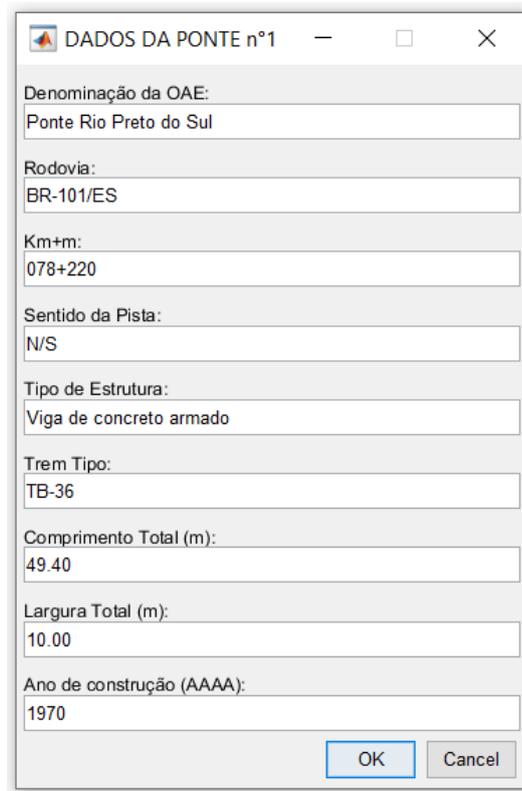


A caixa de diálogo intitulada "DADOS GERAIS PARA O ANÁLISE" apresenta quatro campos de entrada de texto. O primeiro campo, rotulado "Número de OAEs a inserir nesta sessão:", contém o valor "30". O segundo campo, "Número de inspeções rotineiras sucessivas:", contém "6". O terceiro campo, "Ano da primeira inspeção a registrar (AAAA):", contém "2013". O quarto campo, "Frequência entre inspeções (em anos):", contém "1". Na base da caixa, há dois botões: "OK" e "Cancel".

Figura 5.4 - Dados gerais para a avaliação de uma rede de pontes

Neste ponto é conveniente mencionar que por questões práticas, simplicidade e disponibilidade de dados, o código computacional limitou a quantidade de dados básicos por ponte, deixando de lado maiores detalhes e considerando, sobretudo, os mais relevantes para a avaliação de cada obra. A disponibilidade de dados esteve condicionada aos dados contidos nos relatórios de monitoramento anual

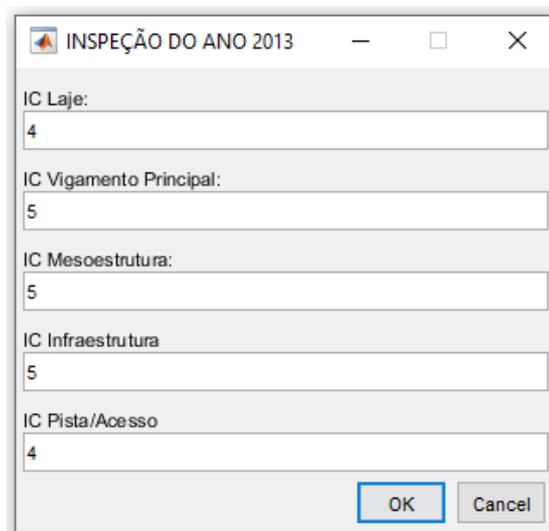
de obras federais sob concessão. Posto isso, na figura 5.5 podemos apreciar a caixa de diálogo que deve ser preenchida para incluir dados básicos de cada ponte.



A screenshot of a software dialog box titled "DADOS DA PONTE n°1". The dialog box contains several text input fields for entering bridge data. The fields and their values are: "Denominação da OAE:" with "Ponte Rio Preto do Sul"; "Rodovia:" with "BR-101/ES"; "Km+m:" with "078+220"; "Sentido da Pista:" with "N/S"; "Tipo de Estrutura:" with "Viga de concreto armado"; "Trem Tipo:" with "TB-36"; "Comprimento Total (m):" with "49.40"; "Largura Total (m):" with "10.00"; and "Ano de construção (AAAA):" with "1970". At the bottom right, there are "OK" and "Cancel" buttons.

Figura 5.5 - Dados básicos para o cadastro de cada ponte

Outros dados específicos para cada ponte são os índices de condição. A figura 5.6 apresenta a caixa de diálogo onde são preenchidos os ICs resultantes de uma vistoria, para um ano específico, correspondendo sua atribuição a todos os componentes de uma determinada ponte.



A screenshot of a software dialog box titled "INSPEÇÃO DO ANO 2013". The dialog box contains five text input fields for entering condition indices (ICs). The fields and their values are: "IC Laje:" with "4"; "IC Vigamento Principal:" with "5"; "IC Mesoestrutura:" with "5"; "IC Infraestrutura:" with "5"; and "IC Pista/Acesso:" with "4". At the bottom right, there are "OK" and "Cancel" buttons.

Figura 5.6 - Registro de ICs no código desenvolvido

O código computacional não põe à disposição do usuário a opção de registro de ações de intervenção de obras, simplesmente porque essas informações não foram fornecidas para desenvolver esta pesquisa. Para superar essa limitação, sobretudo na hora de modelar a deterioração das obras, o algoritmo efetua a filtragem dos dados, de modo que se desconsideram os dados que descrevem qualquer melhoria no estado de condição de um componente de ponte ou, talvez, o decaimento na condição da componente por dois ou mais estados.

Com fins comparativos, o código também inclui rotinas para realizar a filtragem de dados e estimar a curva de deterioração usando um modelo polinomial de regressão não linear: $S_{(t)}=At^3+Bt^2+Ct+D$, onde t é a idade da ponte, $S_{(t)}$ é o IC da ponte e as letras de A a D são os coeficientes que serão determinados.

Uma vez que este trabalho de pesquisa não aponta a mostrar como se deve gerenciar de forma completa as informações coletadas das pontes, a ferramenta computacional não requer nem permite o cadastro e armazenamento de informações de arquivos como: elementos do projeto original, ensaios, registros de recuperações, registros de ocorrências acidentais, croquis e fotos das estruturas, assim como relatórios de monitoramento.

No Apêndice C são mostrados alguns detalhes do algoritmo desenvolvido, principalmente referidas à inserção de dados, o armazenamento de banco de dados, o acréscimo de obras e dados de inspeções, as melhoras para fornecer maior dinâmica e eficiência ao método de previsão considerado no sistema desenvolvido.

6. APLICAÇÃO DE METODOLOGIA E CÓDIGO COMPUTACIONAL EM ESTUDO DE CASO

Para validar as definições, características e capacidades da metodologia e do código de computador, abordados no capítulo 5, recorreu-se ao ato de colocá-los em prática através de um estudo de caso. Assim, buscou-se determinar o futuro estado de condição de um grupo de pontes e viadutos federais de concreto estrutural.

Os objetos de estudo foram tomados dentre as OAEs pertencentes à rodovia federal brasileira BR-101/ES - Governador Mário Covas. O material coletado para realização do estudo compreendeu os dados de inspeções cadastrais e inspeções rotineiras de todas as OAEs do trecho rodoviário. Desde que entrou em vigência a concessão, os dados dessas inspeções estão incluídos nos relatórios de monitoramento anual que as entidades privadas estão obrigadas a elaborar e entregar à instituição reguladora e fiscalizadora do governo federal, a ANTT. Sendo informações de caráter público, os dados foram solicitados através do Serviço de Informação ao Cidadão da ANTT, a qual, gentilmente, colaborou com a disponibilização dos relatórios de monitoramento anual entre os anos de 2013 e 2018.

Com tudo isso, neste capítulo serão abordadas as informações básicas do trecho rodoviário BR-101/ES e as características gerais tanto do total de OAEs como da amostra de pontes e viadutos de estudo. Finalmente, serão exibidos os resultados de aplicação do código com as OAEs do trecho estudado, mas focalizados no componente Lajes, comparando o seu nível de deterioração com os outros componentes.

6.1. Informação geral sobre a BR-101/ES

A BR-101/ES - Gov. Mario Covas percorre aproximadamente 475,9 km do trecho da BR-101, compreendidas entre o acesso à cidade de Mucuri, no Sul da Bahia, até a divisa de Espírito Santo e Rio de Janeiro. A maior parte da concessão está no Estado do Espírito Santo, com 458,4 km, enquanto os restantes 17,5 km estão na superfície do Estado da Bahia. Este trecho rodoviário está sob concessão da ECO101, empresa pertencente ao grupo EcoRodovias Infraestrutura e Logística SA. Na figura 6.1 pode-se observar o trecho percorrido pela rodovia BR-101/ES.

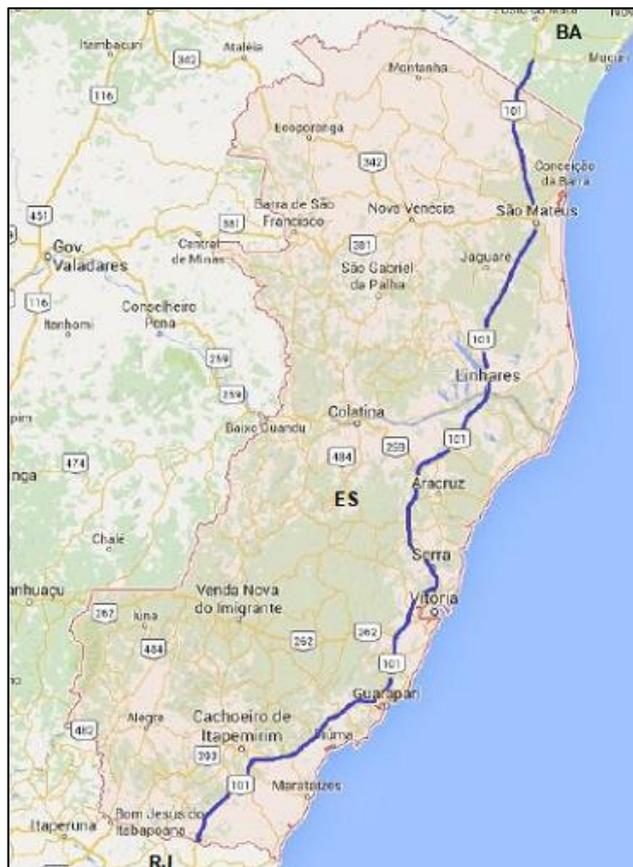


Figura 6.1 - Mapa de localização do trecho de concessão BR-101/ES

Algumas outras informações básicas desta concessão rodoviária são mencionadas a seguir:

- Empresas Controladoras: EcoRodovias Infraestrutura e Logística S/A e SBS Engenharia e Construções LTDA.
- Trecho Objeto da Concessão: BR 101/ES/BA - Entroncamento BA-698 (acesso a Mucuri) - Divisa ES/RJ
- Extensão do Trecho Concedido: 475,9 Km
- Data da Assinatura: 17/04/2013
- Início da Concessão: 10/05/2013
- Prazo da Concessão: 25 anos
- Início da Cobrança de Pedágio: 18/05/2014
- Compromissos assumidos: Contrato

6.2. Caracterização das OAEs

As informações disponibilizadas nos relatórios de monitoramento indicam que a BR-101/ES - Gov. Mario Covas tem um total de setenta e duas (72) OAEs.

Desse total, uma (1) está no trecho da BR-101 no Estado da Bahia (km 939+200 ao km 956+900), e as restantes, setenta e uma (1), espalhadas na superfície do Estado do Espírito Santo (km 000+000 ao km 461+050). Na tabela 6.1 pode-se observar a quantidade de cada tipo de OAE, enquanto a figura 6.2 traz a porcentagem das setenta e duas (72) OAEs segundo a sua distribuição em pontes e viadutos, passarelas, túneis e bueiros.

Tabela 6.1 - Número e tipo de OAEs na BR-101/ES

Tipo de OAE	Quantidade
Pontes e viadutos	55
Passarelas	8
Túneis	5
Bueiros	4
Total	72

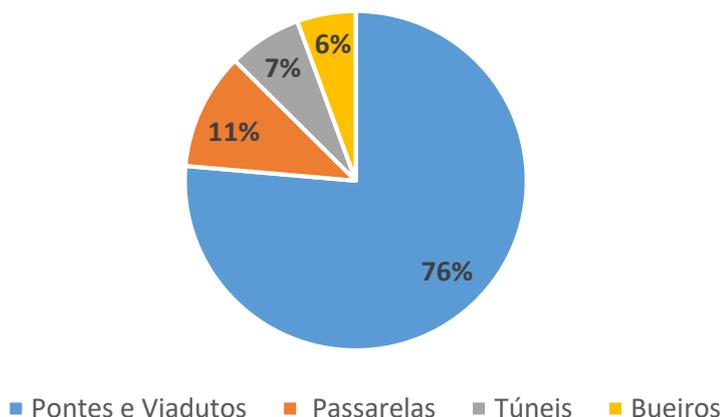


Figura 6.2 - Distribuição percentual das OAEs da concessão rodoviária BR-101/ES

Sendo mais específicos, o trecho tem um total de cinquenta e cinco (55) pontes e viadutos que, categorizadas segundo o tipo de sistema estrutural, possuem trinta (30) obras de tipo Viga de Concreto Armado, dezoito (18) de tipo Viga de Concreto Protendido, cinco (5) de tipo Laje de Concreto Armado, uma (1) de tipo mista e uma (1) de tipo Arco Inferior de Concreto Armado. Veja na tabela 6.2 os tipos de estruturas de pontes e viadutos e o número de cada uma, enquanto na figura 6.3 pode-se olhar a porcentagem de participação de cada tipo de sistema estrutural presente dentre o total de pontes e viadutos da BR-101/ES.

Tabela 6.2 - Tipologias estruturais usadas nas pontes e viadutos da BR-101/ES

Tipo de Estrutura	Quantidade
Viga de Concreto Armado	30
Viga de Concreto Protendido	18
Laje de Concreto Armado	5
Mista	1
Arco de Concreto Armado	1
Total	55

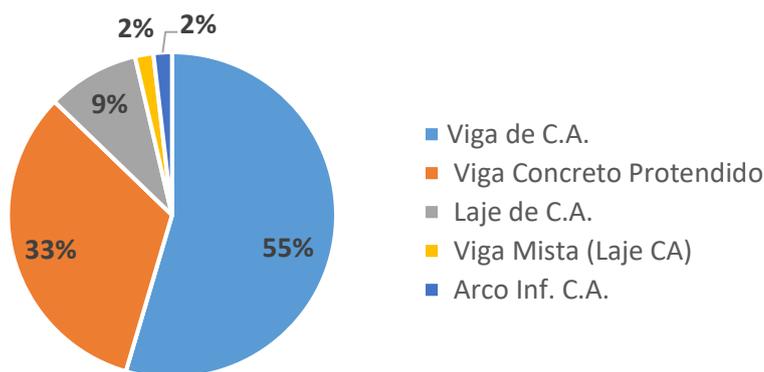


Figura 6.3 - Distribuição percentual das pontes e viadutos da BR-101/ES, segundo o sistema estrutural

6.3. Características da amostra de estudo

Para o Estudo de Caso foram selecionadas as trinta (30) obras com sistema estrutural de tipo Vigas de Concreto Armado. Além de estar constituídas pelo material onde aplica a metodologia proposta, as obras de vigas de concreto armado têm a maior porcentagem de presença no trecho rodoviário, cinquenta e cinco por cento (55%), permitindo desse modo dispor de um maior registro de dados para a modelagem da deterioração. No fim de contas, a segunda característica foi determinante na hora de escolher o universo de pontes e viadutos a avaliar, quando comparada com as pontes e viadutos de tipo Vigas de Concreto Protendido.

O administrador da concessão começou suas operações no ano de 2013. O material de estudo está apoiado nos dados de inspeção cadastral, realizadas a toda a rede de obras dentro do primeiro ano de concessão do trecho rodoviário. Além disso, se tem aproveitado os dados contidos nos relatórios de monitoramento das OAEs, entre os anos de 2014-2018. Nos relatórios de monitoramento estão incluídos os ICs diagnosticados após a realização das inspeções rotineiras. Sendo que o monitoramento das OAEs é realizado com uma frequência regular a cada um (1) ano,

os dados de inspeções de pontes de um total de seis (6) anos, desde o 2013 até o 2018, foram registrados por intermédio do código, conformando assim, o banco de dados da rede de obras em estudo. É importante indicar que nos relatórios da inspeção cadastral e rotineiras não estão indicados o ano de construção (idade) das pontes, portanto foram estimadas as idades a partir da informação do trem tipo de desenho, a largura total e a aparência percebida nas fotos das estruturas (ver tab.1.2).

O registro de dados de condição atinge o número de 925 pontos válidos. Normalmente deve ter tido 930 pontos; porém, se verificou que o viaduto localizado no km 202+350 teve trabalhos de recuperação em 2016, foi interditada e os ICs não foram atribuídos a nenhum componente esse ano. Na figura 6.4 se observam gráficos por cada componente com a distribuição dos dados de condição de todas as pontes do trecho estudado. Por componente corresponde aproximadamente 186 pontos, mas se observa uma menor quantia porque existem pontos coincidentes, devido às obras que têm quase a mesma idade. A figura também inclui o gráfico com os dados de condição para as pontes (Global) onde o estado de cada ponte é definido, segundo várias entidades brasileiras, como o menor IC dentre os componentes. Também se observa que por cada componente existem mais dados com ICs de 4 e 5.

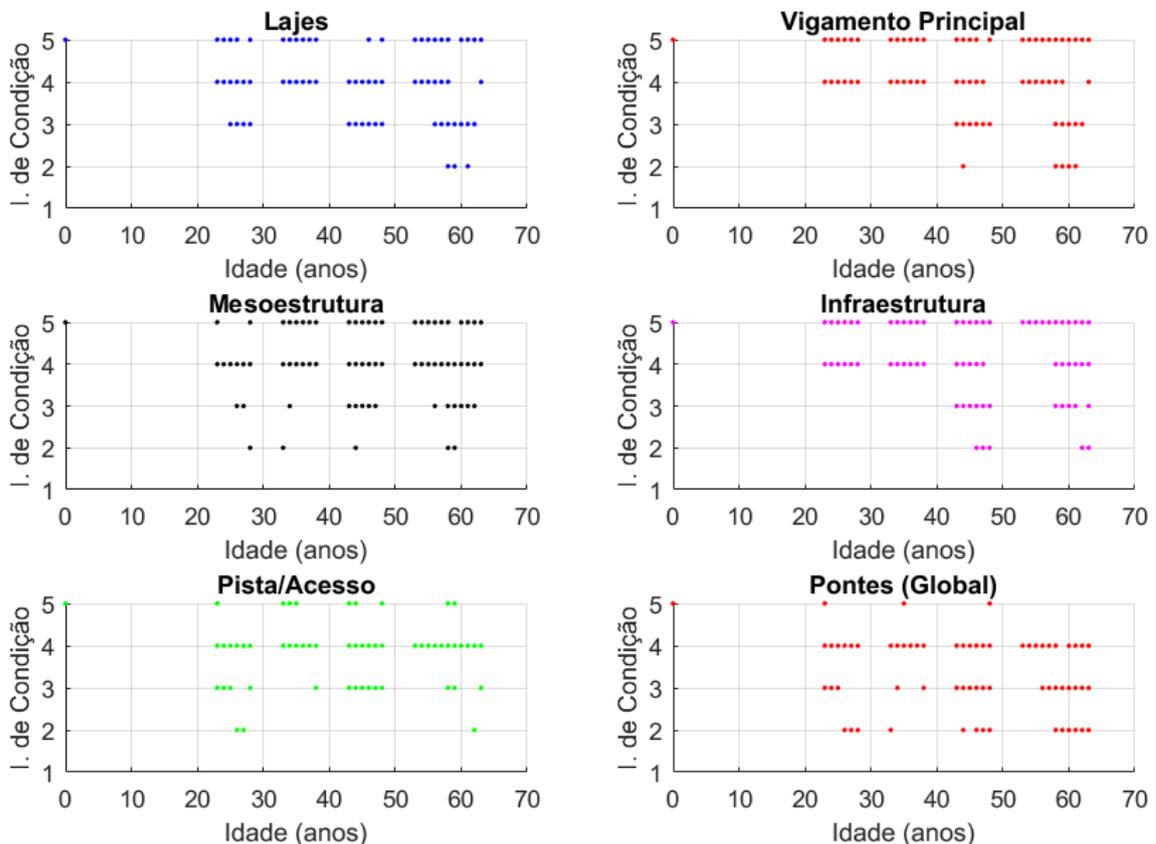


Figura 6.4 - Idade versus Índice de Condição para cada componente de ponte

Com o fim de comparar os dados usados no modelo de Markov diante uma estimação estatística que usa regressão não linear, se observam nos gráficos da figura 6.5 que a quantidade de pontos para modelagem é muito menor que as mostradas na figura 6.4. Isso se deve a uma filtragem de dados mais discriminatória para alcançar precisão na modelagem determinística, pois as obras que receberam trabalhos de melhoramento podem apresentar componentes cujas idades chegam a ser diferentes da idade de serviço da obra, obrigando a desprezar todas as obras que tiveram ações de intervenção.

