



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CLAYTON JOSÉ GOMES SILVA

**USO DO MÉTODO DOS FATORES E DA ANÁLISE DE SOBREVIVÊNCIA NA
ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DA SUPERESTRUTURA DE PONTES E VIADUTOS
RODOVIÁRIOS**

Recife

2022

CLAYTON JOSÉ GOMES SILVA

**USO DO MÉTODO DOS FATORES E DA ANÁLISE DE SOBREVIVÊNCIA NA
ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DA SUPERESTRUTURA DE PONTES E VIADUTOS
RODOVIÁRIOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro

Recife

2022

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz CRB-4 / 2222

- S586u Silva, Clayton José Gomes.
Uso do método dos fatores e da análise de sobrevivência na estimativa de vida útil da superestrutura de pontes e viadutos rodoviários / Clayton José Gomes Silva. 2022.
215 f: figs., quads., abrev. e siglas.
- Orientador: Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira.
Coorientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2022.
Inclui referências e apêndices.
1. Engenharia civil. 2. Deterioração. 3. Inspeção. 4. Pontes e viadutos. 5. Vida útil. I. Oliveira, Romilde Almeida de (Orientador). II. Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira (Coorientador). III. Título.
- UFPE
- 624 CDD (22. ed.) BCTG / 2022 - 434

CLAYTON JOSÉ GOMES SILVA

**USO DO MÉTODO DOS FATORES E DA ANÁLISE DE SOBREVIVÊNCIA
NA ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DA SUPERESTRUTURA DE PONTES
E VIADUTOS RODOVIÁRIOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas.

Aprovada em 29/09/2022

Orientador: Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira – UFPE

Coorientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro - UFPE

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência

Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof. Dr. José Afonso Pereira Vitório (examinador externo)
Universidade de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof.^a Dr.^a Eliana Cristina Barreto Monteiro (examinadora externa)
Universidade Católica de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof. Dr. Fuad Carlos Zarzar Júnior (examinador externo)
Universidade Católica de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof. Dr. João Manoel de Freitas Mota (examinador externo)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco

À minha mãe, Luzinete Félix de Queiroz (In memoriam)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua existência e por reger a minha vida.

Aos meus pais, José Gomes da Silva e Luzinete Félix de Queiroz, por repassar os princípios e orientações para nortear a minha vida.

À minha esposa, Elisângela Andrade, por entender meus anseios e dedicação à efetivação desta pesquisa, compreendendo a minha ausência em inúmeras ocasiões que poderiam ter sido compartilhadas com ela.

Ao meu orientador e coorientador, Professores Romilde Almeida Oliveira e Arnaldo Manoel Pereira Carneiro, pela orientação e incentivo para a concretização de mais um sonho.

Ao Professor José Afonso Pereira Vitório pelos ensinamentos e sugestões diferenciadas para o aperfeiçoamento desta pesquisa.

Aos professores do PPGEC pelos conhecimentos repassados de suas disciplinas.

Ao DNIT (Brasília) e ao DNIT/PE pelo apoio e disponibilização das informações necessárias à execução desse estudo, em especial a (o): Eng. Cacildo Brito, Eng. Bruno Bittencourt, Eng. Lincoln Oliveira, Eng. Leandro Teixeira, Eng. Fausto Mafra, Eng. Maria Helena, Eng. Giovanni Baier, Eng. Eduarda Motta, Eng. Aymoré Vaz, aos técnicos de suporte em infraestrutura de transportes Éder Martins e Maria Rosa, e técnica administrativa Renata Proa. Aos amigos Eng. Anderson Bruno, Eng. Genival Andrade, Eng. Lutemberg Florêncio, Eng. Ademir Santos, Eng. Fabiano Pereira, Ricardo Pereira e Jeremias Leitão pelas grandes sugestões para a finalização deste trabalho.

Por fim, aos amigos do Doutorado (Eudes Arimatéa, André Patriota, Victor Estolano, Camila Borba e Pablo Góes), aos amigos da Federação Kawamura, aos funcionários e servidores da UFPE pelo apoio, em especial, Andréa, Claudiana e Cleide da Secretaria do PPGEC, pela paciência na resolução dos trâmites burocráticos, permitindo assim a viabilidade desse sonho.

“Com as ações de manutenção, a vida útil da ponte pode ser aumentada [...]”. (EL DEBS, 2021, p. 466).

RESUMO

Pontes e viadutos rodoviários são elementos de vital importância para o desenvolvimento econômico e social de qualquer País, especialmente do Brasil que tem o modal rodoviário como o mais utilizado para o transporte de pessoas e de mercadorias, se comparado aos modais ferroviário e aquaviário. Essa importância requer uma permanente atenção ao processo de deterioração a que tais obras estão suscetíveis ao longo do tempo; requer também o desenvolvimento de pesquisas sobre avaliação de desempenho, vida útil e modelos de deterioração, como as que vêm sendo desenvolvidas em vários países com a finalidade de identificar as condições de estabilidade e de funcionalidade, contribuindo também para a tomada de decisão voltada ao planejamento de manutenções regulares e das correções que se fizerem necessárias. Nesse sentido, esta pesquisa pretende dar uma contribuição à evolução dessa área do conhecimento, apresentando os resultados da estimativa da vida útil das superestruturas de 98 pontes e viadutos de rodovias federais no Estado de Pernambuco, por meio da aplicação do Método dos Fatores e das técnicas de Análise de Sobrevivência. Os dados das obras do conjunto analisado foram obtidos do banco de dados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, sendo agrupados pelo tipo de material da superestrutura (concreto armado e concreto protendido), considerando as informações das inspeções periódicas realizadas nessas obras em 2019. Dentre os resultados decorrentes da aplicação de ambas as metodologias, destaca-se que as superestruturas construídas em concreto armado possuem um nível mais elevado de deterioração em relação àquelas executadas em concreto protendido. Por fim, as informações obtidas mostraram que as duas metodologias empregadas nesta pesquisa são confiáveis e consistentes, pois produziram resultados apropriados e baseados em conceitos validados na literatura para a finalidade a que se destinam, podendo, portanto, ser usadas na estimativa de vida útil das diversas tipologias de Obras de Arte Especiais das rodovias brasileiras, mesmo quando existirem limitações das informações registradas em um banco de dados e a inexistência de um planejamento de inspeções regulares.

Palavras-chave: deterioração; inspeção; pontes e viadutos; vida útil.

ABSTRACT

Road bridges and viaducts are elements of vital importance for the economic and social development of any country, especially in Brazil, where roads are the most used means of transportation of people and goods, when compared to railways and waterways. This importance requires permanent attention to the deterioration process to which such works are susceptible over time; it also requires the development of research on performance evaluation, service life, and deterioration models, as have been developed in several countries in order to identify the conditions of stability and functionality, also contributing to the decision-making process aimed at planning regular maintenance and corrections that may be necessary. In this sense, this research intends to contribute to the evolution of this area of knowledge by presenting the results of the estimation of the service life of the superstructures of 98 bridges and viaducts of federal highways in the state of Pernambuco, through the application of the Factor Method and the techniques of Survival Analysis. The data of the works of the analyzed set were obtained from the database of the National Department of Transport Infrastructure - DNIT, being grouped by the type of material of the superstructure (reinforced concrete and prestressed concrete), considering the information from the periodic inspections performed in these works in 2019. Among the results arising from the application of both methodologies, it stands out that the superstructures built in reinforced concrete have a higher level of deterioration compared to those executed in prestressed concrete. Finally, the information obtained showed that the two methodologies employed in this research are reliable and consistent, because they produced appropriate results based on concepts validated in the literature for their intended purpose, and can therefore be used in estimating the service life of the various types of Special Structures of Brazilian highways, even when there are limitations of the information recorded in a database and the absence of a plan of regular inspections

Keywords: deterioration; inspection; bridges and viaducts; service life.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Malha rodoviária brasileira	23
Figura 2 – Percentual da extensão de rodovias federais pavimentadas por região.....	23
Figura 3 – Densidade da malha rodoviária federal pavimentada por região do Brasil (valores em km/1.000 km ²).....	24
Figura 4 – Fluxograma da metodologia da pesquisa	27
Figura 5 – Fluxograma para avaliação quantitativa.....	36
Figura 6 – Fluxo de atividades de um sistema de gestão de OAE.....	41
Figura 7 – Contexto do SGO v3	42
Figura 8 – Papel do risco em uma estrutura de BMS	46
Figura 9 – Sistema de gerenciamento de pontes da Alemanha	47
Figura 10 – Modelo de funcionamento do SGOA.....	48
Figura 11 – Representação esquemática e gráfica das variáveis de entrada e saída no processo de degradação do concreto ao longo do tempo.....	59
Figura 12 – Representação da Cadeia de Markov	64
Figura 13 – Modelo de rede neural artificial	67
Figura 14 – Tipos de censura.....	72
Figura 15 – Monotonia da função de risco	76
Figura 16 – Curva de confiabilidade estimada das 98 OAEs obtida via Kaplan-Meier.....	119
Figura 17 – Curva da taxa de falha acumulada das 98 OAEs obtida via Kaplan-Meier	120
Figura 18 – Confiabilidade estimada das OAEs (concreto armado e protendido) obtida via Kaplan-Meier	120
Figura 19 – Curva de taxa de falha acumulada das OAEs (concreto armado e protendido) obtida via Kaplan-Meier	121
Figura 20 – Curvas estimadas de confiabilidade segundo os modelos Weibull e Lognormal (todas as pontes)	125
Figura 21 – QQ-plot com envelopes para o modelo Weibull.....	126
Figura 22 – QQ-plot com envelopes para o modelo Lognormal	126
Figura 23 – Curva de confiabilidade estimada segundo o modelo Weibull para o valor médio do VMD das superestruturas das 98 OAEs e pelo material da estrutura..	128
Figura 24 – Curva da taxa de falha acumulada segundo o modelo Weibull para o valor médio do comprimento total das superestruturas das 98 OAEs e pelo material da estrutura	129
Figura 25 – Fluxograma da aplicação do Método dos Fatores à amostra analisada	130
Figura 26 – Danos aos elementos das 22 OAES construídas em concreto protendido.....	133
Figura 27 – Deficiências funcionais das 22 OAES construídas em concreto protendido	134
Figura 28 – Insuficiências estruturais das 22 OAES construídas em concreto protendido....	134