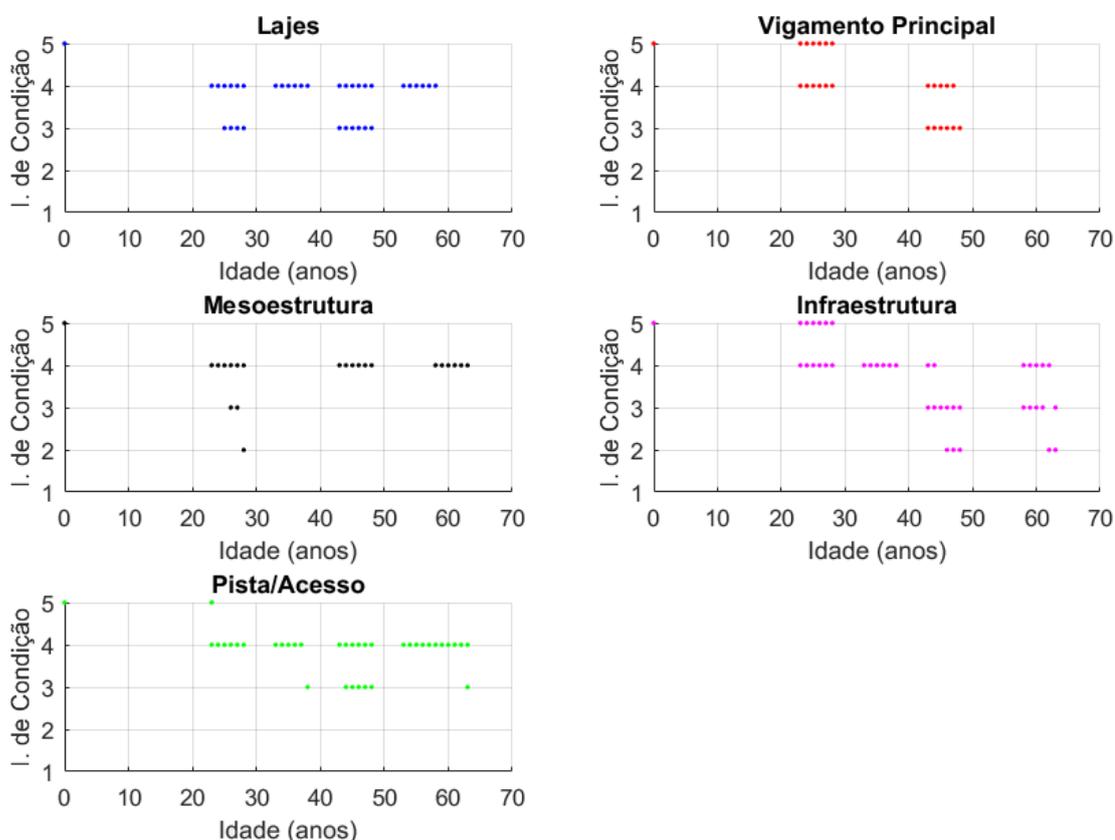


Figura 6.5 - Dados de condição válidos para uso de modelo determinístico

6.4. Resultados

A aplicação do código computacional forneceu resultados para cada componente de ponte e para a condição global das pontes. No entanto, basicamente serão mostrados os resultados da componente Lajes, além do gráfico comparativo entre as curvas de deterioração dos componentes e a global das pontes.

Após a conformação do banco de dados o algoritmo efetuou a filtragem. Durante as inspeções realizadas no período de 2013 a 2018 transcorreram cinco (5)

intervalos de tempo, cada intervalo com uma duração de um (1) ano, resultando em um total de cento vinte e nove (129) transições de estado acontecendo nas Lajes. Na tabela 6.3 podemos olhar o número de mudanças ou permanências de estado para as lajes.

Tabela 6.3 - Número de Transições de Estado para as Lajes

Estado	$n_{s,1}$	$n_{s,2}$	$n_{s,3}$	$n_{s,4}$	Σ
S=1	28	2	0	0	$n_1 = 30$
S=2	0	55	4	0	$n_2 = 59$
S=3	0	0	38	1	$n_3 = 39$
S=4	0	0	0	1	$n_4 = 1$
Total =					129

Posteriormente, usando o método de previsão percentual foram estimadas as MPT de cada componente de ponte. A seguir se observa a matriz resultante para as Lajes:

$$MPT_{Laje} = \begin{bmatrix} 0,933 & 0,067 & 0 & 0 \\ 0 & 0,932 & 0,068 & 0 \\ 0 & 0 & 0,974 & 0,026 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Definidas as MPT para cada componente o código estimou as probabilidades transitórias ou vetores de estado, $Q(t)$, segundo a equação 4.6. Na tabela 6.4 são mostradas as probabilidades transitórias das lajes para certos tempos ou idades, enquanto no gráfico da figura 6.6 são plotadas as probabilidades de transição das lajes no decurso de noventa (90) anos.

Tabela 6.4 - Probabilidades transitórias das Lajes para alguns tempos

t (anos)	Estado 1 (IC=5)	Estado 2 (IC=4)	Estado 3 (IC=3)	Estado 4 (IC=2)
0	1	0	0	0
1	0.933	0.067	0.000	0.000
5	0.708	0.252	0.038	0.001
10	0.502	0.356	0.132	0.011
20	0.252	0.355	0.325	0.068
40	0.063	0.177	0.475	0.285

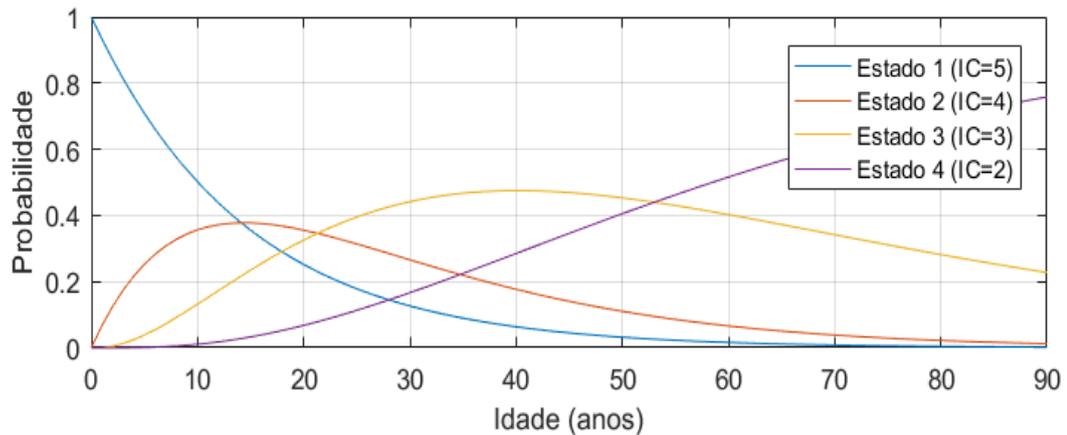


Figura 6.6 - Probabilidades de transição para as Lajes

O vetor de estado para o tempo zero, $Q_{(t=0)}$, foi assumido que será (1, 0, 0, 0). Isso representa a probabilidade que 100% da laje ficará no Estado de Condição 1 (IC=5) no tempo zero. Por sua vez, para uma idade de vinte anos o vetor de estado, $Q_{(t=20)}$, é (0.252, 0.355, 0.325, 0.068), o qual indica que 25,2% das Lajes estará no Estado 1 (IC=5), 35,5% no Estado 2 (IC=4), 32,5% no Estado 3 (IC=3) e 6,8% no Estado 4 (IC=2).

Aplicando a equação 4.7 foram estimadas as condições ou deteriorações esperadas dos componentes de pontes e viadutos da BR-101/ES. O gráfico da figura 6.7 mostra a curva de deterioração para as Lajes, calculada usando o método de previsão percentual. A curva mostrada se estende para um período de noventa (90) anos.

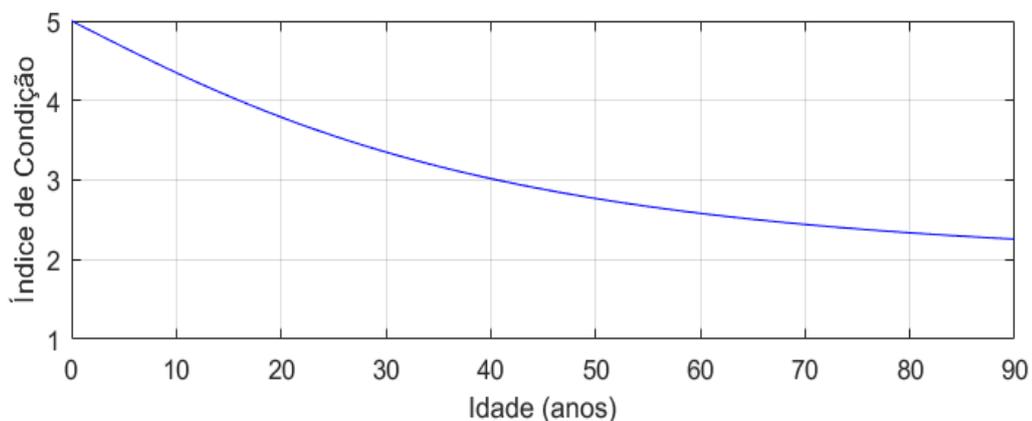


Figura 6.7 - Curva de Deterioração das Lajes usando o modelo de Markov

Na curva apresentada na figura 6.7 não se observa claramente até que idade a componente Lajes experimenta uma alta taxa inicial de deterioração.

Aparentemente é a partir de quarenta (40) anos que a taxa de deterioração das lajes decresce lenta e gradualmente no decorrer do tempo, embora nem sequer à idade de noventa (90) anos atinge o Estado 4 (IC=2).

O código também determinou as curvas de deterioração usando o método de regressão não linear. Tal como se mostrou na figura 6.5, a quantidade de dados para aplicação desse método após a filtragem se reduz consideravelmente. No total, para as lajes, se usaram os dados de condição de nove pontes de um total de trinta (9/30). Similar situação apresentou-se para os demais componentes: sete pontes de trinta (7/30) para o vigamento principal e a mesoestrutura, nove de trinta (9/30) para a infraestrutura e dezessete de trinta (17/30) para pista/acessos. Assim sendo, se construíram as curvas de ajuste polinomial, de grau três (3), para cada uma das pontes que passaram os filtros, observando-se que em todas as componentes se tiveram algumas pontes ou viadutos para os quais seus pontos não se ajustaram adequadamente à forma da curva polinomial, gerando curvas estranhas (ver figura 6.8). Isso sugere que o histórico de dados de inspeção das pontes ainda é insuficiente para desenvolver um modelo determinístico.

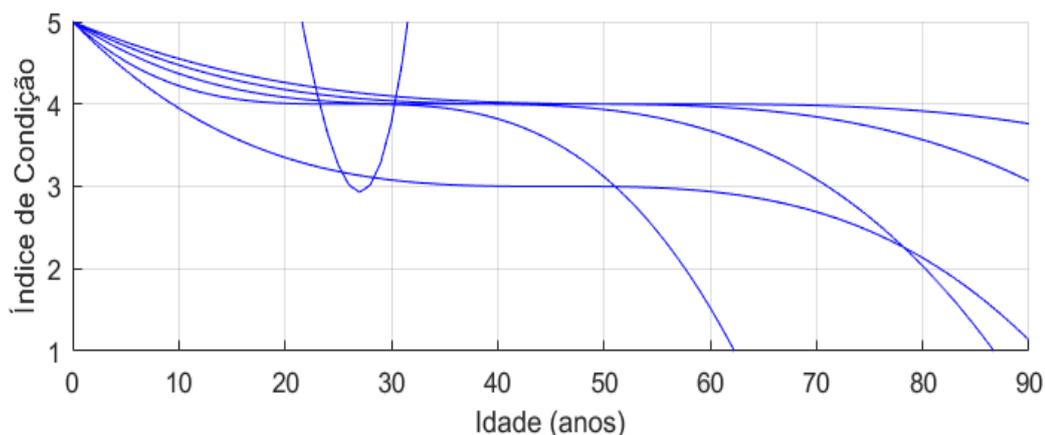


Figura 6.8 - Ajuste dos dados das lajes usando a técnica de regressão não linear (polinômio de grau 3)

Os problemas apresentados na aplicação do modelo determinístico por regressão também afetam a possibilidade de usar à brevidade, pelo menos neste estudo de caso, o método de otimização usado para calibrar as MPTs e apresentado na subseção 4.3.2. Este é outro motivo para que atualmente o método de frequência percentual tenha maior viabilidade.

Na figura 6.9 foram plotadas as curvas de deterioração de todos os componentes de pontes, incluindo a curva de deterioração global das obras do trecho. A partir da figura é possível dizer que a componente Pistas/Acessos apresenta as mais altas taxas de deterioração e a maior velocidade de degradação, seguida pela infraestrutura, a mesoestrutura, o vigamento principal e as lajes. Também, se consideramos as previsões de desempenho que foram obtidas de atribuir o menor IC como nota global, podemos dizer que para o conjunto de pontes da BR-101/ES essa consideração resultou conservadora, já que inclusive apresenta uma maior taxa de deterioração quando comparada com as curvas dos componentes.

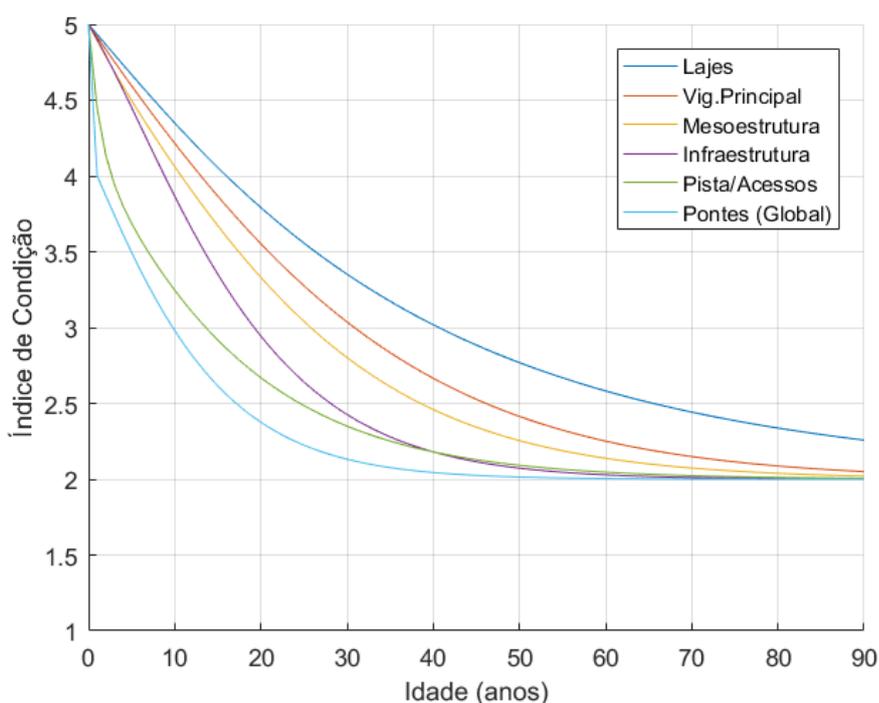


Figura 6.9 - Gráfico comparativo entre as curvas de deterioração das componentes e as pontes como um todo

Avaliando a nível de componente a tabela 6.5 mostra a previsão do desempenho das Lajes das trinta pontes e viadutos da BR-101/ES. O horizonte de tempo considerado na estimação do estado das obras considera três pontos de tempo: o 2019, transcorrido um (1) ano depois da última inspeção; o 2021, transcorridos três (3) anos; e o 2023, transcorridos cinco (5) anos. O IC do ano 2018 corresponde à condição atual.

Os ICs atingidos após da previsão a cinco anos sugerem que ainda nenhuma laje de ponte atinge o IC=2, índice a partir do qual os regulamentos das entidades federais exigem a interdição da obra e a imediata ação de recuperação.

Isso não isenta da necessidade de algum tipo de manutenção, reparo ou substituição segundo o IC, mas também denota a importância de realizar futuros estudos para definir claramente o IC ligado à tomada de certa ação de intervenção. Também, pode-se observar que o nível de decaimento em 5 anos é maior para as lajes de ponte cuja condição transita do IC=5 para o IC=4.67 (degradação de 0,33 pontos), sendo que a transição é mais lenta do IC=4 para o IC=3.69 (0,31 pontos) e do IC=3 para o IC=2.88 (0,12 pontos).

Tabela 6.5 - Índices de condição esperados nas lajes para dentro de 1, 3 e 5 anos

Denominação da OAE	Índice de Condição de Lajes			
	2018 (Cond. Atual)	2019 (Após 1 ano)	2021 (Após 3 anos)	2023 (Após 5 anos)
Viaduto - Passagem superior	5	4.93	4.80	4.67
Ponte Rio Abissínia - N/S	4	3.93	3.81	3.69
Ponte Rio Preto do Sul	4	3.93	3.81	3.69
Ponte Rio Guaraná	5	4.93	4.80	4.67
Viaduto - Passagem inferior	4	3.93	3.81	3.69
Ponte Rio Itapira	5	4.93	4.80	4.67
Ponte Rio Fundão	5	4.93	4.80	4.67
Ponte Rio Timbuí	3	2.97	2.93	2.88
Viaduto - Passagem inferior	4	3.93	3.81	3.69
Viaduto - Passagem inferior	4	3.93	3.81	3.69
Ponte Canal dos Escravos - S	3	2.97	2.93	2.88
Passagem inferior - Via férrea	3	2.97	2.93	2.88
Ponte Rio Bubu - S	4	3.93	3.81	3.69
Ponte Rio Jucu - Sul	4	3.93	3.81	3.69
Ponte Rio Jucu - Norte	4	3.93	3.81	3.69
Ponte	5	4.93	4.80	4.67
Ponte Rio Conceição	5	4.93	4.80	4.67
Ponte Rio Jaboti	5	4.93	4.80	4.67
Ponte Rio Grande	5	4.93	4.80	4.67
Ponte Rio Benevente	4	3.93	3.81	3.69
Ponte Rio Itaperorama	5	4.93	4.80	4.67
Ponte Córrego Tocaia	5	4.93	4.80	4.67
Ponte Rio Itapoama	5	4.93	4.80	4.67
Ponte Córrego Safra I	4	3.93	3.81	3.69
Ponte Córrego Safra II	5	4.93	4.80	4.67
Ponte Rio Muqui	5	4.93	4.80	4.67
Ponte Rio São José das Torres	5	4.93	4.80	4.67
Ponte Rio Paraíso	5	4.93	4.80	4.67
Ponte Rio Paraíso I	5	4.93	4.80	4.67
Ponte Rio Paraíso II	4	3.93	3.81	3.69

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nas seções seguintes são separadas e apresentadas uma série de conclusões segundo os principais temas tratados nesta dissertação. Estes abrangem conclusões e recomendações sobre a situação da gestão de pontes no Brasil, a metodologia proposta para avaliar a condição de pontes, o código computacional desenvolvido e os resultados do estudo de caso realizado. Finaliza o capítulo com algumas sugestões para trabalhos futuros na área de pesquisa.