Figura 29 – Danos aos elementos das 76 OAES construídas em concreto armado	135
Figura 30 – Deficiências funcionais das 76 OAES construídas em concreto armado	135
Figura 31 – Insuficiências estruturais das 76 OAES construídas em concreto armado	136

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Notas atribuídas e o conjunto dos danos estruturais verificados na inspeção de pontes e viadutos conforme a Norma DNIT 010/2004-PRO.....	31
Quadro 2 – Classificação de OAEs pela ABNT (2019)	32
Quadro 3 - Notas técnicas e classificação da condição estabilidade das normas DNIT (2004a), ABNT (2019) e ARTESP (2007)	34
Quadro 4 – Avaliação da condição do componente da ponte pela FHWA	38
Quadro 5 – Avaliação da condição do componente da ponte pelo NYSDOT	38
Quadro 6 – Classificação da condição de estabilidade de pontes em outros países	40
Quadro 7 – Principais sistemas de gestão de pontes em outros países.....	43
Quadro 8 – Expectativa de vida de pontes conforme Ford <i>et al.</i> (2011) apud Srikanth e Arockiasamy (2020)	49
Quadro 9 – Níveis de segurança de pontes existentes	62
Quadro 10 – Vantagens e desvantagens dos métodos estatísticos utilizados na análise de sobrevivência.....	82
Quadro 11 – Quantidade de OAEs por tipo de material.....	95
Quadro 12 – OAEs analisadas em concreto protendido (BR-101/PE).....	96
Quadro 13 – OAEs analisadas em concreto protendido (BR-104/PE).....	98
Quadro 14 – OAEs analisadas em concreto protendido (BR-116/PE).....	99
Quadro 15 – OAEs analisadas em concreto protendido (BR-232/PE).....	100
Quadro 16 – OAEs analisadas em concreto protendido (BR-407/PE).....	101
Quadro 17 – OAEs analisadas em concreto protendido (BR-408/PE).....	102
Quadro 18 – OAEs analisadas em concreto protendido (BR-428/PE).....	103
Quadro 19 – OAEs analisadas em concreto armado (BR-101/PE)	104
Quadro 20 – OAEs analisadas em concreto armado (BR-104/PE)	106
Quadro 21 – OAEs analisadas em concreto armado (BR-232/PE)	108
Quadro 22 – OAEs analisadas em concreto armado (BR-407/PE)	111
Quadro 23 – OAEs analisadas em concreto armado (BR-408/PE)	112
Quadro 24 – OAEs analisadas em concreto armado (BR-423/PE)	113
Quadro 25 – OAEs analisadas em concreto armado (BR-424/PE)	114
Quadro 26 – Estatísticas descritivas para as variáveis consideradas das 98 OAEs analisadas	118
Quadro 27 – Informações estatísticas para as variáveis consideradas segundo o material da estrutura.....	119
Quadro 28 – Testes não-paramétricos para as curvas de confiabilidade segundo o material da estrutura	122
Quadro 29 – Ajuste por meio da distribuição Weibull.....	124

Quadro 30 – Ajuste por meio da distribuição Lognormal	124
Quadro 31 - Decis estimados para a idade média estimada no final	127
Quadro 32 - Decis estimados para a idade média estimada no final	127
Quadro 33 - Decis estimados para a idade média estimada no final	127
Quadro 34 – Decis estimados para a idade média estimada no final	128
Quadro 35 – Problemas patológicos e deficiências estruturais mais recorrentes nas partes constituíntes de OAEs	131
Quadro 36 – Peso e percentual para avaliação do Fator B	137
Quadro 37 – Situação, percentual e peso para avaliação do Fator C.....	139
Quadro 38 – Tipo de fissura, classificação, abertura, percentual e peso para avaliação do Fator C.....	139
Quadro 39 – Situação, total de veículos e peso para avaliação do Fator F (F1 - VMD).....	141
Quadro 40 - Avaliação do Fator F (F2 - Trem tipo).....	141
Quadro 41 – Peso para avaliação do Fator F (F3 - Insuficiências estruturais).....	142
Quadro 42 – Tipo de fissura, classificação, abertura, percentual e peso para avaliação do Fator F (F4 - Fissura profunda aberta / rachadura muito aberta)	142
Quadro 43 – Atos de vandalismo (F5 - Manchas e fragmentações por fogo).....	143
Quadro 44 – Peso para avaliação do Fator F (F6 - Aparelho de apoio e junta de dilatação) .	143
Quadro 45 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-101/PE – Concreto protendido).....	146
Quadro 46 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-104/PE – Concreto protendido).....	148
Quadro 47 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-116/PE – Concreto protendido).....	148
Quadro 48 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-232/PE – Concreto protendido).....	149
Quadro 49 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-407/PE – Concreto protendido).....	150
Quadro 50 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-408/PE – Concreto protendido).....	151
Quadro 51 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-428/PE – Concreto protendido).....	153
Quadro 52 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-101/PE – Concreto armado).....	154
Quadro 53 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-104/PE – Concreto armado).....	157
Quadro 54 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-232/PE – Concreto armado).....	159
Quadro 55 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-407/PE – Concreto armado).....	163

Quadro 56 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-408/PE – Concreto armado).....	163
Quadro 57 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-423/PE – Concreto armado).....	164
Quadro 58 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-424/PE – Concreto armado).....	165
Quadro 59 – Síntese dos valores médios da VUE e redução de VUR por rodovia e material da estrutura (Concreto protendido)	170
Quadro 60 – Síntese dos valores médios da VUE e redução de VUR por rodovia e material da estrutura (Concreto armado).....	171
Quadro 61 – Comparativo dos resultados obtidos pelo Método dos Fatores, DNIT e Análise de sobrevivência (Concreto protendido)	172
Quadro 62 – Comparativo dos resultados obtidos pelo Método dos Fatores, DNIT e Análise de sobrevivência (Concreto armado)	174
Quadro 63 – Síntese da comparação entre metodologias (DNIT, Método dos Fatores e Análise de sobrevivência) – Concreto protendido	181
Quadro 64 – Síntese da comparação entre metodologias (DNIT, Método dos Fatores e Análise de sobrevivência) – Concreto armado	182

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARTESP	Agência Reguladora de Transporte do Estado de São Paulo
BIRM	Bridge Inspector's Reference Manual
BMS	Bridge Management System
BRIME	Bridge Management in Europe
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CR	Condition Rating
D	Grau do dano
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DOT	Departamento dos Transportes dos Estados Unidos
ET	Especificação técnica
EP	Estradas de Portugal S.A
EUA	Estados Unidos da América
FHWA	Federal Highway Administration
Fi	Fator de Intensidade do dano
FORM	First Order Reliability Method
GDE	Grau do dano da estrutura
Gdf	Grau de deterioração de uma família
GPR	Ground Penetrating Radar
IC	Índice de condição da ponte
IABMAS	International Association for Bridge Maintenance and Safety
ISO	International Organization for Standardization
MBEI	Manual for Bridge Element Inspection
MEF	Método dos Elementos Finitos
MF	Método dos Fatores
NBR	Norma Brasileira
NBI	National Bridge Inventory
NBIP	National Bridge Inventory Program
NBIS	National Bridge Inspection Standards
NYSDOT	New York State Department of Transportation

OAE	Obras de Arte Especiais
Pf	Probabilidade de falha
PRO	Procedimento
R	Confiabilidade
RAN	Rede Artificial Neural
REFER	Rede Ferroviária Nacional
RLM	Regressão Linear Múltipla
SGO	Sistema de gerenciamento de Obras de Arte Especiais
SGOA	Sistema de Gestão de Conservação de Obras de Arte
S-N	Tensão – número de ciclos
S	Survival
SORM	Second Order Reliability Method
TAC	Transportation Association of Canada
TPM	Transition Probability Matrix
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UnB	Universidade de Brasília
VMD	Volume Médio Diário
VMDa	Volume Médio Diário Anual

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA.....	22
1.2	OBJETIVOS.....	25
1.2.1	Geral	25
1.2.2	Específicos	25
1.3	METODOLOGIA	26
1.4	CONTEÚDO DA TESE.....	27
2	INSPEÇÕES, SISTEMAS DE GESTÃO, VIDA ÚTIL, DURABILIDADE, CICLO DE VIDA E CONFIABILIDADE ESTRUTURAL.....	29
2.1	INSPEÇÃO	29
2.1.1	Referenciais normativos e metodologias utilizados nas inspeções de pontes e viadutos no Brasil	30
2.1.2	Metodologias utilizadas nas inspeções de pontes e viadutos no Brasil	34
2.1.3	Referenciais normativos e metodologias utilizadas nas inspeções de pontes e viadutos em outros países.....	36
2.1.3.1	Estados Unidos da América	37
2.1.3.2	Alemanha.....	39
2.1.3.3	Reino Unido	39
2.2	SISTEMAS DE GESTÃO DE PONTES	40
2.2.1	Sistema de gestão de OAEs utilizado no Brasil	41
2.2.2	Sistemas de gerenciamento de OAEs adotados em outros países	43
2.2.2.1	Estados Unidos da América	45
2.2.2.2	Alemanha.....	46
2.2.2.3	Portugal.	47
2.3	VIDA ÚTIL, DURABILIDADE, DESEMPENHO, CICLO DE VIDA E CONFIABILIDADE ESTRUTURAL	48
2.3.1	Vida útil.....	49
2.3.2	Durabilidade	50
2.3.3	Desempenho	51
2.3.4	Ciclo de vida.....	52
2.3.5	Confiabilidade estrutural.....	53
3	AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS EXISTENTES.....	56
3.1	MÉTODOS MAIS UTILIZADOS PARA AVALIAÇÃO DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS EXISTENTES	56
3.1.1	Abordagem determinística	57