7.1. Sobre a situação da gestão de pontes no Brasil

Aparentemente todas as gerenciadoras de OAEs no Brasil praticam uma abordagem “de baixo para acima”. O controle inicia desde uma avaliação individual das pontes, estendendo-se, em última instância, à análise da rede de pontes. Isso não é de estranhar, toda vez que o monitoramento de suas obras nem excede dez anos, sendo assim, complicado, estabelecer políticas e padrões adequados para controlar o estado das obras desde uma visão superior.

O universo de pontes sob controle das entidades federais brasileiras não é muito grande. Deve-se essencialmente ao aproveitamento de programas de Concessões e Delegações que permitem repartir as despesas e demandas produto das explorações rodoviárias.

Evidencia-se que as duas normas mais utilizadas para inspecionar pontes e viadutos rodoviários no Brasil são a norma ABNT NBR 9452:2016 e a DNIT 010/2004-PRO. E além do mais, comparativamente, a NBR 9452:2016 é mais abrangente e permite uma avaliação mais detalhada ou refinada das estruturas, discretizando a avaliação da condição em base a três parâmetros: segurança estrutural, funcionalidade e durabilidade.

A ET-00.000.000-0-C21-002-R01, de forma semelhante à NBR 9452, avalia o estado de pontes considerando parâmetros de segurança estrutural, funcionalidade e durabilidade. Mas, vai ainda um pouco mais longe que as outras normas brasileiras, já que propõe o controle das obras não só avaliando o estado operacional, senão também o urgenciamento, entendendo-se como a estimativa dos prazos máximos dentro dos quais deverão ser iniciadas e finalizadas as ações de

recuperação nas OAEs. Entretanto, o urgenciamento abrange cinco (5) anos e é muito subjetiva, pois depende da experiência do inspetor.

Basicamente, todas as normas brasileiras de vistorias dividem as pontes em componentes, sendo que cada um abrange mais de um elemento de ponte. Por exemplo, a ET-00.000.000-0-C21-002 considera que o componente Superestrutura engloba a laje, as vigas longarinas e as vigas transversinas de uma ponte. Sistemas estrangeiros mais detalhados têm dividido as pontes em um amplo inventário de elementos e componentes para os quais, após cada vistoria, certas medidas de desempenho são atribuídas a eles.

Atualmente a maioria das Concessionárias federais e paulistas delegam os trabalhos de vistorias e a avaliação das pontes, assim como o planejamento das ações de intervenção, a uma empresa de consultoria externa que depende da expertise do inspetor de pontes e o pessoal técnico contratado.

Em certos casos, e por diversos motivos, as gerenciadoras de OAEs mudam a empresa que realiza os trabalhos de monitoramento, acarretando um possível aumento da subjetividade durante a classificação das obras de um determinado trecho rodoviário. Isto pode prejudicar a precisão das avaliações, sobretudo quando se pretende avaliar a condição das obras em base a inspeções visuais e medidas de desempenho.

Apoiado nos relatórios de monitoramento das OAEs das concessões federais, observou-se que todas as administradoras atribuem uma nota técnica global a cada obra, considerada a menor nota dentre as notas atribuídas a seus componentes.

7.2. Sobre a metodologia proposta e o código computacional

Os trabalhos de monitoramento de obras no Brasil ainda não são suficientes para fornecer políticas e padrões adequados para uma gestão “top-down”. Por isso, o sistema proposto com uma abordagem “bottom-up” é adequado, propiciando a avaliação da condição de componentes e pontes individuais e, deixando em última análise à rede de pontes.

Embora a proposta seja desenvolvida para avaliar a condição de pontes e viadutos rodoviários de concreto, os mesmos procedimentos da metodologia de

avaliação proposta poderiam ser seguidos para um conjunto de pontes de outro tipo de material. Porém, a metodologia poderia ser adaptada sempre e quando se disponha da normatividade que permita identificar os principais defeitos e patologias associadas ao material empregado, se tenham estabelecidos procedimentos de vistorias e diagnósticos de classificação dos ativos. Assim, posteriormente, seria viável adaptar as variáveis e processos para a modelagem da deterioração das pontes.

A maioria dos gestores brasileiros de pontes, se não todos, realizam o monitoramento anual das obras sob sua jurisdição e, posteriormente, definem planos para o controle das obras por um horizonte temporal de cinco (5) anos. A metodologia proposta, que inclui um modelo de deterioração usando Cadeias de Markov, permite prever a condição das obras para horizontes de tempo muito maiores, permitindo desse jeito priorizar a manutenção e outras ações, e ir definindo a demanda de orçamentos para os próximos anos, bem como os recursos técnicos e logísticos que poderiam ser atribuídos a esses trabalhos.

O código de computador desenvolvido com o *software* MATLAB tem sido baseado na metodologia proposta no capítulo 5 desta pesquisa. Não permite avaliar o estado de condição de OAEs de materiais diferentes ao concreto estrutural.

No Brasil, e sobretudo no âmbito das concessões, não se dispõe de um registro histórico de dados de condição de pontes suficiente para verificar a acurácia e confiabilidade do modelo de deterioração proposto. Essa situação não permite ter em consideração outros modelos que precisam um maior volume de dados de condição.

7.3. Sobre os resultados do Estudo de Caso

Resultados mais acurados usando o modelo de deterioração proposto serão atingidos conforme mais dados de inspeções e registros de ações de manutenção estejam disponíveis e o período das inspeções seja constante.

Baseados nos dados disponibilizados para este estudo se observou que o componente Pista/Acessos mostraram a maior taxa de deterioração no tempo, seguido pela Infraestrutura, Mesoestrutura, Vigamento Principal e Lajes.

Como nota global de cada OAE a concessionária atribui o menor IC dentre os cinco (5) componentes. Sob essa consideração, as taxas de deterioração global apresentaram maior velocidade de degradação quando comparadas com as taxas dos componentes das obras. Portanto, pode-se advertir que dar o peso de um (1) a participação de cada componente na degradação de uma ponte inteira é uma prática conservadora.

Em alternativa e com um intuito comparativo o código de computador incluiu rotinas para estimar a deterioração das OAEs usando uma abordagem estatística que se apoia na técnica de regressão. A aplicação dessas rotinas para com as OAEs do estudo de caso evidenciou que ainda não se tem um número adequado de registros de dados de condição para efetuar esse tipo de modelagem. O número de estruturas consideradas para a avaliação diminuiu a quase um terço depois da filtragem, além que de início o número de inspeções disponibilizadas (6) já é pequeno. As demais concessionárias federais também dispõem, ainda, de um número limitado de dados de condição.

Da conclusão do parágrafo precedente também decorre que ainda não se tem dados suficientes para calibrar uma MPT usando o método de otimização baseado em regressão.

7.4. Sobre trabalhos futuros

Existem muitos sistemas de gestão de pontes com sucesso, desde os mais simples aos mais complexos, mas a maioria deles foram o resultado da coleta e registro de um extenso histórico de vistorias e ações de intervenção. Naturalmente, para o caso brasileiro, o aumento dessas informações nos próximos anos permitirá desenvolver modelos de deterioração mais precisos ou, incluso, optar por metodologias de avaliação que promovam o desenvolvimento e implementação de modelos ainda mais precisos que o modelo de Cadeias de Markov.

Considera-se importante e necessário um maior aprofundamento do conhecimento sobre as metodologias, estruturas organizacionais, técnicas e procedimentos que as administradoras brasileiras seguem para controlar a condição e intervenção de suas obras. Com o intuito de contribuir um pouco nesse tema, apresenta-se um Modelo de Questionário no Apêndice B. Este questionário poderia

ser enviado as principais entidades para identificar as maiores similitudes e diferenças na gestão das obras brasileiras. O modelo do apêndice está baseado nos trabalhos realizados pela Austroads (2002), a *Bridge Management Questionnaire Report* (FHWA, 2010) e a *IABMAS Bridge Management Committee* (Mirzaei et al., 2012).

As notas técnicas ou Índices de Condição definidas pelas normas brasileiras de inspeções foram desenhadas para ser aplicadas só a pontes de concreto armado e concreto protendido. Futuros trabalhos poderiam estar orientados à definição de ICs para medir a resposta de OAEs onde predominam outros tipos de materiais, como o aço estrutural, ou inclusive, mais especificamente, diferentes tipos de estrutura. As pesquisas realizadas por Lee (2007), Patidar et al. (2007), Lounis et al. (2009), Suksuwan e Hadikusumo (2010) podem ser úteis como referência.

Os modelos determinísticos e estocásticos ainda são usados em vários países porque são desenvolvidas técnicas que superam, ou diminuem, algumas limitações desses modelos, ou simplesmente permitem melhorar as condições para seu desenvolvimento, como a qualidade e disponibilidade de dados de classificação de condição. É o caso do método de *Backward Prediction* (Bu et al., 2012) que permite gerar ICs de pontes perdidas no passado, garantindo, daquele jeito, dados de condição adequados, conforme necessário para a modelagem do desempenho a longo prazo.

Sistemas estrangeiros mostraram que a otimização da gestão de OAEs requer não só de modelos de deterioração para otimizar e priorizar as ações de intervenção, senão que também resulta favorável o desenvolvimento de modelos de custos. Os modelos de custos melhoram a priorização dos trabalhos de intervenção tendo em consideração as restrições de orçamento e a correta alocação de recursos disponíveis. É necessário, portanto, estudar e desenvolver um modelo mais refinado, como é o de custos do ciclo de vida nas propostas locais para a gestão das obras de arte especiais.

A metodologia proposta recomenda a pré-classificação das OAEs segundo fatores externos (idade, volume de tráfego, clima da região, importância da via, tipo de estrutura e material, capacidade portante, etc.) para conseguir maior precisão nas previsões do desempenho das construções. Futuros trabalhos poderiam superar essa limitação e considerar uma pré-classificação automática das obras. Inclusive, a partir disso, se poderia estudar o comportamento de redes de pontes de concreto

pertencentes a outras regiões do país ou sob diversas condições climáticas. Esses estudos contribuiriam a estender o conhecimento e a desenvolver modelos de previsão de abrangência nacional.

A maioria das pesquisas desenvolvidas usando modelos de deterioração avaliam a condição de certo componente ou das pontes como um todo. Portanto, seria adequado aprofundar a investigação referida à interação entre as componentes, relativa ao progresso da deterioração. Além disso, estudar a estimativa do peso adequado ou influência de cada componente para o cálculo do IC global de uma infraestrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **NBR 9452:2016 Inspeção de Pontes, Viadutos e Passarelas de Concreto - Procedimento** (2016). Rio de Janeiro.
- Agrawal, A. K., & Kawaguchi, A. (2009). **Bridge Element Deterioration Rates (Final Report, Project # C-01-51)**. Transportation Infrastructure Research Consortium New York State Department of Transportation (TIRC/NYS DOT). New York, USA.
- Agrawal, A. K., Kawaguchi, A., & Chen, Z. (2010). **Deterioration Rates of Typical Bridge Elements in New York**. *Journal of Bridge Engineering*, 15(4), 419–429.
- Almeida, J. de O. (2013). **Sistema de Gestão de Pontes Com Base Em Custos de Ciclo de Vida**. Universidade do Porto.
- ARTESP. (2007). **Controle Das Condições Estruturais, Funcionais e de Durabilidade Das Obras de Arte Especiais (ET-00.000.000-0-C21/002)**.
- Austrroads. (2002). **Bridge Management Systems - the State of the Art**. Sydney, NSW, Australia.
- Austrroads. (2013). **Bridge Management Using Performance Models**. Sydney, Australia.
- Bien, J. (1999). **Expert Functions in Bridge Management Systems**. *TRB Transportation Research Circular 498, H-3*(January 1999), 1–15.
- Blakelock, R. (1993). **Experience in the Development of a Computerized Bridge Management System and of Its Use in a Number of Authorities in the UK and Overseas**. In *Bridge Management 2: inspection, maintenance, assessment and repair* (pp. 880–888). London: Thomas Telford Limited.
- Brady, K. C., O'Reilly, M., Bevc, L., Žnidarič, A., O'Brien, E., & Jordan, R. (2004). **COST 345 Procedures Required for the Assessment of Highway Structures - Final Report**.
- Bu, G., Lee, J., Guan, H., Blumenstein, M., & Loo, Y.-C. (2012). **Performance Prediction of Concrete Elements in Bridge Substructures Using Integrated Deterioration Method**. *18Th Congress of IABSE*, 1–8.
- Buratto, C., Greco, M., Venturelli, J., & Carvalho, J. (2017). **Desenvolvimento de**

Metodologia Para a Proposta de Modelos de Deterioração de Pontes Rodoviárias Brasileiras. In *59° Congresso Brasileiro do Concreto* (pp. 1–16).

Buratto de Lima e Oliveira, C. (2019). **Determinação e Análise de Taxas de Deterioração de Pontes Rodoviárias Do Brasil.** Universidade Federal de Minas Gerais.

Butt, A. A., Shahin, M. Y., Feighan, K. J., & Carpenter, S. H. (1987). **Pavement Performance Prediction Model Using the Markov Process.** *Transportation Research Record*, 1123, 12–19.

Cambridge Systematics. (2006). **Pontis Release 5 Technical Manual.** Washington DC, USA: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Cavalline, T. L., Whelan, M. J., Tempest, B. Q., Goyal, R., & Ramsey, J. D. (2015). **Determination of Bridge Deterioration Models and Bridge User Costs for the NCDOT Bridge Management System.** North Carolina.

Cesare, M. A., Santamarina, C., Turkstra, C., & Vanmarcke, E. H. (1992). **Modeling Bridge Deterioration with Markov Chains.** *Journal of Transportation Engineering-ASCE*, 118(6), 820–833.

CNT. (2017). **Pesquisa CNT de Rodovias 2017: Relatório Gerencial.** Brasília, Brasil.

Cruz, R. B. C. da, Silva, F. A. da, Cavalcante, P. L., Pacheco, R. R. M., & Santos, R. R. dos. (2017). **Contribuições Sobre Inspeções Em Pontes e Viadutos Conforme NBR 9452:2016 – Vistoria de Pontes, Viadutos e Passarelas de Concreto.** *Engenharia Estudo e Pesquisa. ABPE*, 17(1), 18–29.

de Brito, J., & Branco, F. A. (1994). **Bridge Management Policy Using Cost Analysis.** In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings* (Vol. 104, pp. 431–439).

de Queiroz Motta, E., Melo Ferrer de Moraes, M. H., Gomes Mafra Filho, F. H., Baier Nunes, G., Andrade de Oliveira, G., Guimarães Tavares, T., ... Sc, M. (2018). **Comparação Das Normas de Inspeção de Obras de Arte Especiais Vigentes No Brasil**, 1–10.

De Sitter, W. R. (1984). **Costs of Service Life Optimization “The Law of Fives.”** In

- CEB-RILEM Workshop on Durability of Concrete Structures (Copenhagen, Denmark, May 18-20, 1983) (pp. 131–134). Comité Euro-International du Béton.
- DNIT. (2004a). **Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias**. Rio de Janeiro, Brasil.
- DNIT. (2004b). **Norma 010/2004-Pro: Inspeções Em Pontes e Viadutos de Concreto Armado e Protendido-Procedimento**. Rio de Janeiro, Brasil.
- DNIT. (2017). **Relatório de Gestão Do Exercício de 2016**. Brasília, Brasil.
- FHWA. (2010). **Bridge Management Questionnaire Report**. Retrieved from <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/management/bms.pdf>
- Figueiredo, E., Moldovan, I., & Barata Marques, M. (2013). **Condition Assessment of Bridges : Past , Present and Future A Complementary Approach**.
- Frangopol, D. M. (1999). **Life-Cycle Cost Analysis for Bridges**. In *Bridge safety and reliability* (pp. 210–236). ASCE.
- Gutkowski, R. M., & Arenella, N. D. (1998). **Investigation of Pontis - A Bridge Management Software**.
- Haardt, P., & Holst, R. (2008). **The German Approach to Bridge Management - Current Status and Future Development**. In *Tenth International Conference on Bridge and Structure Management* (pp. 3–15). Buffalo, New York: Transportation Research Board.
- Hawk, H. (1999). **BRIDGIT: User-Friendly Approach to Bridge Management**. *Transportation Research Circular*, 1–15. Retrieved from http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/circ498/v1_E07.pdf
- Jiang, Y., & Sinha, K. C. (1989). **Bridge Service Life Prediction Model Using the Markov Chain**. *Transportation Research Record*, 1223, 24–30.
- Jiang, Yi, Saito, M., & Sinha, K. C. (1988). **Bridge Performance Prediction Model Using the Markov Chain**. *Transportation Research Record*, 1180, (1), 25–32.
- Khan, M. S. (2000). **Bridge-Management Systems Past, Present and Future**. *Concrete International*, 22(8), 53–56.
- Khanzada, K. M., & In. (2012). **State of Bridge Management in Canada**. North Dakota State University -Graduate School. North Dakota State University of Agriculture

and Applied Science.

Kleywegt, A. J., & Sinha, K. C. (1994). ***Tools for Bridge Management Data Analysis***. *Transportation Research Circular*, 423, 16–26.

Kotze, R., Ngo, H., & Seskis, J. (2015). ***Improved Bridge Deterioration Models , Predictive Tools and Costs***. Austroads: Research Report AP-R487-15.

Lauridsen, J., Bjerrum, J., Andersen, N. H., & Lassen, B. (1998). ***Creating a Bridge Management System***. *Structural Engineering International*, 8(3), 216–220.

Lauridsen, J., & Lassen, B. (1999). ***The Danish Bridge Management System DANBRO***. In *Management of highway structures* (pp. 61–70).

Lee, J. (2007). ***A Methodology for Developing Bridge Condition Rating Models Based on Limited Inspection Records***. *Griffith School of Engineering*. Griffith University.

Lounis, Z., Haas, R., Felio, G., & Falls, L. C. (2009). ***Measurable Performance Indicators for Roads: Canadian and International Practice***. *Annual Conference of the Transportation Association of Canada*.

Madanat, S., Mishalani, R., & Ibrahim, W. H. W. (1995). ***Estimation of Infrastructure Transition Probabilities from Condition Rating Data***. *Journal of Infrastructure Systems*, 1(2), 120–125.

Maheswaran, T., Sanjayan, J. G., & Taplin, G. (2005). ***Deterioration Modelling and Prioritising of Reinforced Concrete Bridges for Maintenance***. *Australian Journal of Civil Engineering*, 2(1), 1–12.