3.1.2	Abordagem semiprobabilística	58
3.1.3	Abordagem probabilística	58
3.1.4	Abordagem através de Métodos de Engenharia.....	60
3.2	AVALIAÇÃO DE PONTES EXISTENTES NO BRASIL.....	60
3.3	SITUAÇÃO EM OUTROS PAÍSES	62
3.4	MÉTODOS PROBABILÍSTICOS MAIS USADOS NA AVALIAÇÃO DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS	63
3.4.1	Modelo de Markov	63
3.4.2	Simulação Monte Carlo	65
3.4.3	Redes Neurais Artificiais	66
3.4.4	Modelo Bayesiano.....	67
4	ANÁLISE DE SOBREVIVÊNCIA, MÉTODO DOS FATORES E MÉTODO DELPHI	69
4.1	ANÁLISE DE SOBREVIVÊNCIA	69
4.1.1	Conceitos Gerais.....	70
4.1.1.1	Censura.....	71
4.1.1.2	Funções de sobrevivência e de risco	72
4.1.1.2.1	<i>Função densidade de probabilidade.....</i>	<i>73</i>
4.1.1.2.2	<i>Função de distribuição acumulada.....</i>	<i>73</i>
4.1.1.2.3	<i>Função de sobrevivência.....</i>	<i>73</i>
4.1.1.2.4	<i>Função de risco (Taxa de falha).....</i>	<i>74</i>
4.1.1.3	MODELOS DE DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE.....	76
4.1.1.3.1	<i>Distribuição exponencial.....</i>	<i>77</i>
4.1.1.3.2	<i>Distribuição Weibull.....</i>	<i>77</i>
4.1.1.3.3	<i>Distribuição Lognormal.....</i>	<i>78</i>
4.1.1.3.4	<i>Distribuição Log-logística.....</i>	<i>79</i>
4.1.2	Métodos estatísticos para análise de sobrevivência.....	79
4.1.2.1	Métodos paramétricos	80
4.1.2.2	Métodos semiparamétricos.....	81
4.1.2.3	Métodos não paramétricos.....	81
4.1.2.3.1	<i>Estimador de Kaplan Meier.....</i>	<i>81</i>
4.1.3	ESTUDOS DESENVOLVIDOS COM A UTILIZAÇÃO DAS TÉCNICAS DE SOBREVIVÊNCIA.....	83
4.2	MÉTODO DOS FATORES	83
4.2.1	Descrição dos Fatores.....	85
4.2.2	Estudos desenvolvidos com a utilização do Método dos Fatores	86
4.2.3	Interpretação estatística do Método dos Fatores.....	88

4.2.4	Demonstração da interpretação estatística do método dos fatores.....	88
4.2.4.1	Cálculo da interpretação estatística do Método dos Fatores	89
4.3	MÉTODO DELPHI.....	91
4.3.1	Estudos desenvolvidos através da utilização do Método Delphi	92
5	ESTUDO DE CASO	93
5.1	COLETA DAS INFORMAÇÕES DAS ESTRUTURAS ANALISADAS	93
5.1.1	Critérios adotados para escolha das estruturas analisadas.....	93
5.2	APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE ANÁLISE DE SOBREVIVÊNCIA.....	117
5.2.1	Análise dos dados.....	118
5.2.1.1	Estimativa das curvas de sobrevivência e de taxa de falha acumulada.....	119
5.2.1.2	Teste não-paramétrico para verificação da igualdade das curvas	121
5.2.1.3	Aplicação dos modelos de distribuição	122
5.2.1.4	Resultados da aplicação dos modelos de distribuição.....	124
5.2.1.5	Análise de resíduos.....	125
5.2.1.6	Resultados obtidos através do Modelo Weibull	126
5.2.1.7	Curvas de confiabilidade e taxa de falha acumulada	128
5.3	APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS FATORES À AMOSTRA ANALISADA...	129
5.3.1	Estimativa de vida útil da amostra analisada.....	130
5.3.2	Panorama dos danos, das deficiências funcionais e das insuficiências estruturais da OAEs analisadas	132
5.3.2.1	Concreto protendido	133
5.3.2.2	Concreto armado	134
5.3.3	Critérios e intervalos de ponderação estabelecidos para cada fator	136
5.3.3.1	Fator A.....	137
5.3.3.2	Fator B.....	137
5.3.3.3	Fator C.....	137
5.3.3.4	Fator D.....	140
5.3.3.5	Fator E.....	140
5.3.3.6	Fator F.....	140
5.3.3.7	Fator G.....	144
5.3.4	Determinação da vida útil estimada da amostra analisada através do Método dos Fatores	144
5.3.4.1	Concreto protendido	145
5.3.4.2	Concreto armado	153
5.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	168
5.4.1	Análise de sobrevivência	168
5.4.2	Método dos fatores	170

5.4.3	Análise comparativa entre Norma DNIT, Análise de sobrevivência e Método dos Fatores	171
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	184
6.1	ANÁLISE DE SOBREVIVÊNCIA	184
6.2	MÉTODO DOS FATORES	184
6.3	CONCLUSÕES GERAIS	185
6.4	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	185
	REFERÊNCIAS	187
	APÊNDICE A – INFORMAÇÕES E PONDERAÇÕES DOS FATORES DA SUPERESTRUTURA DAS OAES 20 E 21 DA BR-408/PE (CONCRETO PROTENDIDO)	206
	APÊNDICE B – INFORMAÇÕES E PONDERAÇÕES DOS FATORES DA SUPERESTRUTURA DAS OAES 76 E 77 DA BR-423/PE (CONCRETO ARMADO)	207
	APÊNDICE C – INFORMAÇÕES DA ESTIMATIVA DE VMD DE ALGUMAS OAES EM CONCRETO ARMADO.....	208
	APÊNDICE D – SCRIPT DA ANÁLISE DE SOBREVIVÊNCIA.....	210

1 INTRODUÇÃO

Concepções inadequadas e/ou ultrapassadas de projeto, deficiências construtivas, aumento expressivo do tráfego de veículos e a inexistência de manutenções regulares têm causado um aumento significativo da deterioração das pontes e viadutos rodoviários brasileiros, contribuindo assim para o envelhecimento precoce dessas importantes obras de infraestrutura.

Considerando que tais obras exercem um papel primordial na malha rodoviária do país, é de extrema importância que tenham um eficiente sistema de gestão, nas instâncias federal, estaduais e municipais de modo que recebam inspeções e manutenções periódicas que garantam a detecção prévia dos danos, que podem causar o colapso parcial ou total se não forem corrigidos a tempo, como comprovam os acidentes estruturais acontecidos com certa frequência com pontes, viadutos e passarelas de pedestres.

Também deve ser considerada outra questão fundamental que envolve além da funcionalidade e segurança, quanto aos aspectos relacionados aos custos de implantação e de manutenção. Trata-se da garantia de uma maior vida útil de tais equipamentos públicos, que deve ser obtida por meio de estudos e de procedimentos técnicos consistentes, envolvendo pesquisadores, projetistas, construtores e gestores.

Nesse sentido, a avaliação da vulnerabilidade das pontes existentes vem sendo estudada por diversos pesquisadores, especialmente em nível internacional. Por ser de fácil execução e não exigir altos custos para sua realização, uma das metodologias mais utilizadas é a inspeção visual, pois, além de possibilitar a classificação da condição da estabilidade de uma determinada ponte, através da imputação de uma nota técnica, subsidia os sistemas de gerenciamento de pontes e, principalmente, norteia a tomada de decisão quanto às atividades de manutenção e intervenção (LI e JIA, 2020).

Uma vez que a subjetividade da inspeção visual está diretamente ligada à expertise do inspetor (Kale, Ricks e Gandhi, 2021), ressalta-se que é possível obter desvios na avaliação da condição de estabilidade dessas estruturas, visto que tal atividade se limita à observação de anomalias e deficiências aparentes dos seus componentes estruturais.

Para evitar tais incertezas, podem ser utilizados os modelos de deterioração os quais permitem estimar a condição futura e obter a taxa de degradação de determinada estrutura ou componente estrutural (DROMEY *et al.*, 2020). Tais modelos podem ser determinísticos, estocásticos (probabilísticos) e de inteligência artificial (LI e JIA, 2020; HASAN e EMAD, 2019a; SRIKANTH e AROCKIASAMY, 2020; SAEED *et al.* 2017a).

A respeito dos modelos estocásticos, diversos trabalhos mais recentes vêm investigando o impacto das variáveis explanatórias que mais interferem no processo de deterioração e, conseqüentemente, no desempenho e na vida útil de pontes rodoviárias de concreto através da utilização de técnicas estatísticas. Alguns desses estudos se basearam na duração de determinado evento (análise de sobrevivência).

Trata-se de uma técnica bastante difundida na área da medicina e que na engenharia tem sido empregada para se obter a sobrevida estimada e a função de risco acumulado (taxa de falha acumulada) da superestrutura de pontes no que concerne à sua confiabilidade (ANDERSON, UNNIKISHNAN e SCHUMACHER, 2021; NABIZADEH, TABATABAI e TABATABAI, 2019; NABIZADEH, TABATABAI e TABATABAI, 2018; TABATABAI, TABATABAI e LEE, 2011).

Outras pesquisas verificaram e modelaram a influência de fatores (condições ambientais e de operação, variáveis relativas à área do tabuleiro, número de vãos, comprimento do maior vão, quantidade média de veículos, tipo de material, dentre outras) que interferem na durabilidade e na classificação da condição de estabilidade de pontes baseadas em dados de inventários nacionais por meio de análise de regressão linear (SRIKANTH e AROCKIASAMY, 2021; HASAN e EMAD, 2020; Kim *et al.*, 2020; SCHUMACHER *et al.*, 2018; SAEED *et al.* 2017b).

Ainda sobre esse aspecto, alguns autores têm usado modelos estocásticos balizados pelo conceito de vida útil para estimar a durabilidade das OAEs (pontes, viadutos, túneis e passarelas de pedestres).

Gode (2014) e Krakhmal'ny, Evtushenko e Krakhmal'naya (2016) propuseram novos métodos com o objetivo de prever a vida útil residual de pontes de concreto. O primeiro autor se baseou na quantidade de deterioração da corrosão de armaduras. Os demais autores apresentaram uma melhoria em um método cujo foco foi a identificação e validação de valores dos coeficientes de maior significância para cada elemento estrutural da ponte.

Gomes *et al.* (2021), Silva *et al.* (2021) e Silva *et al.* (2018) aplicaram o conceito de vida útil estabelecido pelas normas ISO 15686 (2011) e NBR 15575-1 (ABNT, 2021) e NBR 15575-2 (ABNT, 2013), visando estimar a vida útil residual de OAEs existentes no Estado de Pernambuco. Em suas pesquisas, os autores utilizaram as informações das anomalias e das respectivas condições de estabilidade estrutural existentes no Sistema de Gerenciamento de OAEs (SGO) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. Os resultados dos respectivos estudos demonstraram a eficácia da metodologia empregada, mesmo

quando se dispõe de dados históricos de inspeções visuais realizadas em intervalos não regulares.