Martinez Hipólito, C. (2016). ***As Concessões de Rodovias No Sul Do Brasil***.

Mendes, P. de T. C. (2009). ***Contribuições Para Um Modelo de Gestão de Pontes de Concreto Aplicado à Rede de Rodovias Brasileiras***. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Micevski, T., Kuczera, G., & Coombes, P. (2002). ***Markov Model for Storm Water Pipe Deterioration***. *Journal of Infrastructure Systems*, 8(2), 49–56.

Mirzaei, Zanyar; Adey, Bryan T.; Klatter, Leo; Kong, J. S. (2012). ***The IABMAS Bridge Management Committee: Overview of Existing Bridge Management Systems***.

International Association for Bridge Maintenance and Safety (IABMAS).

Morcous, G., & Lounis, Z. (2005). **Maintenance Optimization of Infrastructure Networks Using Genetic Algorithms.** *Automation in Construction*, 14(1), 129–142.

Morcous, George. (2011). **Developing Deterioration Models for Nebraska Bridges.** Nebraska.

https://doi.org/http://www.royalcommission.vic.gov.au/finaldocuments/summary/PF/VBRC_Summary_PF.pdf

MTPA/EPL. (2017). **Anuário Estatístico de Transportes 2010-2016.**

Muñoz, Y. F., Paz, A., De La Fuente-Mella, H., Fariña, J. V., & Sales, G. M. (2016). **Estimating Bridge Deterioration for Small Data Sets Using Regression and Markov Models.** *World Academy of Science, Engineering and Technology - International Journal of Urban and Civil Engineering*, 10(5), 663–670.

Patidar, V., Labi, S., Sinha, K., Thompson, P., Shirolé, A., & Hyman, W. (2007). **Performance Measures for Enhanced Bridge Management.** *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1991(no.1991), 43–53.

Ranjith, S., Setunge, S., Gravina, R., & Venkatesan, S. (2013). **Deterioration Prediction of Timber Bridge Elements Using the Markov Chain.** *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 27(3), 319–325.

Ryall, M. J. (2010). **Bridge Management.** Elsevier Ltd.

Santos, J. P. M. C. (2016). **Análise Da Carga Móvel e Da Protensão Na Superestrutura de Pontes Biapoiadas Em Vigas Pré-Moldadas Protendidas.** Projeto de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro - Escola Politécnica.

Scherer, W. T., & Glagola, D. M. (1994). **Markovian Models for Bridge Maintenance Management.** *Journal of Transportation Engineering*, 120(1), 37–51.

Small, E. P., Philbin, T., Fraher, M., & Romack, G. P. (1999). **Current Status of Bridge Management System Implementation in the United States.** *Eighth Transportation Research Board Conference on Bridge Management, TRB Transportation Research Circular 498*, (February), A-1/1-16.

- Sobanjo, J. (1997). ***A Neural Network Approach to Modeling Bridge Deterioration.***
- Steele, K. N. P., Cole, G., Parke, G. A. R., Clarke, B., & Harding, J. E. (2000). ***Bridge Maintenance Strategy and Sustainability.*** In *Bridge Management 4: inspection, maintenance, assessment and repair* (pp. 361–369). London: Thomas Telford.
- Suksuwan, N., & Hadikusumo, B. H. W. (2010). ***Condition Rating System for Thailand ' s Concrete Bridges.*** *Journal of Construction in Developing Countries*, 15(1), 1–27.
- Thompson, P. D., & Kerr, B. (1999). ***A New Bridge Management System for Ontario.*** Retrieved from <http://www.pdth.com/images/obms.pdf>
- Van Reyk, F. (1997). ***Bridge Evaluation and Asset Management.*** In G. Chirgwin (Ed.), *Austrroads Bridge Conference Proceedings* (pp. 139–149). Sydney, NSW, Australia.
- Vitório, J. A. P. (2006). ***Vistorias , Conservação e Gestão de Pontes e Viadutos de Concreto.*** *Anais Do 48° Congresso Brasileiro Do Concreto*, 1–16.
- Vitório, J. A. P. (2007). ***Acidentes Estruturais Em Pontes Rodoviárias: Causas, Diagnósticos e Soluções.*** *II Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas*, 1–20.
- Woodward, R. J., Cullington, D. W., Daly, A. F., Vassie, P. R., & Haardt, P. (2001). ***BRIME - Deliverable D14: Final Report.*** Bridge Management in Europe (BRIME).
- Yari, N. (2018). ***New Model for Bridge Management System (BMS): Bridge Repair Priority Ranking System (BRPRS), Case Based Reasoning for Bridge Deterioration , Cost Optimization , and Preservation Strategy.*** University of New Hampshire, Durham.

APÊNDICE A

RESUMO DE ALGUNS SISTEMAS ESTRANGEIROS DE GESTÃO DE PONTES

País	SGPo	1ª versão - Última versão	Avaliação		Previsão		Características e capacidades
			Cap. Carga	Condição (níveis)	Deterioração	Custos	
EUA	PONTIS	1992 - 2019	Sim	n.d.	Estocástico	Sim	Abordagem de gestão "top-down" adequada para grandes redes de OAEs. Modelo de deterioração de Markov. Prevê a condição a partir do estado atual. Permite avaliar a condição, segurança do tráfego, capacidade de carga e risco de eventos extremos.
	Bridgit	n.d.	n.d.	Estocástico	Sim	Sistema completo com abordagem "bottom-up". Também adequada para redes pequenas. Cinco módulos: inventário, inspeção, MR&R, análise e modelos. Permite acrescentar itens no inventário, otimização de ações de reparo através de comparação da relação custo-benefício de cada uma.	
Canadá	OBMS	2002 - 2011	Sim	4	Estocástico	Sim	Utiliza três modelos: deterioração (Markov), conhecimento e custos. Tratamentos padronizados a nível de elemento e ponte inteira para manutenção, reparo, reabilitação e substituição, incluindo custos unitários e eficácia.
Dinamarca	DANBRO	1988 - 2010	Sim	5	Sim	Sim	Seis módulos: de informações básicas, de manutenção, de catálogo de preços, de otimização, de orçamento e custos e módulo de experiências. Seleção de ações de reparo mais ótimos. Orçamentos para um período de 5 anos. Avalia consequências de mudança em orçamento.
Reino Unido	HiSMIS	1990 - n.d.	n.d.	n.d.	Sim	Sim	Cinco módulos: inventário, inspeção, manutenção, história, programa/estudo. Ajuda a planejar inspeções, gerenciar informações de inspeções, auxilia na tomada de decisões sobre manutenção, priorização de manutenções, gestão financeira, planejamento de programas de atualização/substituição.
Alemanha	SIB-Bauwerke	1998 - n.d.	Sim	5	Confiabilidade	Sim	Estabelece combinações de estratégias por períodos de 6 anos para tratar os danos, minimizando custos globais. Compara benefícios econômicos de cada estratégia. Prevê custos de manutenção para médio e longo prazo.

APÊNDICE B

QUESTIONÁRIO SOBRE A SITUAÇÃO DA GESTÃO DE PONTES NO BRASIL

SITUAÇÃO DA GESTÃO DE PONTES RODOVIÁRIAS NO BRASIL

O objetivo deste questionário é conhecer o nível atual de desenvolvimento dos processos e atividades que os gestores das rodovias brasileiras conseguiram implementar para a gestão de pontes e viadutos, bem como a capacidade de inter-relacioná-los num Sistema de Gestão de Pontes (SGPo). As informações desta enquete serão tratadas com total reserva, analisadas e mostradas, desde uma perspectiva geral e acadêmica, com o fim de mostrar a realidade nacional.

Por favor, forneça o e-mail de contato do respondente do questionário.

A. Informação Geral:

1. A que malha rodoviária pertencem as pontes e viadutos sob sua administração?

FEDERAL
 ESTADUAL
 MUNICIPAL

2. Que Estado(s) atravessa o trecho de rodovia operada pela organização?

Pode selecionar mais de uma opção

<input type="checkbox"/> ACRE	<input type="checkbox"/> CEARÁ	<input type="checkbox"/> MATO GROSSO	<input type="checkbox"/> PARANÁ	<input type="checkbox"/> RIO DE JANEIRO	<input type="checkbox"/> SERGIPE
<input type="checkbox"/> ALAGOAS	<input type="checkbox"/> DISTRITO FEDERAL	<input type="checkbox"/> MATO GROSSO DO SUL	<input type="checkbox"/> PERNAMBUC	<input type="checkbox"/> RONDÔNIA	<input type="checkbox"/> TOCANTINS
<input type="checkbox"/> AMAPÁ	<input type="checkbox"/> ESPÍRITO SANTO	<input type="checkbox"/> MINAS GERAIS	<input type="checkbox"/> PIAUÍ	<input type="checkbox"/> RORAIMA	
<input type="checkbox"/> AMAZONAS	<input type="checkbox"/> GOIÁS	<input type="checkbox"/> PARÁ	<input type="checkbox"/> RIO GRANDE DO NORTE	<input type="checkbox"/> SANTA CATARINA	
<input type="checkbox"/> BAHIA	<input type="checkbox"/> MARANHÃO	<input type="checkbox"/> PARAÍBA	<input type="checkbox"/> RIO GRANDE DO SUL	<input type="checkbox"/> SÃO PAULO	

3. Qual é o número total de pontes e viadutos rodoviários que a organização gestiona?

- a) De Concreto Armado
- b) De Concreto Protendido
- c) De Aço
- d) De Madeira

B. Processos para a Gestão de Pontes:

4. Que norma, código ou diretriz usa a organização para a inspeção e avaliação da condição (notas técnicas) das pontes?

Pode selecionar mais de uma opção

ABNT NBR 9452:2016
 NORMA DNIT 010/2004-PRO
 MANUAL DE INSPEÇÃO DE PONTES RODOVIÁRIAS (DNIT 2004)
 OUTRO(S): _____

5. De acordo com os procedimentos e atividades implementadas pela entidade na gestão de seus pontes, quais são os objetivos que conseguiu atingir?

Pode selecionar mais de uma opção

ARMAZENAR INFORMAÇÃO DE PONTES
 FAZER RECOMENDAÇÕES DE MANUTENÇÃO
 FAZER MELHORAS (por ex., alargamentos, reforço)
 FAZER RECOMENDAÇÕES DE REABILITAÇÃO
 FAZER RECOMENDAÇÕES DE SUBSTITUIÇÃO
 ALOCAR FUNDOS
 PREVER FUTURAS CONDIÇÕES
 PROJETAR NOVAS POLÍTICAS E ESTRATÉGIAS
 MONITORAR PROJETOS
 MONITORAR A CONSERVAÇÃO DOS MATERIAIS E O DESEMPENHO DE TÉCNICAS E ESTRATÉGIAS
 OUTRO(S): _____

6. Que programa(s) de computador, método(s) ou ferramenta(s) usa a entidade para:

- a) Coletar e armazenar dados de inspeção e condição de pontes?

- b) Coletar e armazenar informações de intervenções? _____
- c) Prever a deterioração futura de elementos, componentes ou pontes inteiros? _____
- d) Identificar práticas ou estratégias de conservação, manutenção, reabilitação, melhoria e substituição? _____
- e) Nenhuma. Por favor explicar: _____

C. Sistemas de Gestão de Pontes (SGPo):

7. A entidade conseguiu inter-relacionar todos os procedimentos e atividades num Sistema de Gestão de Pontes?
(Se a resposta é negativa, passar à pergunta 11)

SIM NÃO

8. O seu sistema está baseado num modelo comercial?
(Se a resposta é negativa, passar à pergunta 10)

SIM NÃO

9. Qual é o nome desse modelo? Por exemplo: Pontis, Bridgit, Danbro, etc.

10. Um sistema de gestão de pontes idealmente consiste de varios módulos. Por favor indicar qual dos seguintes módulos existem no seu sistema e o seu estado atual de desenvolvimento.

Estados 1- Não considerado 2- Sob consideração 3- Sendo desenvolvido 4- Desenvolvido 5- Operativo

- | | |
|--|----------------------|
| a) Inventário (banco de dados com as propriedades físicas) | <input type="text"/> |
| b) Inspeção (gerenciamento de inspeções) | <input type="text"/> |
| c) Avaliação (classificação da capacidade de carga e volume de tráfego) | <input type="text"/> |
| d) Registros de manutenção (intervenções passadas com custos) | <input type="text"/> |
| e) Condição (histórico de inspeções de condição, índice de desempenho ou nota técnica) | <input type="text"/> |
| f) Planejamento gerencial (orçamentos, encaminhamentos e programas anuais) | <input type="text"/> |
| g) Modelagem de deterioração (previsão de deterioração) | <input type="text"/> |
| h) Priorização (otimização e custo de ciclo de vida dos trabalhos de manutenção) | <input type="text"/> |
| i) Relatórios (relatórios de desempenho da rede) | <input type="text"/> |

11. Que dificuldades está encontrando a entidade para usar o SGPo com o aproveitamento máximo?

Pode selecionar mais de uma opção

FALTA DE TREINAMENTO

FALTA DE FINANCIAMENTO ADEQUADO

FALTA DE STAFF (PESSOAL TÉCNICO)

FALTA DE SUPORTE DE GESTÃO SUPERIOR

OUTRO(S): _____

12. Algum comentário sobre a adoção do seu SGPo e seu desenvolvimento futuro?

Muito obrigado pela colaboração.

Por favor, para qualquer esclarecimento, comentário, recomendação, ou simplesmente o retorno das respostas, considere o seguinte e-mail: c192246@dac.unicamp.br

APÊNDICE C

DETALHES DO CÓDIGO COMPUTACIONAL DESENVOLVIDO PARA AVALIAR A
CONDIÇÃO DE PONTES EXISTENTES NO BRASIL

1. O código permite acrescentar um banco de dados com o registro de dados de pontes em mais de uma sessão, incluindo os dados de inventário e as classificações de condição dos componentes das pontes, resultando muito útil quando o número de obras é extenso e não se pode completar o registro delas de uma só vez. Isso significa que o usuário pode armazenar o banco de dados e terminar a sessão ou continuar com a avaliação do banco de dados. O banco de dados é salvo num arquivo de extensão MAT.
2. O código desenvolvido permite a calibragem da MPT do modelo de Markov. Isso é conseguido devido à facilidade em inserir novas classificações de condição por cada componente (ICs) à medida que se realizam novas inspeções rotineiras. A figura B.1 ilustra a opção mencionada neste item e no item 1. Além disso, aprecia-se uma terceira opção, "Registrar um Novo Banco de Dados", o qual serve para começar a construir um banco de dados do zero.

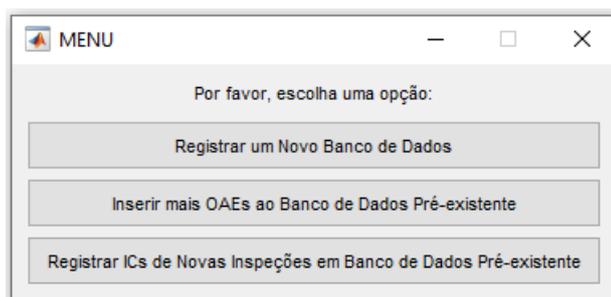


Figura B.1 - Opções para o cadastro de um conjunto de pontes

3. Caso o usuário deseje avaliar um banco de dados pré-existente em diferentes sessões, pode usar as opções de "Inserir mais OAEs ao Banco de Dados Pré-existente" ou "Registrar ICs de Novas Inspeções em Banco de Dados Pré-existente". Mas, depois de escolher essas opções deve inserir o valor zero (0) como o número de OAEs a acrescentar ou como o número de novas inspeções, dependendo da opção escolhida. Dessa forma se continua trabalhando sem alterar os dados pré-existentes. Na figura B.2 pode-se observar a sequência descrita para avaliar os dados previamente armazenadas usando a opção de aumento de obras. Depois de seguir esse procedimento, cabe a possibilidade de manter ou mudar o nome do arquivo.

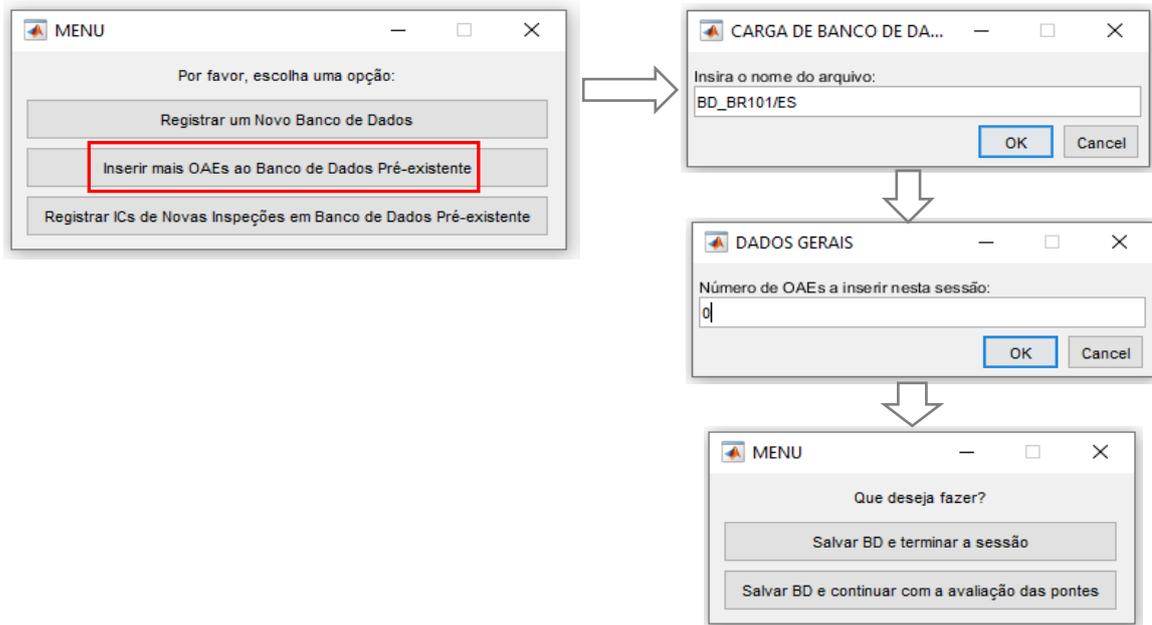
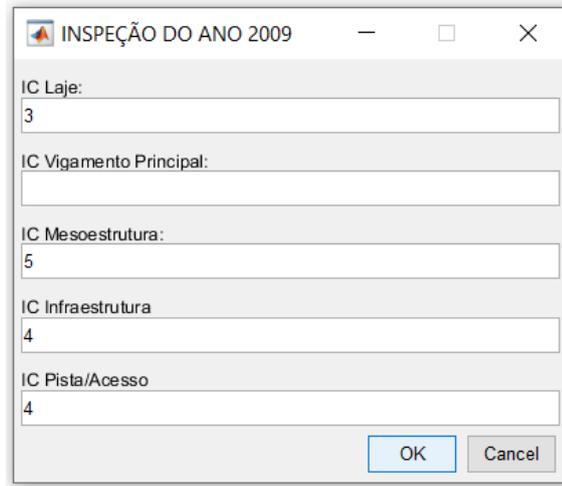


Figura B. 2 - Procedimento para avaliar bancos de dados anteriormente salvos

4. Quando um componente de ponte não tem atribuído um índice de condição, independentemente da obra e do ano da inspeção associada, simplesmente no código não se deve preencher nenhum valor dentro da caixa de diálogo que permite o cadastro dos ICs das obras. Essa situação poderia ser devida, e.g., à dificuldade de acesso a um componente durante uma inspeção, à interdição de uma obra ou por omissão de cadastro durante o uso da ferramenta computacional. Na figura B.3 se evidencia como deve ser tratado este tipo de situações e mostra o caso particular de uma ponte que não teve registrado seu IC para a componente de vigamento principal, correspondente à inspeção do ano 2009.

Denominação da OAE	ICs do Ano 2009				
	Lajes	Vig. Principal	Meso-estrutura	Infra-estrutura	Pistas / Acessos
Ponte Rio Rimac	3	N.D.	5	4	4



The screenshot shows a dialog box titled "INSPEÇÃO DO ANO 2009" with standard window controls (minimize, maximize, close). It contains five input fields, each with a label and a value:

- IC Laje: 3
- IC Vigamento Principal: (empty)
- IC Mesoestrutura: 5
- IC Infraestrutura: 4
- IC Pista/Acesso: 4

At the bottom right, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

Figura B.3 - Procedimento para o registro de obras com omissão de IC

APÊNDICE D

LINHAS DO CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO EM MATLAB PARA AVALIAR A
CONDIÇÃO DE PONTES EXISTENTES NO BRASIL

```

%%-----
%% CÓDIGO PARA AVALIAR O ESTADO DE CONDIÇÃO DE PONTES FEDERAIS BRASILEIROS
%% DE CONCRETO USANDO CADEIAS DE MARKOV
%%-----
% Este código tem como objetivo avaliar o estado de condição a nível de
% componente e ponte inteiro.
% Algumas siglas usadas neste código:
% OAE : Obra de Arte Especial (considera pontes e viadutos)
% BD  : Banco de Dados
% IC  : Índice de Condição
% S   : Estado de Markov
% pij : Probabilidade de Transição do Estado i para o Estado j
% MPT : Matriz de Probabilidades de Transição
% A correspondência entre os Índices de Condição, os Estados de Markov, e
% as Probabilidades de Transição são mostradas na seguinte tabela:
% -----
% |           | IC=5   IC=4   IC=3   IC=2 |
% |           |-----|
% |           | S=1    S=2    S=3    S=4 |
% |-----|
% |IC=5 | S=1 | p11    1-p11    0      0 |
% |IC=4 | S=2 | 0      p22    1-p22    0 |
% |IC=3 | S=3 | 0      0      p33    1-p33 |
% |IC=2 | S=4 | 0      0      0      1 |
% -----
%-----
close all; clear; clc;
%% 1. CONSTRUÇÃO DE BANCO DE DADOS
opcao=menu('Por favor, escolha uma opção:', 'Registrar um Novo Banco de
Dados', 'Inserir mais OAEs ao Banco de Dados Pré-existente', ...
'Registrar ICs de Novas Inspeções em Banco de Dados Pré-existente');
if opcao==1
% 1.1 Registro de um novo banco de dados
% 1.1.1 Dados gerais para a análise
DG=inputdlg({'Número de OAEs a inserir nesta sessão:', ...
'Número de inspeções rotineiras:', 'Ano da primeira inspeção a registrar
(AAAA):', 'Frequência entre inspeções (em anos):'}, ...
'DADOS GERAIS PARA A ANÁLISE', [1 60]);
n=str2double(DG{1}); n_ins=str2double(DG{2}); ins_1=str2double(DG{3});
per=str2double(DG{4}); DG=[n, n_ins, ins_1, per];
% 1.1.2 Dados básicos e específicos de cada OAE
m=cell(DG(1), 9); d=cell(DG(1), 5*DG(2));
for i=1:DG(1)
m(i, :)=inputdlg({'Denominação da OAE:', 'Rodovia:', 'Km+m:', 'Sentido da
Pista:', 'Tipo de Estrutura:', 'Trem Tipo:', 'Comprimento Total (m):', ...
'Largura Total (m):', 'Ano de construção (AAAA):'}, ...
'num2str(i, 'DADOS DA PONTE n°%d'), [1 50]); r=1;
while r<=DG(2)
d(i, 5*(r-1)+1:5*r)=inputdlg({'IC Laje:', 'IC Vigamento
Principal:', ...
'IC Mesoestrutura:', 'IC Infraestrutura', 'IC Pista/Acesso'}, ...
num2str(DG(3)+(r-1)*DG(4), 'INSPEÇÃO DO ANO %d'), [1 50]); r=r+1;
end
end
DE=[m, d];
elseif opcao==2
% 1.2 Inserimento de mais OAEs em um BD pré-existente
% 1.2.1 Carga de BD
arquivo=inputdlg({'Insira o nome do arquivo:'}, 'CARGA DE BANCO DE
DADOS', [1 50]);
load(arquivo{1});

```

```

% 1.2.2 Número de obras a serem adicionadas
n_Ad=inputdlg({'Número de OAEs a inserir nesta sessão:'],'DADOS
GERAIS',[1 50]);
n_Ad=str2double(n_Ad{1}); DG(1)=DG(1)+n_Ad;
% 1.2.3 Dados específicos de cada OAE adicionada
m=cell(n_Ad,9); d=cell(n_Ad,5*DG(2));
for i=1:n_Ad
m(i,:)=inputdlg({'Denominação da OAE:'],'Rodovia:'],'Km+m:'],'Sentido da
Pista:'],'...
'Tipo de Estrutura:'],'Trem Tipo:'],'Comprimento Total (m):'],'Largura
Total (m):'],'...
'Ano de construção (AAAA):'],'num2str(DG(1)-n_Ad+i,'DADOS DA PONTE
n°%d'),[1 50]);
r=1;
while r<=DG(2)
d(i,5*(r-1)+1:5*r)=inputdlg({'IC Laje:'],'IC Vigamento
Principal:'],'...
'IC Mesoestrutura:'],'IC Infraestrutura'],'IC Pista/Acesso'},...
num2str(DG(3)+(r-1)*DG(4),'INSPEÇÃO DO ANO %d'),[1 50]); r=r+1;
end
end
DE=[DE;[m,d]];
else
% 1.3 Registro de ICs de novas inspeções em BD pré-existente
% 1.3.1 Carga de BD
arquivo=inputdlg({'Insira o nome do arquivo:'],'CARGA DE BANCO DE
DADOS',[1 60]); load(arquivo{1});
% 1.3.2 Registro de ICs de novas inspeções rotineiras
n_ins_Ad=inputdlg({'Número de inspeções rotineiras que serão
adicionadas:'],'...
'REGISTRO DE NOVAS INSPEÇÕES',[1 60]);
n_ins_Ad=str2double(n_ins_Ad{1});
DG(2)=DG(2)+n_ins_Ad;
d=cell(DG(1),5*n_ins_Ad);
for i=1:DG(1)
r=1;
while r<=n_ins_Ad
d(i,5*(r-1)+1:5*r)=inputdlg({'IC Laje:'],'IC Vigamento
Principal:'],'...
'IC Mesoestrutura:'],'IC Infraestrutura'],'IC Pista/Acesso'},...
num2str(DG(3)+(DG(2)-n_ins_Ad-1)*DG(4)+r*DG(4),...
[DE{i,1} ' - INSPEÇÃO DO ANO %d']),'[1 60]); r=r+1;
end
end
DE=[DE d];
end
% 1.4 Armazenamento de dados
salvar=menu('Que deseja fazer?'],'Salvar BD e terminar a sessão'],'...
'Salvar BD e continuar com a avaliação das pontes');
if salvar==1
BD=inputdlg({'Insira o nome do arquivo:'],'SALVAR BANCO DE DADOS',[1
50]);
save(BD{1},'DG','DE'); % Arquivo de extensão MAT
else
BD=inputdlg({'Insira o nome do arquivo:'],'SALVAR BASE DE DADOS',[1
50]);
save(BD{1},'DG','DE');

%% 2. RECONDICIONAMENTO E FILTRAGEM DE BANCO DE DADOS
% 2.1 Rearranjo da matriz de dados específicos (DE)
M_IC=cell(DG(1),5*DG(2));

```

```

for i=1:DG(1)
    for j=1:DG(2)
        M_IC{i,j}=str2double(DE{i,10+(j-1)*5});
        M_IC{i,j+DG(2)}=str2double(DE{i,11+(j-1)*5});
        M_IC{i,j+2*DG(2)}=str2double(DE{i,12+(j-1)*5});
        M_IC{i,j+3*DG(2)}=str2double(DE{i,13+(j-1)*5});
        M_IC{i,j+4*DG(2)}=str2double(DE{i,14+(j-1)*5});
    end
end
M=cell(DG(1),5*DG(2)+9);
for i=1:DG(1)
    for j=1:6
        M{i,j}=DE{i,j};
    end
    for k=7:9
        M{i,k}=str2double(DE{i,k});
    end
    for m=10:5*DG(2)+9
        M{i,m}=M_IC{i,m-9};
    end
end
M; cont5=0;cont4=0;cont3=0;cont2=0;cont1=0;
for i=1:DG(1)
    for j=10:9+5*DG(2)
        if M{i,j}==5
            cont5=cont5+1;
        elseif M{i,j}==4
            cont4=cont4+1;
        elseif M{i,j}==3
            cont3=cont3+1;
        elseif M{i,j}==2
            cont2=cont2+1;
        elseif M{i,j}==1
            cont1=cont1+1;
        end
    end
end
Total_Dados=cont5+cont4+cont3+cont2+cont1+DG(1);
% 2.2 Matriz de tempo (em anos) para o conjunto de OAEs
t=zeros(DG(1),DG(2)+1);
for i=1:DG(1)
    for j=1:DG(2)
        t(i,1)=0; t(i,j+1)=DG(3)-M{i,9}+(j-1)*DG(4);
    end
end
% 2.3 Matriz de ICs para cada componente
IC_0(1:DG(1),1)=5;IC_Ltotal=M(1:DG(1),10:9+DG(2));IC_Ltotal=[IC_0,cell2mat(IC_Ltotal)];
IC_Vtotal=M(1:DG(1),(10+DG(2)):(9+2*DG(2)));IC_Vtotal=[IC_0,cell2mat(IC_Vtotal)];
IC_Mtotal=M(1:DG(1),(10+2*DG(2)):(9+3*DG(2)));IC_Mtotal=[IC_0,cell2mat(IC_Mtotal)];
IC_Itotal=M(1:DG(1),(10+3*DG(2)):(9+4*DG(2)));IC_Itotal=[IC_0,cell2mat(IC_Itotal)];
IC_Ptotal=M(1:DG(1),(10+4*DG(2)):(9+5*DG(2)));IC_Ptotal=[IC_0,cell2mat(IC_Ptotal)];
% 2.4 Matriz de ICs para a rede de OAEs
OAE_IC=cell(DG(1),5*DG(2));
for i=1:DG(1)
    for j=1:5*DG(2)
        OAE_IC{i,j}=str2double(DE{i,9+j});
    end
end

```

```

    end
end
OAE_IC=cell2mat(OAE_IC);
IC_OAEs=zeros(DG(1),DG(2));
for i=1:DG(1)
    for j=1:DG(2)
        IC_OAEs(i,j)=min(OAE_IC(i,(1+(j-1)*5):(5+(j-1)*5)),[],'omitnan');
    end
end
IC_OAEs=[IC_0 IC_OAEs];
% 2.5 Gráficos com o Registro de Dados de Condição
figure(1)
for i=1:DG(1)
    subplot(3,2,1); % Lajes
    hold on
    plot(t(i,:),IC_Ltotal(i,:),'.b'); title('Lajes'); xlabel('Idade
(anos)');
    ylabel('I. de Condição'); axis([0 70 1 5]); grid on
    subplot(3,2,2); % Vigamento Principal
    hold on
    plot(t(i,:),IC_Vtotal(i,:),'.r'); title('Vigamento Principal');
    xlabel('Idade (anos)');ylabel('I de Condição');axis([0 70 1 5]);grid on
    subplot(3,2,3); % Mesoestrutura
    hold on
    plot(t(i,:),IC_Mtotal(i,:),'.k'); title('Mesoestrutura');
    xlabel('Idade (anos)');ylabel('I de Condição');axis([0 70 1 5]);grid on
    subplot(3,2,4); % Infraestrutura
    hold on
    plot(t(i,:),IC_Itotal(i,:),'.m'); title('Infraestrutura');
    xlabel('Idade (anos)');ylabel('I de Condição');axis([0 70 1 5]);grid on
    subplot(3,2,5); % Pista/Acessos
    hold on
    plot(t(i,:),IC_Ptotal(i,:),'.g'); title('Pista/Acesso');
    xlabel('Idade (anos)');ylabel('I. de Condição');axis([0 70 1 5]);grid
on
    subplot(3,2,6) % Pontes (Global)
    hold on
    plot(t(i,:),IC_OAEs(i,:),'.r'); title('Pontes (Global)');
    xlabel('Idade (anos)');ylabel('I. de Condição');axis([0 70 1 5]);grid
on
end
%% 3. FILTRAGEM DE DADOS PARA MÉTODO DE PREVISÃO PERCENTUAL
% 3.1 Lajes
n55=0; n54=0; n44=0; n43=0; n33=0; n32=0; n22=0;
for i=1:DG(1)
    for j=2:DG(2)
        if IC_Ltotal(i,j)<IC_Ltotal(i,j+1) || (abs(IC_Ltotal(i,j)-
IC_Ltotal(i,j+1))>=2) ...
            || isnan(IC_Ltotal(i,j)) || isnan(IC_Ltotal(i,j+1))
            continue
        elseif IC_Ltotal(i,j)==5 && IC_Ltotal(i,j+1)==5
            n55=n55+1;
        elseif IC_Ltotal(i,j)==5 && IC_Ltotal(i,j+1)==4
            n54=n54+1;
        elseif IC_Ltotal(i,j)==4 && IC_Ltotal(i,j+1)==4
            n44=n44+1;
        elseif IC_Ltotal(i,j)==4 && IC_Ltotal(i,j+1)==3
            n43=n43+1;
        elseif IC_Ltotal(i,j)==3 && IC_Ltotal(i,j+1)==3
            n33=n33+1;
        elseif IC_Ltotal(i,j)==3 && IC_Ltotal(i,j+1)==2

```

```

        n32=n32+1;
    elseif IC_Ltotal(i,j)==2 && IC_Ltotal(i,j+1)==2
        n22=n22+1;
    end
end
end
Nij_laje=zeros(4,4); Nij_laje(1,1)=n55; Nij_laje(1,2)=n54;
Nij_laje(2,2)=n44;
Nij_laje(2,3)=n43; Nij_laje(3,3)=n33; Nij_laje(3,4)=n32; Nij_laje(4,4)=1;
SumaNij_laje=sum(Nij_laje,2);
% 3.2 Vigamento principal
n55=0; n54=0; n44=0; n43=0; n33=0; n32=0; n22=0;
for i=1:DG(1)
    for j=2:DG(2)
        if IC_Vtotal(i,j)<IC_Vtotal(i,j+1) || (abs(IC_Vtotal(i,j)-
IC_Vtotal(i,j+1)))>=2) ...
            || isnan(IC_Vtotal(i,j)) || isnan(IC_Vtotal(i,j+1))
            continue
        elseif IC_Vtotal(i,j)==5 && IC_Vtotal(i,j+1)==5
            n55=n55+1;
        elseif IC_Vtotal(i,j)==5 && IC_Vtotal(i,j+1)==4
            n54=n54+1;
        elseif IC_Vtotal(i,j)==4 && IC_Vtotal(i,j+1)==4
            n44=n44+1;
        elseif IC_Vtotal(i,j)==4 && IC_Vtotal(i,j+1)==3
            n43=n43+1;
        elseif IC_Vtotal(i,j)==3 && IC_Vtotal(i,j+1)==3
            n33=n33+1;
        elseif IC_Vtotal(i,j)==3 && IC_Vtotal(i,j+1)==2
            n32=n32+1;
        elseif IC_Vtotal(i,j)==2 && IC_Vtotal(i,j+1)==2
            n22=n22+1;
        end
    end
end
Nij_vig=zeros(4,4); Nij_vig(1,1)=n55; Nij_vig(1,2)=n54; Nij_vig(2,2)=n44;
Nij_vig(2,3)=n43; Nij_vig(3,3)=n33; Nij_vig(3,4)=n32; Nij_vig(4,4)=1;
SumaNij_vig=sum(Nij_vig,2);
% 3.3 Mesoestrutura
n55=0; n54=0; n44=0; n43=0; n33=0; n32=0; n22=0;
for i=1:DG(1)
    for j=2:DG(2)
        if IC_Mtotal(i,j)<IC_Mtotal(i,j+1) || (abs(IC_Mtotal(i,j)-
IC_Mtotal(i,j+1)))>=2) ...
            || isnan(IC_Mtotal(i,j)) || isnan(IC_Mtotal(i,j+1))
            continue
        elseif IC_Mtotal(i,j)==5 && IC_Mtotal(i,j+1)==5
            n55=n55+1;
        elseif IC_Mtotal(i,j)==5 && IC_Mtotal(i,j+1)==4
            n54=n54+1;
        elseif IC_Mtotal(i,j)==4 && IC_Mtotal(i,j+1)==4
            n44=n44+1;
        elseif IC_Mtotal(i,j)==4 && IC_Mtotal(i,j+1)==3
            n43=n43+1;
        elseif IC_Mtotal(i,j)==3 && IC_Mtotal(i,j+1)==3
            n33=n33+1;
        elseif IC_Mtotal(i,j)==3 && IC_Mtotal(i,j+1)==2
            n32=n32+1;
        elseif IC_Mtotal(i,j)==2 && IC_Mtotal(i,j+1)==2
            n22=n22+1;
        end
    end
end

```

```

    end
end
Nij_meso=zeros(4,4); Nij_meso(1,1)=n55; Nij_meso(1,2)=n54;
Nij_meso(2,2)=n44;
Nij_meso(2,3)=n43; Nij_meso(3,3)=n33; Nij_meso(3,4)=n32; Nij_meso(4,4)=1;
SumaNij_meso=sum(Nij_meso,2);
% 3.4 Infraestrutura
n55=0; n54=0; n44=0; n43=0; n33=0; n32=0; n22=0;
for i=1:DG(1)
    for j=2:DG(2)
        if IC_Itotal(i,j)<IC_Itotal(i,j+1) || (abs(IC_Itotal(i,j)-
IC_Itotal(i,j+1))>=2) ...
            || isnan(IC_Itotal(i,j)) || isnan(IC_Itotal(i,j+1))
                continue
            elseif IC_Itotal(i,j)==5 && IC_Itotal(i,j+1)==5
                n55=n55+1;
            elseif IC_Itotal(i,j)==5 && IC_Itotal(i,j+1)==4
                n54=n54+1;
            elseif IC_Itotal(i,j)==4 && IC_Itotal(i,j+1)==4
                n44=n44+1;
            elseif IC_Itotal(i,j)==4 && IC_Itotal(i,j+1)==3
                n43=n43+1;
            elseif IC_Itotal(i,j)==3 && IC_Itotal(i,j+1)==3
                n33=n33+1;
            elseif IC_Itotal(i,j)==3 && IC_Itotal(i,j+1)==2
                n32=n32+1;
            elseif IC_Itotal(i,j)==2 && IC_Itotal(i,j+1)==2
                n22=n22+1;
            end
        end
    end
end
Nij_infra=zeros(4,4); Nij_infra(1,1)=n55; Nij_infra(1,2)=n54;
Nij_infra(2,2)=n44;
Nij_infra(2,3)=n43; Nij_infra(3,3)=n33; Nij_infra(3,4)=n32;
Nij_infra(4,4)=1;
SumaNij_infra=sum(Nij_infra,2);
% 3.5 Pista/Acesso
n55=0; n54=0; n44=0; n43=0; n33=0; n32=0; n22=0;
for i=1:DG(1)
    for j=2:DG(2)
        if IC_Ptotal(i,j)<IC_Ptotal(i,j+1) || (abs(IC_Ptotal(i,j)-
IC_Ptotal(i,j+1))>=2) ...
            || isnan(IC_Ptotal(i,j)) || isnan(IC_Ptotal(i,j+1))
                continue
            elseif IC_Ptotal(i,j)==5 && IC_Ptotal(i,j+1)==5
                n55=n55+1;
            elseif IC_Ptotal(i,j)==5 && IC_Ptotal(i,j+1)==4
                n54=n54+1;
            elseif IC_Ptotal(i,j)==4 && IC_Ptotal(i,j+1)==4
                n44=n44+1;
            elseif IC_Ptotal(i,j)==4 && IC_Ptotal(i,j+1)==3
                n43=n43+1;
            elseif IC_Ptotal(i,j)==3 && IC_Ptotal(i,j+1)==3
                n33=n33+1;
            elseif IC_Ptotal(i,j)==3 && IC_Ptotal(i,j+1)==2
                n32=n32+1;
            elseif IC_Ptotal(i,j)==2 && IC_Ptotal(i,j+1)==2
                n22=n22+1;
            end
        end
    end
end
end