Diante do exposto, torna-se importante contribuir para a evolução do conhecimento nesse setor, através da estimativa de vida útil da amostra analisada por meio da utilização das técnicas de análise de sobrevivência e do Método dos Fatores (ISO 15686, 2011). Ao final, os resultados dessas abordagens são comparados com a metodologia de classificação de condição de pontes, viadutos e passarelas de concreto existentes (Norma DNIT 010/2004-PRO), a fim de avaliar os benefícios e as limitações de cada modelo quando se utilizam informações de inspeções visuais não regulares. Tal ação proporcionará a tomada de decisão mais realista quanto à adequada priorização da execução de manutenções preventivas e/ou reabilitação de pontes e viadutos existentes.

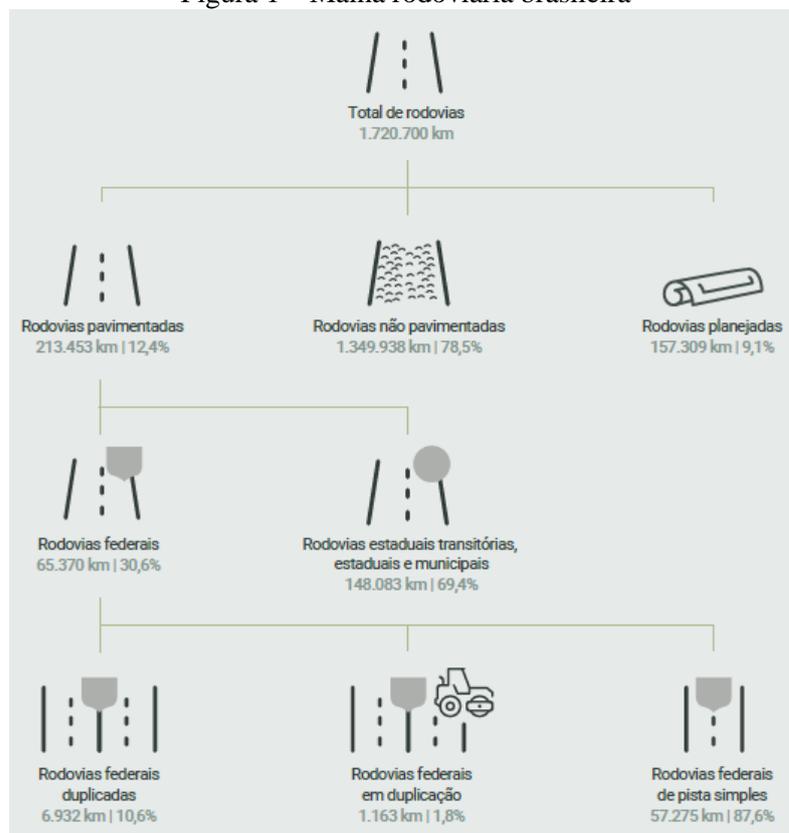
1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

Segundo o Relatório Gerencial da Pesquisa CNT de rodovias (2019), a malha rodoviária do país é composta por 1.720.700 km. Desse total, 213.453 km constituem as rodovias pavimentadas (12,4%). As rodovias não pavimentadas correspondem a 1.349.938 km (78,5%) representam e as rodovias planejadas representam 157.309 km (9,1%) da malha nacional. Do total de rodovias pavimentadas, 65.370 km (30,6%) fazem parte da malha Federal e as rodovias estaduais transitórias, estaduais e municipais compreendem 148.083 km (69,4%) (Figura 1).

Em relação à malha rodoviária federal pavimentada, 31,2% estão localizadas na região Nordeste, acompanhada pelas regiões Sudeste (18,3%), Sul (18,1%) e Centro-Oeste (17,5%). A região Norte abrange apenas 9.708 km, o que representa 14,9% da extensão total (Figura 2).

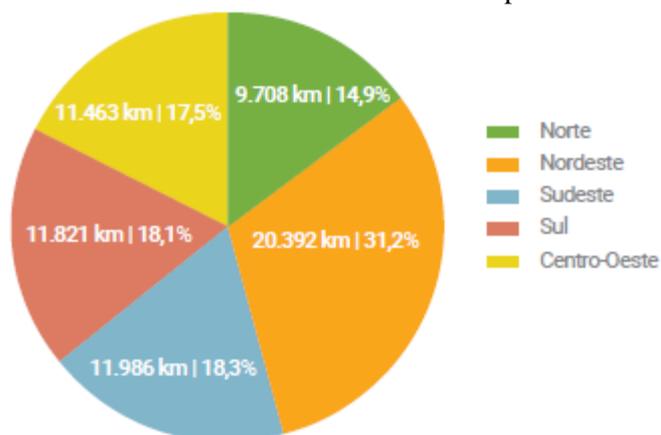
Entretanto, ao se observar a densidade da malha situada em cada região, percebe-se que a região Sul contempla a maior extensão rodoviária federal pavimentada no que tange à sua área territorial, acompanhada pelo Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste. Uma vez que a região Norte possui uma pequena extensão pavimentada e grande área territorial, figurou-se na última posição (Figura 3).

Figura 1 – Malha rodoviária brasileira



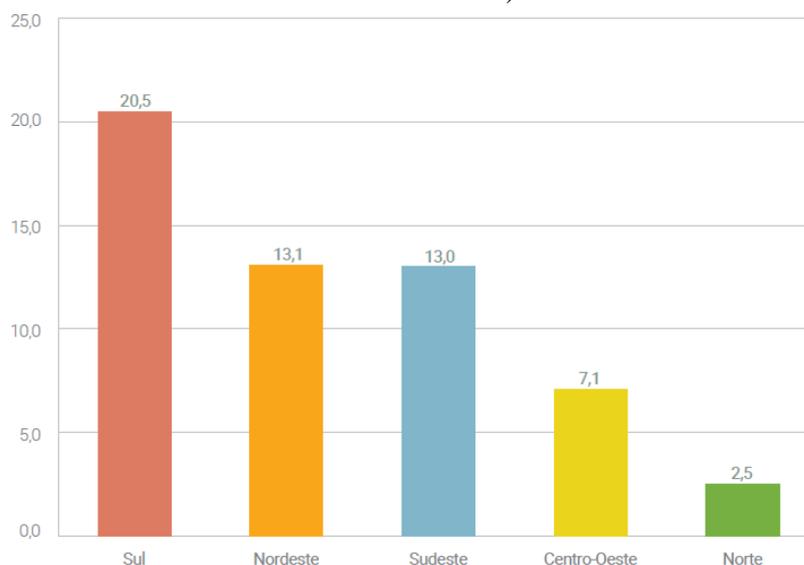
Fonte: Relatório gerencial da Pesquisa CNT de rodovias (2019).

Figura 2 – Percentual da extensão de rodovias federais pavimentadas por região



Fonte: Relatório gerencial da Pesquisa CNT de rodovias (2019).

Figura 3 – Densidade da malha rodoviária federal pavimentada por região do Brasil (valores em km/1.000 km²)



Fonte: Relatório gerencial da Pesquisa CNT de rodovias (2019).

Tanto a pesquisa mais atual como antigas pesquisas constataram grande deficiência da malha rodoviária nacional, particularmente como reflexo do aumento da frota de veículos (80,8%), entre 2009 e 2019, com maior reflexo nas regiões Norte e Nordeste. Outro ponto que influencia na degradação da malha rodoviária está relacionado à sobrecarga transmitida pelos veículos ao pavimento. Esse fato implica em desgaste não apenas ao pavimento, mas também às OAEs que compõem as rodovias.

Segundo informações do DNIT (2019), existem aproximadamente 7.000 OAEs no Brasil. Deste total, cerca de 618 se localizam na malha federal do Estado de Pernambuco. Conforme os critérios da Norma DNIT 010/2004 PRO as pontes das rodovias federais de Pernambuco tiveram as seguintes classificações quanto às condições de estabilidade: 14 obras foram consideradas precárias (Nota 1); 76 foram classificadas como sofrível (Nota 2); 255 foram consideradas boa aparentemente (Nota 3); 270 obtiveram a condição de Obra sem problemas importantes (Nota 4) e 3 OAEs tiveram a avaliação de Obra sem problemas (Nota 5).

Convém esclarecer que a quase totalidade dessas OAEs não dispõe dos projetos originais, nem de registros de inspeções cadastrais e/ou rotineiras, ou de manutenção preventiva/corretiva. A ausência de tais informações dificulta a tomada de decisões para a correção das anomalias existentes e requer um adequado planejamento para subsidiar a adoção das medidas corretivas e para evitar a evolução dos agentes deletérios que contribuem para a deterioração e para a redução da durabilidade e vida útil das estruturas.

Com base no exposto, e a partir da análise dos registros obtidos das inspeções visuais do DNIT das pontes e viadutos das rodovias federais de Pernambuco, esta pesquisa pretende realizar um estudo sobre a aplicabilidade das técnicas de análise de sobrevivência e do Método dos Fatores, apresentando os seus benefícios e as suas limitações.

Isso, além de possibilitar o aprimoramento do SGO/DNIT, também contribuirá para o planejamento de manutenções das OAEs existentes do sistema viário brasileiro, destacando ainda a possibilidade de obtenção de resultados mais consistentes, embasados nas informações das inspeções regulares.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Contribuir para a evolução do conhecimento científico nessa área por meio da estimativa da vida útil de 98 pontes e viadutos rodoviários situados no Estado de Pernambuco para subsidiar a tomada de decisão referente à adequada alocação de recursos e ao planejamento de manutenções regulares de OAEs existentes das rodovias brasileiras.

1.2.2 Específicos

- Utilizar as técnicas de análise de sobrevivência para obtenção da idade estimada de cada OAE, da confiabilidade e da taxa de falha acumulada da amostra estudada;
- Aplicar as orientações contidas na ISO 15686 (2011) para fins de estimativa da vida útil das OAES da amostra estudada;
- Comparar os resultados oriundos da aplicação das técnicas de Análise de Sobrevivência e do Método dos Fatores contido na ISO 15686 (2011) com a classificação qualitativa da condição de estabilidade preconizada pela Norma DNIT 010/2004-PRO, a fim de confirmar as suas aplicabilidades na verificação da vulnerabilidade e na vida útil estimada das OAEs analisadas;
- Apresentar os benefícios e as limitações das metodologias empregadas a partir das informações obtidas dos dados de inspeções visuais, permitindo oferecer critérios mais claros para a tomada de decisão com vistas à manutenção.