```

```

Nij_pista=zeros(4,4); Nij_pista(1,1)=n55; Nij_pista(1,2)=n54;
Nij_pista(2,2)=n44;
Nij_pista(2,3)=n43; Nij_pista(3,3)=n33; Nij_pista(3,4)=n32;
Nij_pista(4,4)=1;
SumaNij_pista=sum(Nij_pista,2);
% 3.6 Pontes (Global)
n55=0; n54=0; n44=0; n43=0; n33=0; n32=0; n22=0;
for i=1:DG(1)
    for j=2:DG(2)
        if IC_OAEs(i,j)<IC_OAEs(i,j+1) || (abs(IC_OAEs(i,j)-
IC_OAEs(i,j+1)))>=2) ...
            || isnan(IC_OAEs(i,j)) || isnan(IC_OAEs(i,j+1))
                continue
            elseif IC_OAEs(i,j)==5 && IC_OAEs(i,j+1)==5
                n55=n55+1;
            elseif IC_OAEs(i,j)==5 && IC_OAEs(i,j+1)==4
                n54=n54+1;
            elseif IC_OAEs(i,j)==4 && IC_OAEs(i,j+1)==4
                n44=n44+1;
            elseif IC_OAEs(i,j)==4 && IC_OAEs(i,j+1)==3
                n43=n43+1;
            elseif IC_OAEs(i,j)==3 && IC_OAEs(i,j+1)==3
                n33=n33+1;
            elseif IC_OAEs(i,j)==3 && IC_OAEs(i,j+1)==2
                n32=n32+1;
            elseif IC_OAEs(i,j)==2 && IC_OAEs(i,j+1)==2
                n22=n22+1;
            end
        end
    end
end
Nij_OAEs=zeros(4,4); Nij_OAEs(1,1)=n55; Nij_OAEs(1,2)=n54;
Nij_OAEs(2,2)=n44;
Nij_OAEs(2,3)=n43; Nij_OAEs(3,3)=n33; Nij_OAEs(3,4)=n32; Nij_OAEs(4,4)=1;
SumaNij_OAEs=sum(Nij_OAEs,2);
%% 4. MODELAGEM DA DETERIORAÇÃO USANDO CADEIAS DE MARKOV
% 4.1 Determinação da MPT Usando o Método de Previsão Percentual
MPT_laje=zeros(4,4); MPT_vig=zeros(4,4); MPT_meso=zeros(4,4);
MPT_infra=zeros(4,4); MPT_pista=zeros(4,4); MPT_OAEs=zeros(4,4);
for i=1:4
    for j=1:4
        MPT_laje(i,j)=Nij_laje(i,j)/SumaNij_laje(i);
        MPT_vig(i,j)=Nij_vig(i,j)/SumaNij_vig(i);
        MPT_meso(i,j)=Nij_meso(i,j)/SumaNij_meso(i);
        MPT_infra(i,j)=Nij_infra(i,j)/SumaNij_infra(i);
        MPT_pista(i,j)=Nij_pista(i,j)/SumaNij_pista(i);
        MPT_OAEs(i,j)=Nij_OAEs(i,j)/SumaNij_OAEs(i);
    end
end
% 4.2 Probabilidades Transitórias
% 4.2.1 Cálculo Vetores de Estado (P(t)) e condicoes esperadas (E(t))
Po=[1 0 0 0]; R=[5 4 3 2]; t_fp=0:DG(4):90;
Pt_L=zeros(90/DG(4)+1,4); Et_L=zeros(90/DG(4)+1,1);
Pt_V=zeros(round(90/DG(4))+1,4); Et_V=zeros(90/DG(4)+1,1);
Pt_M=zeros(round(90/DG(4))+1,4); Et_M=zeros(90/DG(4)+1,1);
Pt_I=zeros(round(90/DG(4))+1,4); Et_I=zeros(90/DG(4)+1,1);
Pt_P=zeros(round(90/DG(4))+1,4); Et_P=zeros(90/DG(4)+1,1);
Pt_OAE=zeros(round(90/DG(4))+1,4); Et_OAE=zeros(90/DG(4)+1,1);
for i=1:size(Pt_L,1)
    Pt_L(i,:)=Po*MPT_laje^t_fp(i); Et_L(i)=Pt_L(i,:)*R';
    Pt_V(i,:)=Po*MPT_vig^t_fp(i); Et_V(i)=Pt_V(i,:)*R';
    Pt_M(i,:)=Po*MPT_meso^t_fp(i); Et_M(i)=Pt_M(i,:)*R';

```

```

Pt_I(i,:)=Po*MPT_infra^t_fp(i); Et_I(i)=Pt_I(i,:)*R';
Pt_P(i,:)=Po*MPT_pista^t_fp(i); Et_P(i)=Pt_P(i,:)*R';
Pt_OAE(i,:)=Po*MPT_OAEs^t_fp(i); Et_OAE(i)=Pt_OAE(i,:)*R';

end
% 4.2.2 Gráficos
figure(2)
subplot(3,2,1); % Para Lajes
plot(t_fp,Pt_L(:,1),'-',t_fp,Pt_L(:,2),'-',t_fp,Pt_L(:,3),'-',...
      t_fp,Pt_L(:,4),'-'); title('Prob. Transitórias - Lajes');
xlabel('Idade (anos)'); ylabel('Probabilidade');
legend('Estado 1 (IC=5)', 'Estado 2 (IC=4)', 'Estado 3 (IC=3)', 'Estado 4
(IC=2)');
axis([0 90 0 1]); grid on
subplot(3,2,2); % Para Vigamento Principal
plot(t_fp,Pt_V(:,1),'-',t_fp,Pt_V(:,2),'-',t_fp,Pt_V(:,3),'-',...
      t_fp,Pt_V(:,4),'-'); title('Prob. Transitórias - Vig.Principal');
xlabel('Idade (anos)'); ylabel('Probabilidade');
legend('Estado 1 (IC=5)', 'Estado 2 (IC=4)', 'Estado 3 (IC=3)', 'Estado 4
(IC=2)');
axis([0 90 0 1]); grid on
subplot(3,2,3); % Para Mesoestrutura
plot(t_fp,Pt_M(:,1),'-',t_fp,Pt_M(:,2),'-',t_fp,Pt_M(:,3),'-',...
      t_fp,Pt_M(:,4),'-'); title('Prob. Transitórias - Mesoestrutura');
xlabel('Idade (anos)'); ylabel('Probabilidade');
legend('Estado 1 (IC=5)', 'Estado 2 (IC=4)', 'Estado 3 (IC=3)', 'Estado 4
(IC=2)');
axis([0 90 0 1]); grid on
subplot(3,2,4); % Para Infraestrutura
plot(t_fp,Pt_I(:,1),'-',t_fp,Pt_I(:,2),'-',t_fp,Pt_I(:,3),'-',...
      t_fp,Pt_I(:,4),'-'); title('Prob. Transitórias - Infraestrutura');
xlabel('Idade (anos)'); ylabel('Probabilidade');
legend('Estado 1 (IC=5)', 'Estado 2 (IC=4)', 'Estado 3 (IC=3)', 'Estado 4
(IC=2)');
axis([0 90 0 1]); grid on
subplot(3,2,5); % Para Pistas/Acessos
plot(t_fp,Pt_P(:,1),'-',t_fp,Pt_P(:,2),'-',t_fp,Pt_P(:,3),'-',...
      t_fp,Pt_P(:,4),'-'); title('Prob. Transitórias - Pista/Acessos');
xlabel('Idade (anos)'); ylabel('Probabilidade');
legend('Estado 1 (IC=5)', 'Estado 2 (IC=4)', 'Estado 3 (IC=3)', 'Estado 4
(IC=2)');
axis([0 90 0 1]); grid on
subplot(3,2,6); % Pontes (Global)
plot(t_fp,Pt_OAE(:,1),'-',t_fp,Pt_OAE(:,2),'-',t_fp,Pt_OAE(:,3),'-',...
      t_fp,Pt_OAE(:,4),'-'); title('Prob. Transitórias - Pontes (Global)');
xlabel('Idade (anos)'); ylabel('Probabilidade');
legend('Estado 1 (IC=5)', 'Estado 2 (IC=4)', 'Estado 3 (IC=3)', 'Estado 4
(IC=2)');
axis([0 90 0 1]); grid on
% 4.3 Curvas de Deterioração
figure(3)
subplot(3,2,1); % Lajes
plot(t_fp,Et_L,'-b'); title('Curva de Deterioração - Lajes');
xlabel('Idade (anos)'); ylabel('Índice de Condição');axis([0 90 1 5]);grid
on
% legend('Estado 1 (IC=5)', 'Estado 2 (IC=4)', 'Estado 3 (IC=3)', 'Estado 4
(IC=2)');
% axis([0 90 0 1]); grid on
subplot(3,2,2); % Para Vigamento Principal
plot(t_fp,Et_V,'-r'); title('Curva de Deterioração - Vig.Principal');
xlabel('Idade (anos)'); ylabel('Índice de Condição');axis([0 90 1 5]);grid
on

```

```

subplot(3,2,3); % Para Mesoestrutura
plot(t_fp,Et_M,'-k'); title('Curva de Deterioração - Mesoestrutura');
xlabel('Idade (anos)'); ylabel('Índice de Condição');axis([0 90 1 5]);grid
on
subplot(3,2,4); % Para Infraestrutura
plot(t_fp,Et_I,'-k'); title('Curva de Deterioração - Infraestrutura');
xlabel('Idade (anos)'); ylabel('Índice de Condição');axis([0 90 1 5]);grid
on
subplot(3,2,5); % Para Pista/Acessos
plot(t_fp,Et_P,'-g'); title('Curva de Deterioração - Pista/Acessos');
xlabel('Idade (anos)'); ylabel('Índice de Condição');axis([0 90 1 5]);grid
on
subplot(3,2,6); % Global
plot(t_fp,Et_OAE,'-m'); title('Curva de Deterioração - Pontes (Global)');
xlabel('Idade (anos)'); ylabel('Índice de Condição');axis([0 90 1 5]);grid
on
figure(4)% Curvas de deterioração de todas as componentes
hold on
plot(t_fp,Et_L,'-'); plot(t_fp,Et_V,'-'); plot(t_fp,Et_M,'-');
plot(t_fp,Et_I,'-'); plot(t_fp,Et_P,'-'); plot(t_fp,Et_OAE,'-');
title('Deterioração dos Componentes das OAEs'); xlabel('Idade (anos)');
ylabel('Índice de Condição');
legend('Lajes', 'Vig.Principal', 'Mesoestrutura',...
      'Infraestrutura', 'Pista/Acessos', 'Pontes (Global)'),axis([0 90 1
5]);grid on
% 4.4 Previsão do estado de condição das OAEs para um horizonte de 5 anos
PD_L=zeros(DG(1),4); PD_V=zeros(DG(1),4); PD_M=zeros(DG(1),4);
PD_I=zeros(DG(1),4); PD_P=zeros(DG(1),4); PD_OAE=zeros(DG(1),4);
Po_L=zeros(DG(1),4); Po_V=zeros(DG(1),4); Po_M=zeros(DG(1),4);
Po_I=zeros(DG(1),4); Po_P=zeros(DG(1),4); Po_Global=zeros(DG(1),4);
for i=1:DG(1) % Lajes
    if IC_Ltotal(i,DG(2)+1)==5
        Po_L(i,:)= [1 0 0 0];
    elseif IC_Ltotal(i,DG(2)+1)==4
        Po_L(i,:)= [0 1 0 0];
    elseif IC_Ltotal(i,DG(2)+1)==3
        Po_L(i,:)= [0 0 1 0];
    elseif IC_Ltotal(i,DG(2)+1)==2
        Po_L(i,:)= [0 0 0 1];
    end
end
for i=1:DG(1) % Vig. principal
    if IC_Vtotal(i,DG(2)+1)==5
        Po_V(i,:)= [1 0 0 0];
    elseif IC_Vtotal(i,DG(2)+1)==4
        Po_V(i,:)= [0 1 0 0];
    elseif IC_Vtotal(i,DG(2)+1)==3
        Po_V(i,:)= [0 0 1 0];
    elseif IC_Vtotal(i,DG(2)+1)==2
        Po_V(i,:)= [0 0 0 1];
    end
end
for i=1:DG(1) % Mesoestrutura
    if IC_Mtotal(i,DG(2)+1)==5
        Po_M(i,:)= [1 0 0 0];
    elseif IC_Mtotal(i,DG(2)+1)==4
        Po_M(i,:)= [0 1 0 0];
    elseif IC_Mtotal(i,DG(2)+1)==3
        Po_M(i,:)= [0 0 1 0];
    elseif IC_Mtotal(i,DG(2)+1)==2
        Po_M(i,:)= [0 0 0 1];
    end
end

```

```

    end
end
for i=1:DG(1)    % Infraestrutura
    if IC_Itotal(i,DG(2)+1)==5
        Po_I(i,:)= [1 0 0 0];
    elseif IC_Itotal(i,DG(2)+1)==4
        Po_I(i,:)= [0 1 0 0];
    elseif IC_Itotal(i,DG(2)+1)==3
        Po_I(i,:)= [0 0 1 0];
    elseif IC_Itotal(i,DG(2)+1)==2
        Po_I(i,:)= [0 0 0 1];
    end
end
for i=1:DG(1)    % Pista/Acessos
    if IC_Ptotal(i,DG(2)+1)==5
        Po_P(i,:)= [1 0 0 0];
    elseif IC_Ptotal(i,DG(2)+1)==4
        Po_P(i,:)= [0 1 0 0];
    elseif IC_Ptotal(i,DG(2)+1)==3
        Po_P(i,:)= [0 0 1 0];
    elseif IC_Ptotal(i,DG(2)+1)==2
        Po_P(i,:)= [0 0 0 1];
    end
end
for i=1:DG(1)    % Global
    if IC_OAEs(i,DG(2)+1)==5
        Po_Global(i,:)= [1 0 0 0];
    elseif IC_OAEs(i,DG(2)+1)==4
        Po_Global(i,:)= [0 1 0 0];
    elseif IC_OAEs(i,DG(2)+1)==3
        Po_Global(i,:)= [0 0 1 0];
    elseif IC_OAEs(i,DG(2)+1)==2
        Po_Global(i,:)= [0 0 0 1];
    end
end
for i=1:DG(1)
    PD_L(i,1)=IC_Ltotal(i,DG(2)+1);
    PD_L(i,2)=Po_L(i,:)*MPT_laje*R';
    PD_L(i,3)=Po_L(i,:)*(MPT_laje^3)*R';
    PD_L(i,4)=Po_L(i,:)*(MPT_laje^5)*R';
    PD_V(i,1)=IC_Vtotal(i,DG(2)+1);
    PD_V(i,2)=Po_V(i,:)*MPT_vig*R';
    PD_V(i,3)=Po_V(i,:)*(MPT_vig^3)*R';
    PD_V(i,4)=Po_V(i,:)*(MPT_vig^5)*R';
    PD_M(i,1)=IC_Mtotal(i,DG(2)+1);
    PD_M(i,2)=Po_M(i,:)*MPT_meso*R';
    PD_M(i,3)=Po_M(i,:)*(MPT_meso^3)*R';
    PD_M(i,4)=Po_M(i,:)*(MPT_meso^5)*R';
    PD_I(i,1)=IC_Itotal(i,DG(2)+1);
    PD_I(i,2)=Po_I(i,:)*MPT_infra*R';
    PD_I(i,3)=Po_I(i,:)*(MPT_infra^3)*R';
    PD_I(i,4)=Po_I(i,:)*(MPT_infra^5)*R';
    PD_P(i,1)=IC_Ptotal(i,DG(2)+1);
    PD_P(i,2)=Po_P(i,:)*MPT_pista*R';
    PD_P(i,3)=Po_P(i,:)*(MPT_pista^3)*R';
    PD_P(i,4)=Po_P(i,:)*(MPT_pista^5)*R';
    PD_OAE(i,1)=IC_OAEs(i,DG(2)+1);
    PD_OAE(i,2)=Po_Global(i,:)*MPT_OAEs*R';
    PD_OAE(i,3)=Po_Global(i,:)*(MPT_OAEs^3)*R';
    PD_OAE(i,4)=Po_Global(i,:)*(MPT_OAEs^5)*R';
end
end

```

```

%% 5 Modelagem Determinística por Regressão Não Linear
% 5.1 Filtragem de dados para análise por regressão não linear
% 5.1.1 Laje
M_laje=M; k=0;
for i=1:DG(1)
    for j=10:(8+DG(2))
        if ((DG(3)-M{i,9})>=30 && M{i,j}==5) || isnan(M{i,j}) || ...
            isnan(M{i,j+1}) || M{i,j}<M{i,j+1} || abs(M{i,j}-M{i,j+1})>1
            k=k+1; a(k)=i;
        end
    end
end
if k~=0 % Permite manter a matriz M no caso não tenham dados para filtrar
    M_laje(a,:)=[];
end
% 5.1.2 Vigamento Principal
M_vig=M; k=0;
for i=1:DG(1)
    for j=(10+DG(2)):(8+2*DG(2))
        if ((DG(3)-M{i,9})>=30 && M{i,j}==5) || isnan(M{i,j}) || ...
            isnan(M{i,j+1}) || M{i,j}<M{i,j+1} || abs(M{i,j}-M{i,j+1})>1
            k=k+1; b(k)=i;
        end
    end
end
if k~=0
    M_vig(b,:)=[];
end
% 5.1.3 Mesoestrutura
M_meso=M; k=0;
for i=1:DG(1)
    for j=(10+2*DG(2)):(8+3*DG(2))
        if ((DG(3)-M{i,9})>=30 && M{i,j}==5) || isnan(M{i,j}) || ...
            isnan(M{i,j+1}) || M{i,j}<M{i,j+1} || abs(M{i,j}-M{i,j+1})>1
            k=k+1; c(k)=i;
        end
    end
end
if k~=0
    M_meso(c,:)=[]
end
% 5.1.4 Infraestrutura
M_infra=M; k=0;
for i=1:DG(1)
    for j=(10+3*DG(2)):(8+4*DG(2))
        if ((DG(3)-M{i,9})>=30 && M{i,j}==5) || isnan(M{i,j}) || ...
            isnan(M{i,j+1}) || M{i,j}<M{i,j+1} || abs(M{i,j}-M{i,j+1})>1
            k=k+1; e(k)=i;
        end
    end
end
if k~=0
    M_infra(e,:)=[]
end
% 5.1.5 Pista/Acesso
M_pista=M; k=0;
for i=1:DG(1)
    for j=(10+4*DG(2)):(8+5*DG(2))
        if ((DG(3)-M{i,9})>=30 && M{i,j}==5) || isnan(M{i,j}) || ...
            isnan(M{i,j+1}) || M{i,j}<M{i,j+1} || abs(M{i,j}-M{i,j+1})>1
            k=k+1; f(k)=i;
        end
    end
end