1.3 METODOLOGIA

Nesta pesquisa são utilizados os conceitos que constam da literatura disponível sobre o tema estudado para subsidiarem a análise comparativa das metodologias aplicadas às OAEs da amostra utilizada.

Parte das informações referentes às pontes e aos viadutos de concreto utilizadas no presente estudo foram obtidas do SGO/DNIT. Essas informações se referem ao ano de construção, às informações cadastrais e geométricas, dentre outras. Além disso, também foi obtido o volume médio diário de veículos (VMD) que trafega sobre essas estruturas através dos equipamentos redutores de velocidade instalados nas proximidades das OAEs da amostra, visto que tal informação se caracteriza como covariável quando da aplicação das técnicas de Análise de Sobrevivência. Sendo assim, foram consideradas as seguintes rodovias federais de Pernambuco: BR-101/PE, BR-104/PE, BR-116/PE, BR-232/PE, BR-407/PE, BR-408/PE, BR-423/PE, BR-424/PE e BR-428/PE.

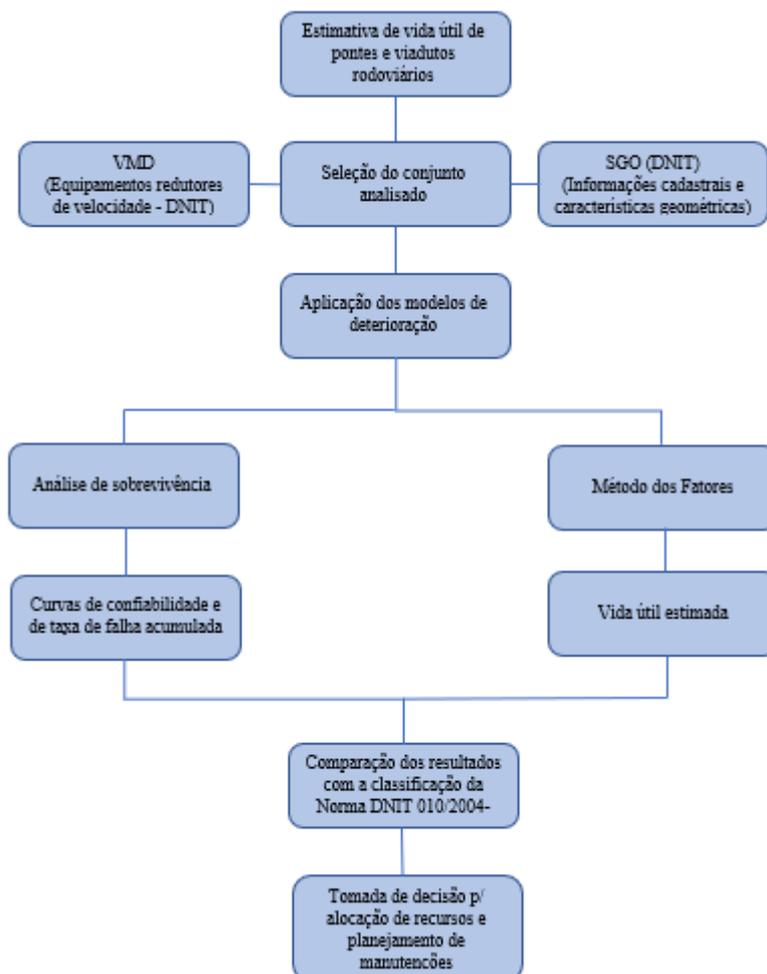
Em virtude da disponibilidade e facilidade da obtenção das informações gerais, cadastrais e de classificação (nota técnica) da condição de estabilidade dessas estruturas, do universo de 618 pontes e viadutos rodoviários federais do Estado de Pernambuco, foram selecionadas 98 OAEs pelo tipo de material da estrutura, sendo 76 em concreto armado e 22 em concreto protendido, uma vez que apenas esse quantitativo cumpriu todos os requisitos necessários à aplicação das diferentes metodologias empregadas na presente pesquisa.

Após a obtenção desses dados, foi possível aplicar as técnicas de Análise de Sobrevivência para avaliar a confiabilidade e a função de risco acumulado da amostra, bem como o conceito de vida útil por meio do Método dos Fatores constante da ISO 15.686 (2011). Cada modelo possui critérios específicos os quais serão mais detalhados no Capítulo 5 (Estudo de Caso).

Por fim, a metodologia empregada nesse estudo almeja comparar a eficácia (limitações e benefícios) de cada método e obter parâmetros que permitam a tomada de decisão quanto ao planejamento e à execução de manutenções quando são disponibilizados os registros de informações das inspeções visuais.

A Figura 4 exhibe o fluxograma da metodologia da pesquisa conforme detalhado anteriormente.

Figura 4 – Fluxograma da metodologia da pesquisa



Fonte: O autor (2022).

1.4 CONTEÚDO DA TESE

Este texto é constituído de seis capítulos, incluindo este capítulo introdutório.

Os Capítulos 2 e 3 constituem parte da revisão bibliográfica da presente pesquisa. O Capítulo 2 destaca as principais considerações relacionadas aos métodos de inspeção, sistemas de gestão de OAEs em níveis nacional e internacional, conceitos relativos à vida útil, à durabilidade, ao desempenho, ao ciclo de vida e à confiabilidade estrutural. Já o Capítulo 3 mostra os conceitos relacionados à avaliação da segurança estrutural de OAEs, destacando as abordagens determinística, semiprobabilística e probabilística, com enfoque nos métodos probabilísticos.

O Capítulo 4 destaca os principais conceitos das técnicas de Análise de Sobrevida e do Método dos Fatores, com o objetivo de subsidiar a aplicação dessas metodologias no capítulo 5.

No Capítulo 5 é apresentado o Estudo de Caso, por meio da avaliação de 98 (Noventa e oito) estruturas da amostra utilizada, analisadas pelo Método dos Fatores constante da ISO 15.686 (2011), pelas técnicas de Análise de Sobrevida e pela comparação dos critérios da Norma DNIT 010/2004 – PRO.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos após o final da pesquisa, as conclusões gerais e as sugestões para futuras pesquisas sobre o tema.

2 INSPETÇÕES, SISTEMAS DE GESTÃO, VIDA ÚTIL, DURABILIDADE, CICLO DE VIDA E CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

Assim como as outras estruturas de concreto, as pontes e viadutos estão suscetíveis a degradações estruturais durante as suas vidas úteis. Muitas vezes as deteriorações podem ser observadas através de uma simples inspeção visual, que mesmo se tratando da primeira providência, tem uma importância fundamental para o planejamento das futuras manutenções e de todo o processo de gestão, inclusive para o provisionamento de recursos e para a garantia da segurança do usuário. As inspeções também podem utilizar ferramentas mais sofisticadas que permitam identificar e antecipar a correção do dano ainda na fase inicial, como é o caso das técnicas não destrutivas de monitoramento e o uso de equipamentos avançados como os drones, que conseguem superar as dificuldades de acesso às estruturas e produzir imagens de excelente qualidade dos danos identificados durante a inspeção.

Ou seja, as inspeções significam a primeira fase de um conjunto de ações necessárias para uma boa gestão das Obras de Arte Especiais, que deverão contemplar necessariamente a durabilidade, a vida útil, e a confiabilidade estrutural ao longo do ciclo de vida de uma ponte. Tais conceitos são abordados a seguir neste capítulo.

2.1 INSPEÇÃO

A inspeção pode ser classificada como uma etapa de investigação inicial que fornece subsídios tanto a um sistema de gestão, quanto ao suporte de decisão, visto que é possível visualizar avarias (fissuras, deslocamento, corrosão de armaduras, eflorescências, dentre outras) que podem comprometer a estrutura de uma ponte.

Salienta-se que, por meio da obtenção dessas informações, é possível indicar, mesmo que preliminarmente, as condições de conservação e de estabilidade, além de possibilitar a recomendação da intervenção mais adequada (recuperação, reforço, reabilitação) para restabelecer o bom desempenho da estrutura.

É importante ressaltar que a inspeção visual, pelas suas próprias limitações, não tem como proporcionar uma indicação precisa das anomalias existentes na estrutura com base apenas nas observações de inspetores, mesmo que especialistas, uma vez que alguns desses defeitos acontecem de maneira endógena, dificultando a sua percepção.

Tenžera, Puž e Radić (2012) ratificam esse teor, afirmando que, devido a essa problemática, muitos países vêm desenvolvendo guias, manuais e procedimentos, objetivando a melhor orientação quanto à realização de vistorias em OAEs e o tratamento dos dados obtidos desse processo. Ainda sobre essa questão, os autores mencionam a existência de uma correlação

entre cada avaliação e a real condição da estrutura, a qual depende essencialmente da experiência do inspetor.

Hajdin, Casas e Matos (2019), em pesquisa similar, abordaram uma metodologia que permite avaliar a confiabilidade de pontes existentes a partir dos dados obtidos da fase de projeto, oriundos dos resultados das inspeções visuais dessas estruturas.

A seguir, são abordados os referenciais normativos e as metodologias de inspeção que são utilizadas no Brasil e em outros países.

2.1.1 Referenciais normativos e metodologias utilizados nas inspeções de pontes e viadutos no Brasil

O Brasil dispõe de três normas que são usualmente utilizadas para orientar a realização de inspeções em pontes e viadutos no país que estão apresentadas a seguir.

- Norma DNIT 010/2004-PRO – Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido – procedimento

Essa norma estabelece os critérios mínimos para a execução de vistorias em viadutos, pontes, pontilhões e bueiros de concreto estrutural (armado e protendido), além de servir como parâmetro para avaliação dos resultados obtidos das inspeções, as quais deverão ser realizadas a cada dois anos. Mesmo sendo uma literatura voltada às rodovias federais, possui aplicação bastante difundida nas rodovias estaduais e municipais.

Tem como principal característica a atribuição de uma nota técnica (Índice de condição – IC) à OAE, obtida a partir das notas imputadas aos seus elementos com função estrutural, podendo variar de 1 a 5, sendo o menor valor para a pior e o maior para a melhor condição de estabilidade, respectivamente.

O Quadro 1 apresenta os critérios para a qualificação das pontes e viadutos, baseados nos danos dos seus elementos estruturais e nas notas técnicas atribuídas.

Em relação aos tipos de inspeção, a Norma DNIT (2004a) preconiza 05 (cinco) tipos: cadastral, rotineira, extraordinária, especial e intermediária.

Quadro 1 – Notas atribuídas e o conjunto dos danos estruturais verificados na inspeção de pontes e viadutos conforme a Norma DNIT 010/2004-PRO

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	Boa	Obra sem problemas
4	Há alguns danos, mas não há sinais de que estejam gerando insuficiência estrutural	Nada a fazer; apenas serviços de manutenção	Boa	Obra sem problemas importantes
3	Há alguns danos gerando 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	Boa aparentemente	Obra potencialmente problemática
				Recomenda-se acompanhar a evolução dos problemas através das inspeções rotineiras, para detectar, em tempo hábil, um eventual agravamento da insuficiência
2	Há danos gerando significativa insuficiência estrutural da 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	Sofrível	Obra problemática
				Postergar demais a recuperação da obra pode levá-la a um estado crítico, implicando também sério comprometimento de vida útil da estrutura. Inspeções intermediárias são recomendáveis para monitorar os problemas
1	Há danos gerando grave insuficiência estrutural da 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 tardiar	Precária	Obra crítica
				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

Fonte: DNIT (2004).

- **Norma ABNT NBR 9452/2019 – Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto - Procedimento**

Essa norma estabelece as exigências para a realização de vistorias em pontes, viadutos e passarelas de concreto. A versão anterior (2016) foi um aprimoramento da Norma DNIT (2004a), tendo introduzido os parâmetros estruturais, funcionais e de durabilidade que não estavam previstos na versão de 2012 e não são exigidos na norma do DNIT.

Isso significou um grande diferencial entre as duas normas, pois a NBR 9452/2019 distinguiu-se pela adoção de uma maior variabilidade dos parâmetros utilizados o que a torna mais realista quanto aos resultados da classificação final da obra inspecionada.

Cruz *et al.* (2017) mencionam que os parâmetros estruturais se referem à segurança estrutural, com foco na estabilidade portante e capacidade resistente. Em relação aos parâmetros de funcionalidade, os autores afirmam que são vinculados à sua finalidade, além de promover segurança e conforto aos usuários. Os parâmetros de durabilidade se relacionam à vida útil.

Ressalta-se ainda que esse normativo prevê a execução de inspeções anualmente.

No Quadro 2 estão indicadas as classificações com as respectivas notas técnicas relacionadas aos parâmetros estruturais, funcionais e de durabilidade da norma ABNT 9452 (2019).

Quadro 2 – Classificação de OAEs pela ABNT (2019)

NOTA	CONDIÇÃO	CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL	CARACTERIZAÇÃO FUNCIONAL	CARACTERIZAÇÃO DE DURABILIDADE
5	Excelente	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	Boa	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	Regular	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	Ruim	Há danos que comprometem a segurança estrutural da OAE, sem risco iminente. Sua evolução pode levar ao colapso estrutural. A OAE'S 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	Crítica	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.

Fonte: ABNT (2019).

- **Norma ARTESP – Controle das Obras de Arte - ET-00.000.000-0-C21-002-REVISÃO 1**

A versão inicial (1999) dessa norma instituiu a classificação de pontes e viadutos por meio da atribuição de uma nota. Em 2007, a Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo - ARTESP publicou a 1ª revisão da ET-00.000.000-0-C21-002, a qual versa sobre o controle das OAEs nas vias paulistanas.

Em relação aos tipos de inspeção, a norma classifica em 3 tipos: Cadastral, Rotineira e Especial.

Esse normativo preconiza a periodicidade anual das inspeções. Para isso, estabelece como parâmetro oito níveis de classificação da condição de estabilidade das OAEs.

A comparação entre as classificações das condições de estabilidade, dos danos que geram insuficiência estrutural e as correspondentes ações corretivas previstas nas três normas, são mostradas no Quadro 3, adaptado de Santos *et. al* (2022).

Quadro 3 - Notas técnicas e classificação da condição estabilidade das normas DNIT (2004a), ABNT (2019) e ARTESP (2007)

ARTESP	ABNT / DNIT	Condição de estabilidade	Dano / Insuficiência estrutural	Ação corretiva
A5	5	Excelente	Não há dano ou insuficiência estrutural	Nada a fazer
A4, B4	4	Boa	Há algum dano, mas não existem evidências que podem causar alguma insuficiência estrutural	Nada a fazer; apenas serviços de manutenção
B3, B2 e C2	3	Boa aparentemente	Há danos que podem vir a gerar alguma insuficiência estrutural. Contudo, não há sinais de comprometimento da estabilidade da obra.	A recuperação da estrutura pode ser adiada. Entretanto, neste caso, o problema deve ser colocado sob observação sistemática
C1	2	Sofrível	Há danos que geram insuficiência estrutural significativa na ponte, mas, aparentemente, ainda não há risco real de colapso estrutural	A recuperação (normalmente com reforço estrutural) da ponte deve ser feita a curto prazo
C0	1	Crítica	Há danos que causam graves insuficiências estruturais na ponte; o elemento é crítico, com um risco real de colapso	A recuperação (geralmente com reforço estrutural) - ou em alguns casos, a substituição da ponte - deve ser feita sem atraso

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2022) (Tradução nossa).

2.1.2 Metodologias utilizadas nas inspeções de pontes e viadutos no Brasil

- Metodologia GDE/UNB

Essa metodologia foi inicialmente elaborada por Klein *et al.* (1991), através de um convênio entre a Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS e a Prefeitura Municipal de Porto Alegre, tendo sido vistoriadas OAEs localizadas na Região Metropolitana daquela cidade.

De acordo com a metodologia as obras são inspecionadas em seus elementos componentes, cada grupo deles formando as denominadas Famílias de Elementos, com as seguintes denominações: instalações diversas, encontros, instalações pluviais, pavimento, juntas de dilatação, aparelhos de apoio, pilares e tabuleiros.

Na vistoria, cada profissional vistoriador preenche individualmente os formulários (planilhas de inspeção) constantes do Caderno de Inspeções, atribuindo uma nota para cada manifestação patológica observada, em função da intensidade. A nota final, denominada Fator de Intensidade (FI), corresponde à média das notas atribuídas pelos vistoriadores.

A pesquisa teve como finalidade identificar os danos existentes nas estruturas, além de idealizar um procedimento de inspeção que permitisse registrar as anomalias encontradas mediante um grau de risco pré-estabelecido. Os mesmos autores ainda diagnosticaram que os critérios utilizados poderiam ser ajustados a qualquer tipo de estrutura, o que possibilitaria tornar a metodologia bastante abrangente.

Após o conceito inicial, Castro (1994) aprimorou o processo, tendo-o denominado de GDE/UnB, o qual teve a função de analisar de forma quantitativa duas edificações distintas. No que diz respeito à avaliação do nível de degradação, os resultados obtidos foram satisfatórios, tais como quando aplicados por Klein *et al.* (1991).

Apesar do aperfeiçoamento do método por Castro (1994), esse mesmo autor advertiu quanto ao uso de maiores aplicações, objetivando ajustar de modo satisfatório os critérios utilizados. Diversos autores promoveram os devidos ajustes para edificações com estruturas de concreto, tais como, Lopes (1998), Boldo (2002) e Fonseca (2007). Posteriormente, foram realizados ajustes e uma aplicação voltada a 11 pontes aleatoriamente selecionadas por Euqueres (2011).

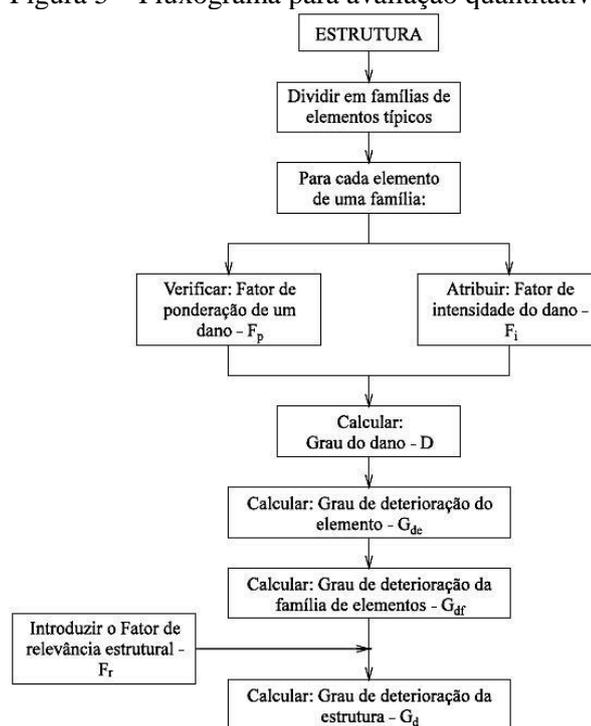
Todos os autores acima elaboraram alguma documentação, com a intenção de balizar a vistoria de cada estrutura a ser analisada, apresentando assim a avaliação dos danos predominantes, bem como sugestões à imputação dos valores referentes aos Fatores de intensidade do dano (Fi).

Inicialmente foi elaborado um Caderno de Inspeção denominado posteriormente de Roteiro de Inspeção para Estruturas de Concreto por Boldo (2002). Nesse novo texto, foram realizadas alterações na estruturação do procedimento, como por exemplo, expressões para a obtenção do Grau do Dano (D) e do Grau de deterioração de uma Família de Elementos (Gdf).

O Roteiro batizado por Fonseca (2007) foi ajustado, tendo Euqueres (2011) o denominado de Roteiro de Inspeção para Estruturas e Pontes de Concreto Armado.

Verly (2015), em sua dissertação, destacou o citado ajuste no fluxograma para avaliação quantitativa conforme Figura 5 a seguir:

Figura 5 – Fluxograma para avaliação quantitativa



Fonte: Verly (2015).

- Metodologia da UFPR (Em desenvolvimento)

Warmling *et al.* (2021) desenvolveram uma metodologia objetiva para avaliar o desempenho de pontes no Brasil. Esses pesquisadores da Universidade Federal do Paraná (UFPR) aplicaram um procedimento determinístico a 536 OAEs situadas nos Estados do Paraná e Santa Catarina.

Ainda segundo esses autores, a justificativa para aprimorar a metodologia utilizada pela Norma DNIT-010/2004-PRO se baseou na dificuldade em selecionar pontes severamente degradadas que foram classificadas com uma mesma nota técnica, especialmente quando existe uma limitação de recursos para realização de intervenções.

O estudo, ao final, obteve bons resultados e facilitou a hierarquização da amostra analisada em relação à condição estrutural e funcional, destacando também as vantagens desse método para avaliação da qualidade e desempenho de pontes.