```

```

        end
    end
end
if k~=0
    M_pista(f,:)=[]
end
% 5.2 Matriz de tempo para as OAEs filtradas
% 5.2.1 Para as Lajes
    t_laje=t;
    if size(M_laje,1)~=size(M,1)
        t_laje(a,:)=[];
    end
% 5.2.2 Para o Vigamento Principal
    t_vig=t;
    if size(M_vig,1)~=size(M,1)
        t_vig(b,:)=[];
    end
% 5.2.3 Para a Mesoestrutura
    t_meso=t;
    if size(M_meso,1)~=size(M,1)
        t_meso(c,:)=[];
    end
% 5.2.4 Para a Infraestrutura
    t_infra=t;
    if size(M_infra,1)~=size(M,1)
        t_infra(e,:)=[];
    end
% 5.2.5 Para a Pista/Acesso
    t_pista=t;
    if size(M_pista,1)~=size(M,1)
        t_pista(f,:)=[];
    end
% 5.3 Matrizes com os ICs para as OAEs filtradas
% 5.3.1 Para as Lajes
IC_l(1:size(M_laje,1),1)=5; IC_Lr=M_laje(1:size(M_laje,1),10:9+DG(2));
IC_Lr=[IC_l,cell2mat(IC_Lr)];
% 5.3.2 Vigamento Principal
IC_v(1:size(M_vig,1),1)=5;IC_Vr=M_vig(1:size(M_vig,1),10+DG(2):9+2*DG(2));
IC_Vr=[IC_v,cell2mat(IC_Vr)];
% 5.3.3 Mesoestrutura
IC_m(1:size(M_meso,1),1)=5;IC_Mr=M_meso(1:size(M_meso,1),10+2*DG(2):9+3*DG(2));
IC_Mr=[IC_m,cell2mat(IC_Mr)];
% 5.3.4 Infraestrutura
IC_i(1:size(M_infra,1),1)=5;IC_Ir=M_infra(1:size(M_infra,1),10+3*DG(2):9+4*DG(2));
IC_Ir=[IC_i,cell2mat(IC_Ir)];
% 5.3.5 Pista/Acesso
IC_p(1:size(M_pista,1),1)=5;IC_Pr=M_pista(1:size(M_pista,1),10+4*DG(2):9+5*DG(2));
IC_Pr=[IC_p,cell2mat(IC_Pr)];
% 5.4 Gráficos com os ICs das Inspeções (Para Método de Regressão):
figure(5)
subplot(3,2,1);
for i=1:size(IC_Lr,1)
    hold on
    plot(t_laje(i,:),IC_Lr(i,:),'.b'); title('Lajes'); xlabel('Idade (anos)');
    ylabel('I. de Condição'); axis([0 70 1 5]); grid on
end
subplot(3,2,2);

```

```

for i=1:size(IC_Vr,1)
    hold on
    plot(t_vig(i,:),IC_Vr(i,:),'.r'); title('Vigamento Principal');
    xlabel('Idade (anos)'); ylabel('I. de Condição'); axis([0 70 1 5]);grid
on
end
subplot(3,2,3);
for i=1:size(IC_Mr,1)
    hold on
    plot(t_meso(i,:),IC_Mr(i,:),'.k'); title('Mesoestrutura');
    xlabel('Idade (anos)');ylabel('I. de Condição');axis([0 70 1 5]);grid
on
end
subplot(3,2,4);
for i=1:size(IC_Ir,1)
    hold on
    plot(t_infra(i,:),IC_Ir(i,:),'.m'); title('Infraestrutura');
    xlabel('Idade (anos)');ylabel('I. de Condição');axis([0 70 1 5]);grid
on
end
subplot(3,2,5);
for i=1:size(IC_Pr,1)
    hold on
    plot(t_pista(i,:),IC_Pr(i,:),'.g'); title('Pista/Acesso');
    xlabel('Idade (anos)');ylabel('I. de Condição');axis([0 70 1 5]);grid
on
end
% 5.5 Curvas de Regressão por Componente
% Lajes
poli_laje=zeros(size(IC_Lr,1),4); % Matriz zerada com os coeficientes (a,
b, c) das curvas de ajuste para cada laje de ponte
t_fit=0:90;
figure(6)
subplot(3,2,1);
for i=1:size(IC_Lr,1)
    hold on
    poli_laje(i,:)=polyfit(t_laje(i,:),IC_Lr(i,:),3);
    polival=polyval(poli_laje(i,:),t_fit);
    plot(t_fit,polival,'b');
    title('Lajes - Ajuste de Regressão (Pol. grau 3)');
    xlabel('Idade (anos)');
    ylabel('Índice de Condição');
    axis([0 90 1 5]);
    grid on
end
poli_vig=zeros(size(IC_Vr,1),4); % Vigamento principal
subplot(3,2,2);
for i=1:size(IC_Vr,1)
    hold on
    poli_vig(i,:)=polyfit(t_vig(i,:),IC_Vr(i,:),3);
    polival=polyval(poli_vig(i,:),t_fit);
    plot(t_fit,polival,'r');
    title('Vigamento Princ. - Ajuste de Regressão (Pol. grau 3)');
    xlabel('Idade (anos)');
    ylabel('Índice de Condição');
    axis([0 60 1 5]);
    grid on
end
subplot(3,2,3); % Mesoestrutura
poli_meso=zeros(size(IC_Mr,1),4);
for i=1:size(IC_Mr,1)

```

```

hold on
poli_meso(i,:)=polyfit(t_meso(i,:),IC_Mr(i,:),3);
polival=polyval(poli_meso(i,:),t_fit);
plot(t_fit,polival,'k');
title('Mesoestrutura - Ajuste de Regressão (Pol. grau 3)');
xlabel('Idade (anos)');
ylabel('Índice de Condição');
axis([0 65 1 5]);
grid on
end
subplot(3,2,4); % Infraestrutura
poli_infra=zeros(size(IC_Ir,1),4);
for i=1:size(IC_Ir,1)
hold on
poli_infra(i,:)=polyfit(t_infra(i,:),IC_Ir(i,:),3);
polival=polyval(poli_infra(i,:),t_fit);
plot(t_fit,polival,'m');
title('Infraestrutura - Ajuste de Regressão (Pol. grau 3)');
xlabel('Idade (anos)');
ylabel('Índice de Condição');
axis([0 65 1 5]);
grid on
end

subplot(3,2,5); % Pista/Acesso
poli_pista=zeros(size(IC_Pr,1),4);
for i=1:size(IC_Pr,1)
hold on
poli_pista(i,:)=polyfit(t_pista(i,:),IC_Pr(i,:),3);
polival=polyval(poli_pista(i,:),t_fit);
plot(t_fit,polival,'g');
title('Pista/Acesso - Ajuste de Regressão (Pol. grau 3)');
xlabel('Idade (anos)');
ylabel('Índice de Condição');
axis([0 65 1 5]);
grid on
end
end

```

APÊNDICE E

MATRIZES DE PROBABILIDADES DE TRANSIÇÃO PARA OS COMPONENTES DE
PONTES DO ESTUDO DE CASO

$$MPT_{laje} = \begin{bmatrix} 0,933 & 0,067 & 0 & 0 \\ 0 & 0,932 & 0,068 & 0 \\ 0 & 0 & 0,974 & 0,026 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$MPT_{vig} = \begin{bmatrix} 0,917 & 0,083 & 0 & 0 \\ 0 & 0,930 & 0,070 & 0 \\ 0 & 0 & 0,938 & 0,063 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

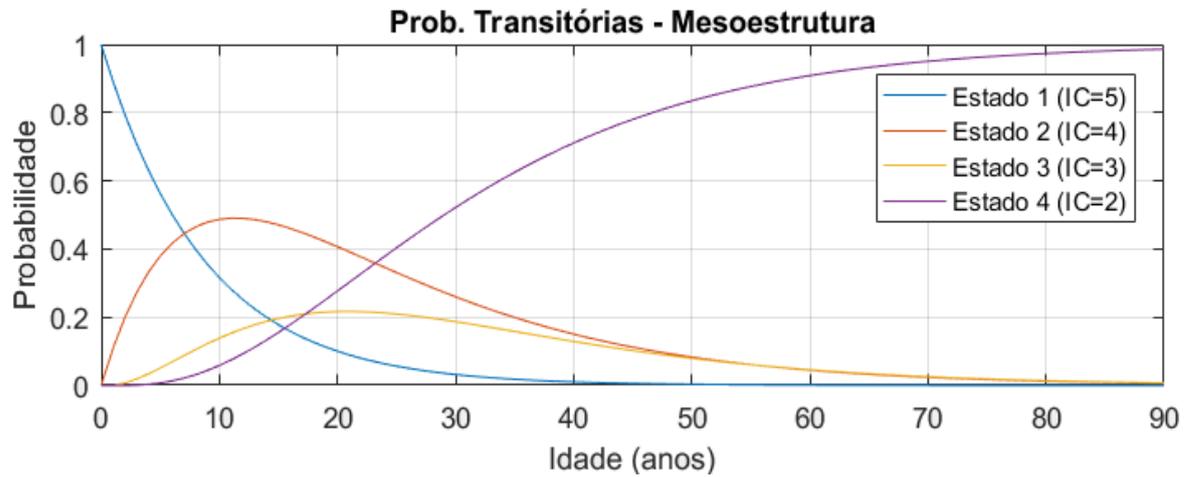
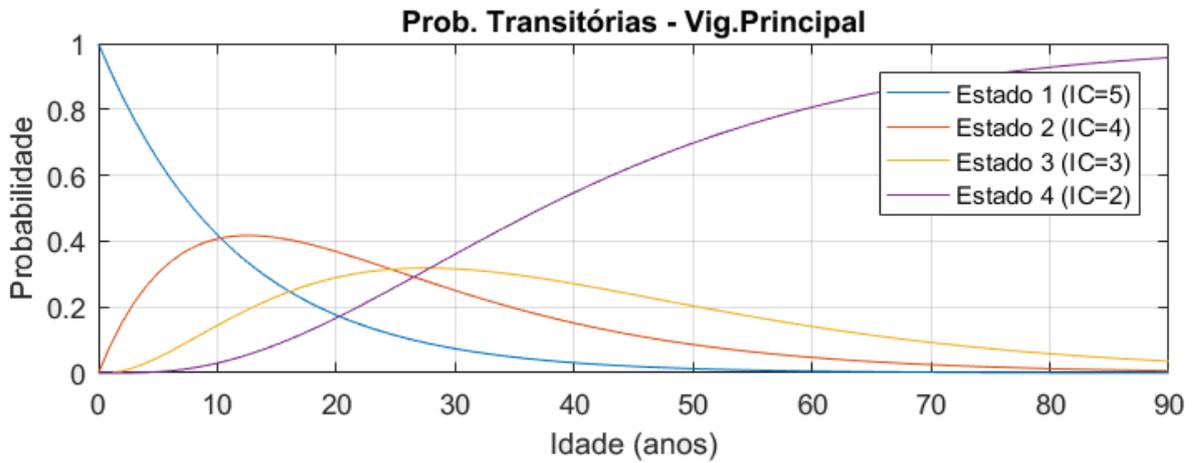
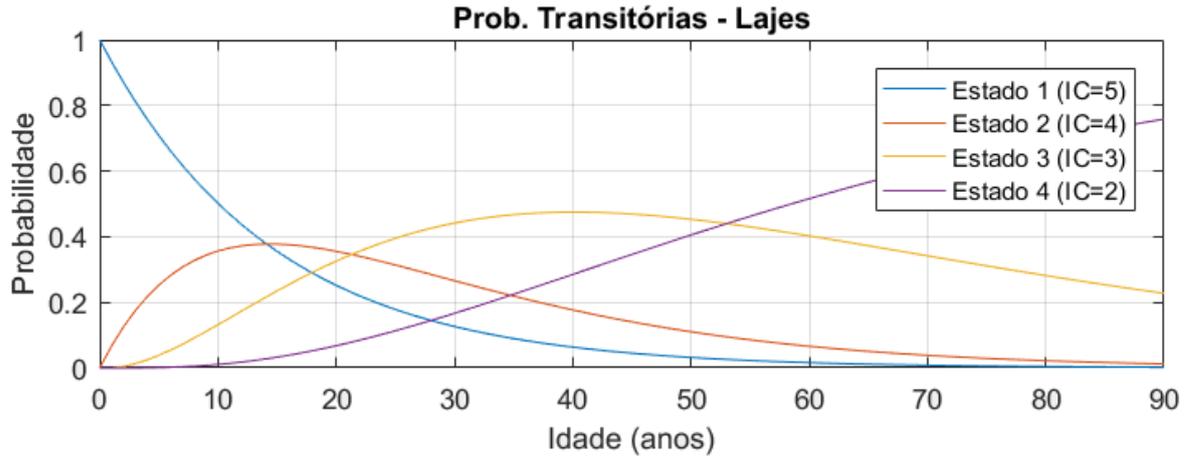
$$MPT_{meso} = \begin{bmatrix} 0,891 & 0,109 & 0 & 0 \\ 0 & 0,937 & 0,064 & 0 \\ 0 & 0 & 0,882 & 0,118 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

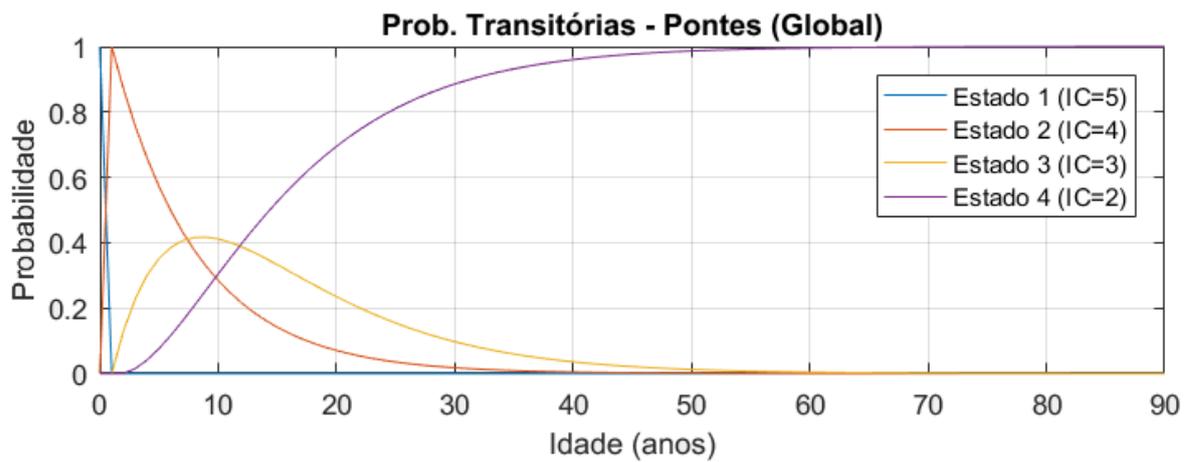
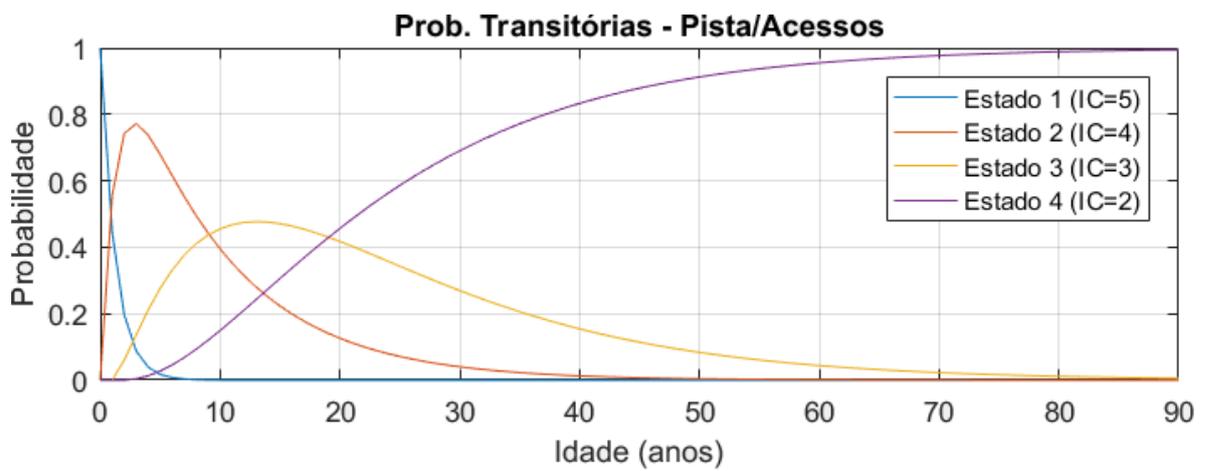
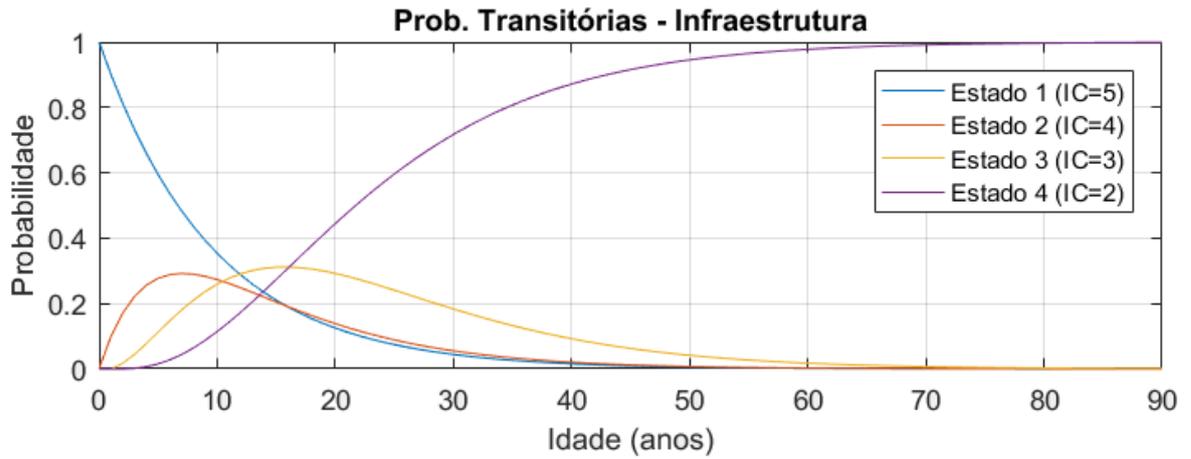
$$MPT_{infra} = \begin{bmatrix} 0,901 & 0,099 & 0 & 0 \\ 0 & 0,829 & 0,171 & 0 \\ 0 & 0 & 0,889 & 0,111 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$MPT_{pista} = \begin{bmatrix} 0,444 & 0,556 & 0 & 0 \\ 0 & 0,892 & 0,108 & 0 \\ 0 & 0 & 0,933 & 0,067 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