2.1.3 Referenciais normativos e metodologias utilizadas nas inspeções de pontes e viadutos em outros países

Ao contrário do Brasil, os outros países dedicam uma maior atenção à etapa de investigação como sendo a inicial de um sistema de gestão de pontes, visto que se caracteriza como ponto de partida para a formação de um banco de dados dessas estruturas, destacando

assim a sua importância e aplicabilidade. A seguir, são apresentados resumidamente os procedimentos adotados em alguns países.

2.1.3.1 Estados Unidos da América

Partindo do pressuposto anterior, cada país, ou até mesmo seus Estados, como é o caso dos Estados Unidos da América (EUA), publica normativos (guias, manuais, dentre outros) para nortear a atividade de inspeção.

Uma das instituições de maior destaque nessa atividade é a American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Além de não ter fins lucrativos e representar departamentos rodoviários e de transporte nos 50 Estados americanos, no Distrito de Columbia e em Porto Rico, é responsável por publicações diversas e tem como principal função o desenvolvimento, a manutenção e a operação do sistema de transporte rodoviário nacional.

Como documentação importante daquela associação, pode-se mencionar o Manual for Bridge Element Inspection (MBEI), que se trata de uma ferramenta indispensável para a avaliação das estruturas de pontes. Outro documento de referência dessa entidade é o Manual for Bridge Evaluation que define os tipos de inspeção, sendo considerados os seguintes: inicial, rotineira, controle de danos detalhada, inspeção da fratura de membros críticos, subaquática e especial.

Outra instituição que desempenha papel semelhante é a Federal Highway Administration (FHWA). Após o seu surgimento, os diversos departamentos de transportes dos EUA (DOTs) constituíram programas de inventário importantes para a consolidação de seus bancos de dados, dando prioridade à realização efetiva de inspeções nas pontes e nos viadutos de toda a extensão da sua malha viária. Para tanto, foi institucionalizado o National Bridge Inspection Standards (NBIS) que, em linhas gerais, destaca-se como padrões normativos de regulação federal, os quais estabelecem exigências mínimas para a realização de inspeções, no que tange ao procedimento, à frequência, à qualificação de inspetores, além da manutenção do inventário de pontes.

Para dar suporte e atender a essa padronização, a FHWA constituiu também o National Bridge Inventory (NBI), tendo como base a junção da estrutura de inventário e a avaliação de dados obtidos por cada Estado. Segundo o Relatório nº PD-96-001 (FHWA, 1995), a estrutura de avaliação do NBI é composta de notas que variam de 0 a 9 (Quadro 4) as quais possibilitam a classificação dos elementos de maneira qualitativa, baseando-se na extensão do dano e no comportamento estrutural.

Quadro 4 – Avaliação da condição do componente da ponte pela FHWA

Código	Classificação do componente da ponte	Descrição
9	Excelente	Nova condição
8	Muito bom	Sem problemas visíveis
7	Bom	Pequenos problemas
6	Satisfatório	Elementos estruturais apresentam pequena deterioração
5	Razoável	Todos os elementos estruturais primários apresentam boa condição de estabilidade, mas podem existir uma pequena perda de seção, rachaduras, deslocamento, ou erosão
4	Fraco	Acentuada perda de seção, deterioração, áreas grandes de deslocamento na superfície; grande necessidade de reabilitação
3	Sério	Perda de seção, deterioração, deslocamento ou erosão que tenha afetado severamente os componentes estruturais primários. Falhas localizadas são possíveis. Fissuras por cisalhamento no concreto podem ocorrer.
2	Crítico	Deterioração avançada dos elementos estruturais primários. A ponte pode ser fechada até que sejam tomadas medidas corretivas
1	Falha Iminente	Grande deterioração ou perda de seção; A ponte pode ter fechado o tráfego interrompido, mas ações corretivas podem liberar o serviço leve à estrutura
0	Colapsada	Fora de serviço, além da ação corretiva

Fonte: Adaptado de FHWA (1995), Srikanth e Arockiasamy (2021) e Hasan e Elwakil (2020) (Tradução nossa).

Há outros sistemas para avaliação de pontes semelhantes ao proposto pela FHWA. É o caso do New York State Department of Transportation (NYSDOT) que permite a classificação da condição da ponte em um intervalo de 1 a 7 de acordo com o nível de degradação e o comportamento do elemento estrutural, em relação à forma como foi originalmente projetado. As notas técnicas 8 e 9 são utilizadas, respectivamente, para os casos "não aplicável ao componente" e "condição e/ou existência desconhecida" (Quadro 5). Com base no NBI, foi criado o National Bridge Inventory Program (NBIP).

Quadro 5 – Avaliação da condição do componente da ponte pelo NYSDOT

Código	Classificação da ponte pelo NYSDOT
9	Condição e/ou existência desconhecida
8	Não aplicável ao componente
7	O componente se encontra em nova condição / nenhuma deterioração
6	Usado para condição de classificação entre 5 e 7
5	Menor deterioração, mas funcionando como projetado
4	Usado para condição de classificação entre 3 e 5
3	Grave deterioração ou não funcionamento como projetado
2	Usado para condição de classificação entre 1 e 3
1	Totalmente deteriorada ou colapsada (condição de ruptura)

Fonte: Adaptado de NYSDOT (2017) (Tradução nossa).

Na intenção de obter dados mais consistentes relativos à inspeção, houve, na década de 90, a implementação massiva dos sistemas de gerenciamento de pontes. Para tanto, foi publicado naquela mesma década o Bridge Inspector's Reference Manual (BIRM), o qual foi atualizado em 2012.

2.1.3.2 Alemanha

A Alemanha possui instrumentos normativos que também disciplinam a realização de investigações, tais como a norma DIN 1076:1999-11 que baliza a inspeção e testes das estruturas que fazem parte das suas rodovias, objetivando a avaliação da condição de estabilidade. Também adota o guia RI-EBW-PRÜF.

De acordo com Haardt (2009), a norma DIN 1076 esclarece a diferença entre os tipos de inspeção (principal, simples, especial e regular), recomendando ainda a frequência de investigações: a) principal - a cada 6 anos e b) simples - após 3 anos da principal.

Esse mesmo autor aborda que as inspeções principais são realizadas visualmente. Os dados coletados na investigação podem ser obtidos através do seu banco de informações denominado SIB-Bauwerke (Road Information Database – Structures).

Os danos registrados nessa vistoria são devidamente classificados conforme uma escala de 4 níveis, onde devem ser observados os parâmetros de estabilidade, segurança do tráfego e durabilidade. As notas técnicas para essa condição de qualificação iniciam com o valor 1 (condição muito boa) e vão até o valor 4 (condição insuficiente).

2.1.3.3 Reino Unido

De maneira similar, o Reino Unido adota o Design Manual for Roads and Bridges (DMRB), especificamente o seu Volume 3, que abrange seções referentes à inspeção (Seção 1), à manutenção (Seção 2), ao reparo (Seção 3) e à avaliação (Seção 4).

A Seção 1, parte 4, propõe 5 tipos de inspeção: Inspeção de segurança, inspeção geral, inspeção principal, inspeção especial e subaquática

A classificação das condições de pontes em diversos países, obtidas por meio de inspeções segundo uma vasta literatura citada na pesquisa de Srikanth e Arockiasamy (2020), estão indicadas no Quadro 6.

Quadro 6 – Classificação da condição de estabilidade de pontes em outros países

País	Classificação da condição da ponte
Dinamarca	Nota técnica de 0 a 5 referente à classificação de condição associada à recomendação do inspetor sobre a urgência de reparação
Finlândia	Nota técnica de 0 a 4 relativa à classificação de condição associada à importância dos esforços, gravidade, urgência da reparação, condição do elemento da ponte
França	Nota técnica de 1 a 3 no que tange à classificação da condição da ponte. 2E indica a necessidade urgente de manutenção especializada, 3U indica a necessidade urgente de reparação, e S indica um perigo à segurança do usuário e uma necessidade urgente de intervenção
Noruega	Nota técnica de 1 a 4 concernente à classificação de gravidade, além de um código de consequência (impacto na capacidade de carga, operações de tráfego, custo de manutenção ou ambiente)
África do Sul	Classificação da condição da ponte em três categorias: condição física, funcional e econômica (relacionada à extensão dos danos)
Reino Unido	Classificação de severidade de 1 a 5 juntamente com a classificação de A a E
Japão	Classificações de urgência de manutenção: A - reparos não necessários, B - não são necessários reparos imediatos, C - intervenções imediatas, E1- ação emergencial é necessária a partir do ponto de vista da segurança e estabilidade estrutural, E2 - são necessárias ações de emergência devido a outros fatores, M - são necessárias reparações ao longo dos trabalhos de manutenção regulares, S - são necessárias investigações mais detalhadas
China	Há cinco notas técnicas relativas às condições de estabilidade: CS I- bom estado, enquanto CS V- condição inaceitável
Malásia	Apresenta classificação de condição de pontes de 1 a 5, sendo 1 - sem danos encontrados e sem necessidade de manutenção como resultado de inspeção e 5 - sendo pesada e criticamente danificada, e possivelmente afetando a segurança ou o tráfego
Coreia do Sul	Classificação de condição de pontes de A a E, sendo A para condição perfeita e E para condição de colapso

Fonte: Adaptado de Srikanth e Arockiasamy (2020) (Tradução nossa).

2.2 SISTEMAS DE GESTÃO DE PONTES

Entende-se por sistema de gestão de Obras de Arte Especiais um mecanismo que possibilita ao gestor a tomada de decisões com a finalidade de garantir condições aceitáveis de serviço dessas estruturas com o uso racional dos recursos financeiros disponíveis.

Dessa maneira, deve ser feito um provisionamento adequado dos recursos para garantir um sistema de gerenciamento com apropriado funcionamento, que possibilite decisões eficazes baseadas em elementos técnicos que garantam a boa conservação das pontes sob uma determinada jurisdição do setor público ou daquelas que estiverem sob o regime de concessão.