APÊNDICE F

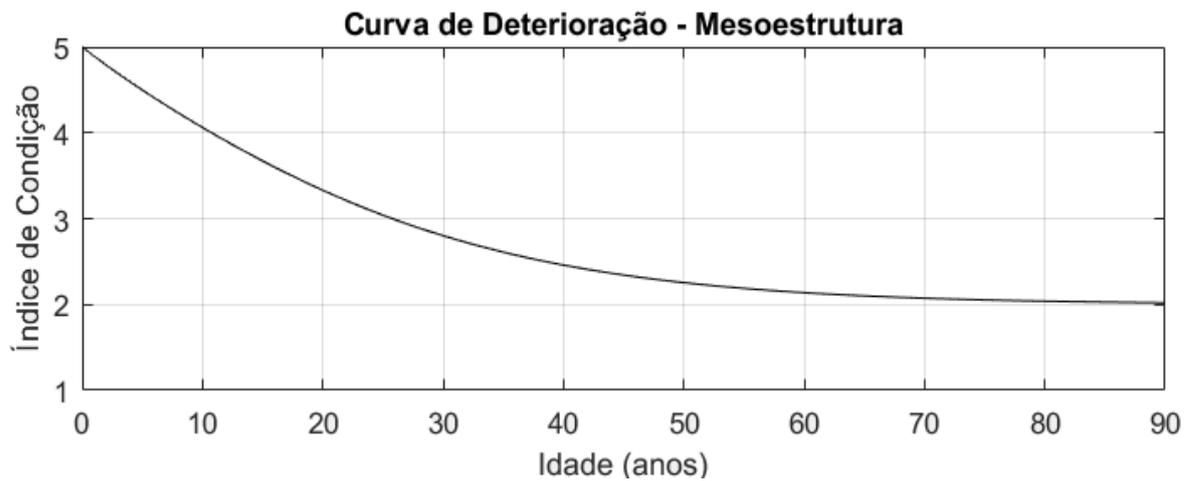
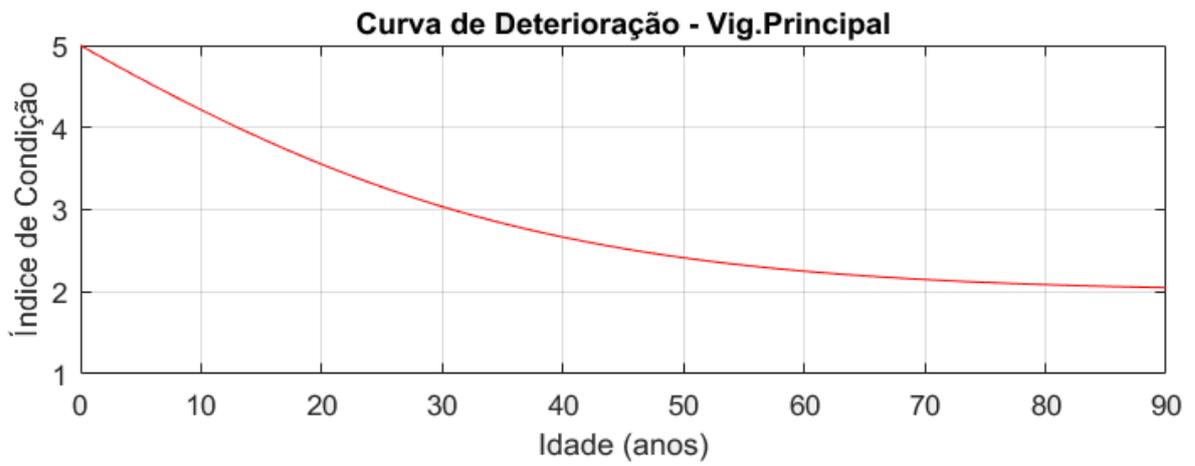
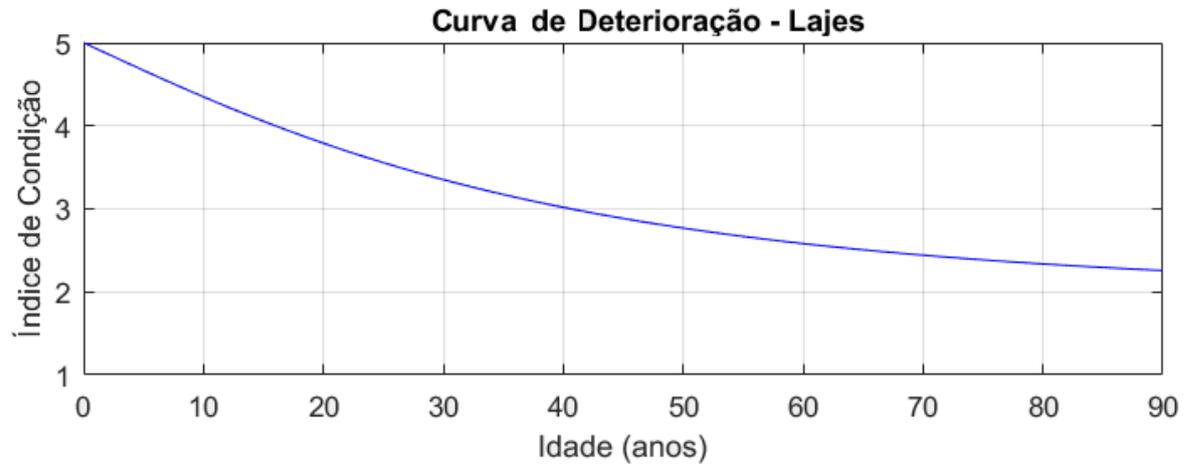
GRÁFICOS DE PROBABILIDADES TRANSITÓRIAS PARA AS PONTES DO
ESTUDO DE CASO

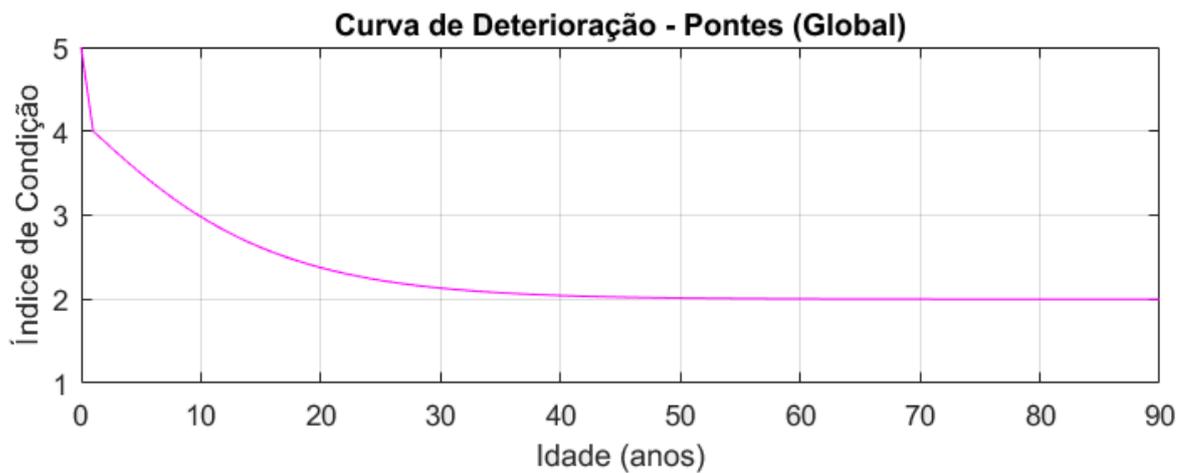
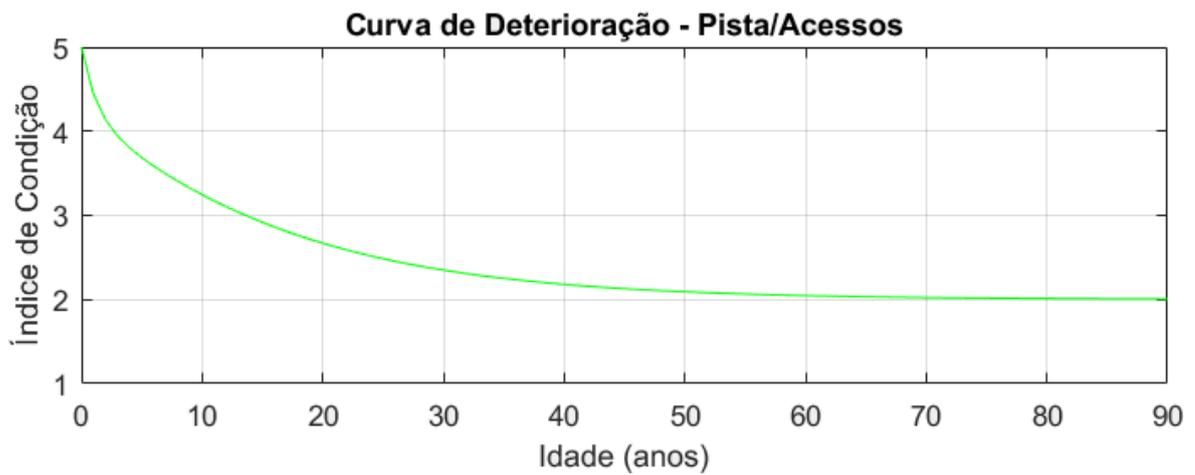
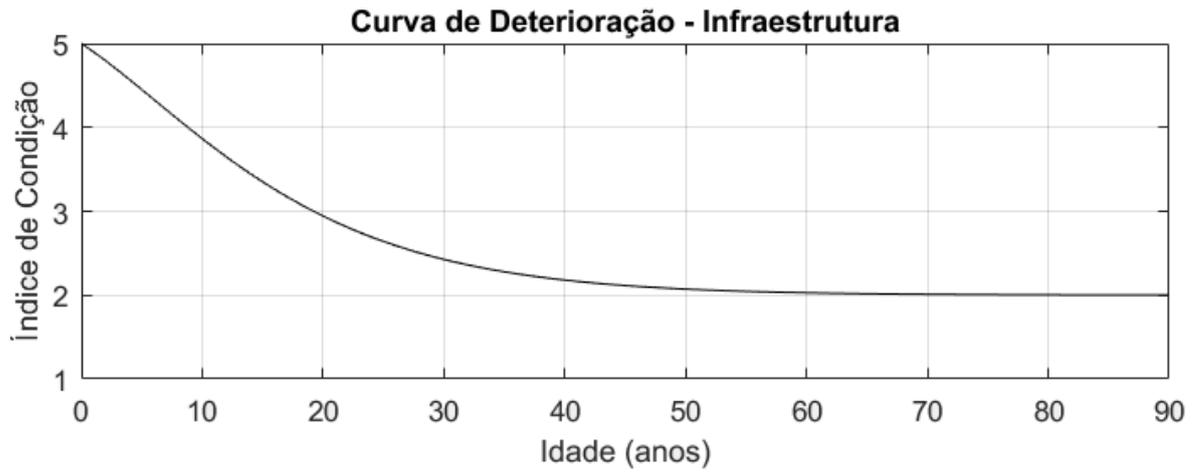




APÊNDICE G

CURVAS DE DETERIORAÇÃO POR COMPONENTE DE PONTE





ANEXO A

FICHA DE INSPEÇÃO CADASTRAL (Fonte: Norma DNIT 010/2004-PRO)

1. DADOS BÁSICOS

IDENTIFICAÇÃO / LOCALIZAÇÃO / JURISDIÇÃO		Data: ____ / ____ / ____
OAE:Código:_____ Nome:_____		
Tipo de Estrutura: Código_____ Nat. Transposição: Código_____ Sist. Construtivo: Código_____		
UNIT:_____ Residência:_____ Rodovia: BR-_____ UF:_____ -		
Trecho (PNV):_____ Localização (km):_____ Cidade Prox:_____		
ADMINISTRAÇÃO		
<input type="checkbox"/> DNIT <input type="checkbox"/> DER <input type="checkbox"/> CONCESSÃO <input type="checkbox"/> OUTROS		
Nome:_____		
(para o caso concessão / outros)		
PROJETO / CONSTRUÇÃO		
Projetista:_____ ; Ano da Construção:_____		
Construtor:_____ ; Arquivo:_____ ; Trem - Tipo Classe:_____		
COMPRIMENTO / LARGURA		
Comprimento:_____ m; Largura:_____ m		

2. DADOS SOBRE CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS

CARACTERÍSTICAS PLANI-ALTIMÉTRICAS		
Região: <input type="checkbox"/> PLANA <input type="checkbox"/> ONDULADA <input type="checkbox"/> MONTANHOSA		Greide: Rampa Máxima(%): _____
Traçado: <input type="checkbox"/> TANGENTE <input type="checkbox"/> CURVO Raio:_____ m		Travessia: <input type="checkbox"/> ORTOGONAL <input type="checkbox"/> ESCONSA
CARACTERÍSTICAS DA PISTA		
Larg.Total da Pista:_____ m	Pavimento: <input type="checkbox"/> Asfalto <input type="checkbox"/> Concreto	Drenos: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO
Nº de Faixas:_____	Passeio:..... <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Pingadeiras: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO
Acostamento: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Guarda-Rodas: <input type="checkbox"/> P.Antigo <input type="checkbox"/> N.Jersey <input type="checkbox"/> Outro	
Larg.Acostamento:_____ m		
GABARITOS		
Para Viaduto: Horizontal_____ m; Vertical_____ m		
Para Ponte s/ Rio Navegável: Horizontal_____ m; Vertical_____ m		
Proteção dos Pilares Contra Choque de Embarcação? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO		
JUNTAS DE DILATAÇÃO		
Número total de juntas:_____		
Tipo de vedação: <input type="checkbox"/> Nenhuma; nos pilares / articulação <input type="checkbox"/> Tipo_____ <input type="checkbox"/> Tipo_____		
TRÁFEGO		
VMD:_____ veículos/dia		
Frequência de Carga Móvel ≥ 36 tf: <input type="checkbox"/> Alta <input type="checkbox"/> Média <input type="checkbox"/> Baixa		
Passagem de Cargas Excepcionais: <input type="checkbox"/> Freqüente <input type="checkbox"/> Esporádica		

3. CARACTERÍSTICA DA ESTRUTURA

MATERIAIS / SEÇÃO / TIPO			Data: ____/____/____
	MATERIAL (CÓDIGO) (VER TABELA 2)	SEÇÃO TIPO (CÓDIGO) (VER TABELA 3)	
LAJES			
VIGAS PRINCIPAIS			
PILARES			
FUNDAÇÕES			

TIPOS DE APARELHOS DE APOIO	
Cód.	Descrição
FR	Freyssinet
NP	Neoprene
TF	Teflon
CH	Placa de Chumbo
RM	Rolo Metálico
AM	Articulação Metálica
PD	Pêndulo
LP	Ligação Pórtico
TE	Tipo Especial
NI	Não Informado

Aparelhos de Apoio

Apoio →														
Tipo →														

Obs.: para tipos de aparelhos de apoio ver tabela acima.

PARTICULARIDADES		
Número de Vãos: _____	Altura da Viga no Apoio (m): _____	Extrem. Inicial: <input type="checkbox"/> ENCONTRO <input type="checkbox"/> BALANÇO
Número de Juntas Gerber _____	Altura da Viga no Vão (m): _____	Extrem. Final: <input type="checkbox"/> ENCONTRO <input type="checkbox"/> BALANÇO
Comprimento do Vão Maior (m): _____	Altura Máxima de Pilar (m): _____	Laje de Aprox.: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO

Comentários: _____

4. OUTROS ASPECTOS

Desnível Max entre Greide e Terreno _____ m Lâmina D'água: Normal _____ m na Cheia _____ m O Meio Ambiente é Agressivo? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO A Seção de Vazão é Adequada? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO Existe Drenagem no interior do caixão? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	As Fundações encontram-se em Solo Mole? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO A vibração da Estrutura é Excessiva? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO O Regime do Rio é Torrencial? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO O Leito do Rio é Erodível? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO Histórico da Manutenção: <input type="checkbox"/> Boa <input type="checkbox"/> Regular <input type="checkbox"/> Ruim
ROTAS ALTERNATIVAS: <input type="checkbox"/> EXISTEM <input type="checkbox"/> NÃO EXISTEM Acréscimo de Distância: _____ km Descrição do Itinerário: _____ _____	
INSPEÇÃO ROTINEIRA (PARÂMETROS): Melhor Época para Vistorias: _____ Periodicidade: <input type="checkbox"/> Normal (2 anos) <input type="checkbox"/> Reduzida (1 ano) <input type="checkbox"/> Dilatada (4 anos) <input type="checkbox"/> Especial (Consultor) <input type="checkbox"/> Especial (L ≥ 200m) <input type="checkbox"/> Especial (Equipamento) <input type="checkbox"/> Parcial Acesso: <input type="checkbox"/> Direto / Binóculo: Vãos _____ <input type="checkbox"/> Equipamento Especial: Vãos _____ Interior de Viga Celular: <input type="checkbox"/> Acessível <input type="checkbox"/> Não Acessível	

Comentários: _____

ANEXO B

FICHA DE INSPEÇÃO ROTINEIRA (Fonte: Norma DNIT 010/2004-PRO)

DAE: Código: _____ Nome: _____ BR - _____ / _____ km: _____ UNIT: _____ RES: _____
 Data: _____ Inspeção: DNIT / Residência: _____ Outra Entidade: _____

COMENTÁRIOS GERAIS

- a) Condições de Estabilidade: Boa Sofrível Precária Condições de Conservação: Boa Regular Sofrível Ruim
 b) Nível de Vibração do Tabuleiro: Normal Intenso Exagerado
 c) Inspeção Especializada (Realizada por Engenheiro de Estruturas). Necessária? SIM NÃO Urgente? SIM NÃO
 Já houve alguma anteriormente? SIM NÃO

NOTA TECNICA

OBSERVAÇÕES ADICIONAIS: _____

1. LAJE	Nota Técnica:	Local	Quantidade (Opcional)
Buraco (abertura)	<input type="checkbox"/> Existe <input type="checkbox"/> É Iminente		
Armadura Exposta	<input type="checkbox"/> Muito Oxidada <input type="checkbox"/> Grande Incidência		
Concreto Desagregado	<input type="checkbox"/> Muita Intensidade <input type="checkbox"/> Grande Incidência		
Fissuras	<input type="checkbox"/> Forte Infiltração <input type="checkbox"/> Grande Incidência		
Marcas de Infiltração	<input type="checkbox"/> Forte <input type="checkbox"/> Grande Incidência		
Aspecto de Concreto	<input type="checkbox"/> Má Qualidade		
Cobrimento	<input type="checkbox"/> Ausente / Pouco		

2. VIGAMENTO PRINCIPAL	Nota Técnica:	Local	Quantidade (Opcional)
Fissuras Finas	<input type="checkbox"/> Algumas <input type="checkbox"/> Grande Incidência		
Trincas (fissuras w>0,3mm)	<input type="checkbox"/> Algumas <input type="checkbox"/> Grande Incidência		
Armadura Principal	<input type="checkbox"/> Exposta <input type="checkbox"/> Muito Oxidada		
Desagreg. de Concreto	<input type="checkbox"/> Muito Intenso <input type="checkbox"/> Grande Incidência		
Dente Gerber	<input type="checkbox"/> Quebrado/Desplacado <input type="checkbox"/> Trincado		
Deformação (Flecha)	<input type="checkbox"/> Exagerada		
Aspectos do Concreto	<input type="checkbox"/> Má Qualidade		
Cobrimento	<input type="checkbox"/> Ausente / Pouco		