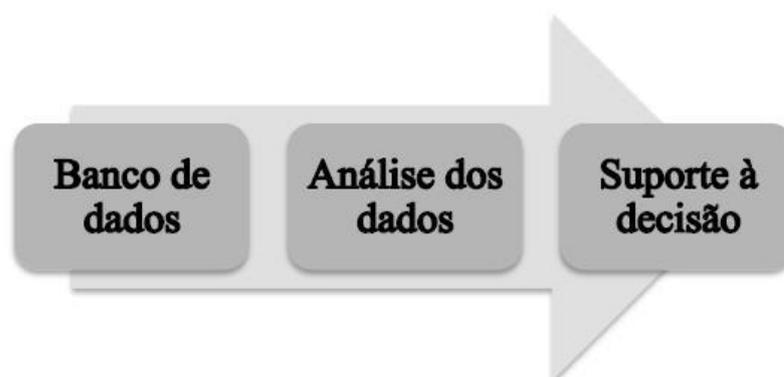
Ou seja, deverá ser buscada a otimização de recursos por meio de atividades técnicas e administrativas que garantam os procedimentos adequados para a manutenção, recuperação, ampliação ou até se for o caso, a demolição e substituição de pontes.

A eficiência do sistema dependerá fundamentalmente do desenvolvimento de um banco de dados com todas as informações relevantes sobre as OAEs da malha rodoviária da respectiva

jurisdição, da atualização permanente das informações cadastrais e da correta utilização dos dados para identificar e selecionar quais intervenções necessárias por obra, quando serão realizadas e quanto custarão.

De modo geral, um sistema de gerenciamento de pontes é composto por: a) informações que podem ser obtidas de documentações muitas vezes escassas e até mesmo imprecisas; b) dados oriundos de inspeções; c) informações extraídas de banco de dados existente. Quanto mais consistentes forem tais informações maior será a garantia de um bom suporte à decisão. A esse respeito, Verly (2015) destaca na Figura 6 o fluxo de atividades de um sistema genérico de gestão de pontes.

Figura 6 – Fluxo de atividades de um sistema de gestão de OAE



Fonte: Verly (2015).

Complementando a abordagem acima, são descritos a seguir aspectos importantes atinentes aos sistemas de gestão de OAEs no Brasil e em outros países.

2.2.1 Sistema de gestão de OAEs utilizado no Brasil

O Sistema de Gerenciamento de Obras de Artes Especiais adotado no Brasil para as rodovias federais é o SGO (DNIT). Não existem informações sobre sistemas de gerenciamento de pontes estaduais ou municipais. Apenas as OAEs contidas nas rodovias concessionadas são contempladas por um sistema de gestão.

O sistema do DNIT foi criado em 1993, a partir de um conteúdo cadastral existente no banco de dados das pontes e viadutos do antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (atual DNIT). Com relação ao SGO, Verly (2015) explana sobre as três fases pelas quais o sistema passou.

Segundo o autor, a primeira delas iniciou-se entre os anos de 1993 e 1994 e envolveu a criação de um sistema baseado nas necessidades gerenciais daquela instituição. Já a segunda fase, ocorrida entre 1995 e 1997, consistiu na introdução no sistema dos dados oriundos das inspeções realizadas. Em 2001, teve início a terceira fase que contemplou a análise do desempenho do sistema e diagnóstico das possíveis melhorias que poderiam ser implantadas. Ainda foram inseridas nessa fase aspectos de gerenciamento estrutural e melhorias na área de informática.

Na sua pesquisa, o autor ainda destaca a existência dos módulos de auxílio ao gerenciamento que foram inseridos: a) manutenção de pontes com a indicação de atividades padrões de manutenção; b) pontes notáveis; c) pontes de madeira; d) pontes em rodovias sob o regime de concessões; e f) cargas móveis excepcionais ou cargas indivisíveis. O autor apresenta o contexto geral do sistema exibido na Figura 7.

Figura 7 – Contexto do SGO v3



Fonte: DNIT (2004) apud Verly (2015).

A estrutura da Figura 7 pode ser devidamente estratificada conforme abaixo:

- Cadastro das informações (estrutura e elementos)

Tem a finalidade de possibilitar o conhecimento de todos os dados existentes, como por exemplo, tipologia estrutural, total de OAEs, bem como a localização de cada uma delas. As informações contidas no cadastro poderão ser confrontadas após a execução de inspeções.

- Serviços

As estruturas ou seus elementos que forem diagnosticados com anomalias ou problemas estruturais quando da realização de inspeções, o sistema destina essas OAEs às atividades de manutenção, momento no qual é verificada a intervenção apropriada à deficiência estrutural observada.

- Priorização

Em relação à priorização de cada estrutura para execução de intervenção mais adequada, é realizada observando-se a condição de estabilidade estrutural por meio da classificação da OAE através de nota técnica conforme anteriormente mencionado no tópico referente à inspeção.

- Banco de dados

Relaciona-se com as aplicações de geoprocessamento através da exportação dos dados para fins de elaboração de mapas temáticos relativos a essas tipologias construtivas.

No que tange aos tipos de inspeções que deverão ser realizadas, bem como quanto ao tratamento das informações obtidas, deve-se seguir o preconizado na Norma DNIT 010/2004-PRO para armazenamento das informações no SGO, inclusive para definição da terapia e intervenção mais adequada para cada OAE. Os detalhes a esse respeito foram plenamente explicitados no item 2.1 inspeção.

2.2.2 Sistemas de gerenciamento de OAEs adotados em outros países

Assim como descrito no subitem 2.1.2 Referenciais normativos e metodologias utilizadas em outros países para critérios concernentes à inspeção, são apresentados a seguir alguns dos sistemas de gerenciamento de pontes (Bridge Management System - BMS) utilizados em alguns países do mundo.

O Quadro 7 apresenta os principais sistemas de gestão de pontes em outros países conforme informado pelo IABMAS Bridge Management Committee 2014 (MIRZAEI *et al.*, 2014).

Quadro 7 – Principais sistemas de gestão de pontes em outros países

Item	País	Proprietário	Sistema	
			Nome	Sigla
1	Austrália	Main Roads Western Australia	MRWA Bridge Management System	MRWA

2	Austrália	Roads and Maritime Services (RMS), New South Wales	NSW Bridge Management System	NSW
3	Canadá	Ontario Ministry of Transportation and Stantec Consulting Ltd.	Ontario Bridge Management System	OBMS
4	Canadá	Quebec Ministry of Transportation	Quebec Bridge Management System	QBMS
5	Canadá	Edmonton Ministry of Transportation	EBMS	EBMS
6	Canadá	Prince Edward Island Dept. of Transportation and Infrastructure	PEI BMS	PEI BMS
7	Canadá	Government of Northwest Territories, Department of Transportation	GNWT Bridge Management System	GNWT
8	Denmark	Danish Road Directorate	DANBRO Bridge Management System	DANBRO
9	Finland	Finnish Transport Agency	The Finnish Bridge Management System	FBMS
10	Germany	German Federal Highway Research Institute	Bauwerk Management System	GBMS
11	Ireland	Irish National Road Association	Eirspan	Eirspan
12	Italy	Autonomous Province of Trento	APT-BMS	APT BMS
13	Japan	Kajima Corporation and Regional Planning Institute of Osaka	BMS@RPI	RPIBMS
14	Korea	Korean Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs	Korea Road Maintenance Business System	KRMBS
15	Latvia	Latvian State Road Administration	Lat Brutus	Lat Brutus
16	Netherlands	Dutch ministry of transport	DISK	DISK
17	Norway	NPRA, Norwegian Public Roads Administration	BRUTUS	BRUTUS
18	Poland	Polish Railway Lines	SMOK	SMOK

19	Poland	Local Polish Road Administrations	SZOK	SZOK
20	Spain	Spanish Ministry of Public Works	SGP	SGP
21	Sweden	Swedish Road Administration	Bridge and Tunnel Management	BaTMan
22	Switzerland	Swiss Federal Roads Authority	KUBA	KUBA
23	United States of America	Alabama Department of Transportation	ABIMS	ABIMS
24	United States of America	AASHTO	AASHTOWare (Antigo Pontis)	AASHTO
25	Vietnam	Vietnam Ministry of transportation	Bridgeman	Bridgeman

Fonte: Adaptado de Mirzaei *et al.* (2014).

A seguir, são feitas as descrições sumárias de alguns desses sistemas.

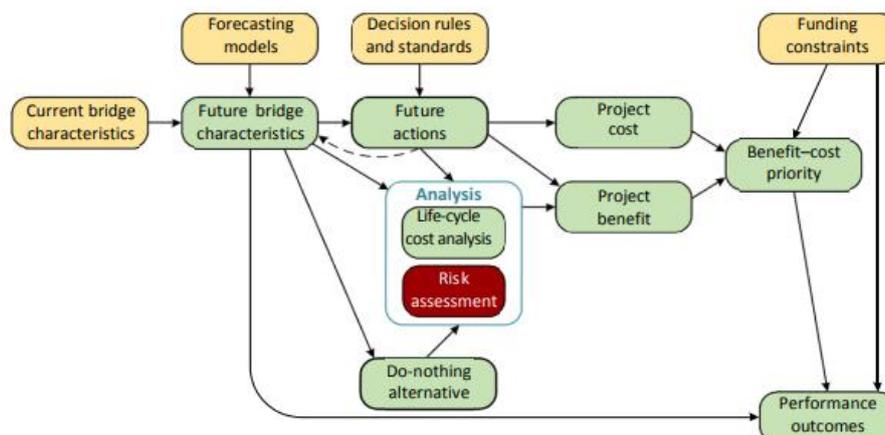
2.2.2.1 Estados Unidos da América

O gerenciamento de pontes nos EUA utiliza modelos de deterioração com o objetivo de estimar a condição dessas estruturas durante a vida útil. Normalmente, são usados diferentes modelos para os componentes das OAEs (tabuleiro, superestrutura e infraestrutura) e/ou nos elementos das pontes. Modelos simples representativos de viadutos e pontes podem ser usados para alto nível de degradação e previsões orçamentárias. Todavia, são pouco eficientes para o planejamento e priorização de ações reais.

Ainda sobre esse aspecto, os modelos mencionados anteriormente são desenvolvidos a partir da análise estatística dos dados de suas condições obtidos das inspeções. As OAEs são vistoriadas pelo menos a cada 24 meses para efeito de acúmulo de grande quantidade de dados.

Thompson (2017) apresentou na 11th International Bridge Management and Structure Conference o software da AASHTO (AASHTO Ware bridge management) para gestão de pontes com objetivo de desenvolver uma direção no que diz respeito à avaliação de riscos para sistemas de gerenciamento de pontes. A Figura 8 explana o papel do risco em uma estrutura de BMS.

Figura 8 – Papel do risco em uma estrutura de BMS



Fonte: Thompson (2017).

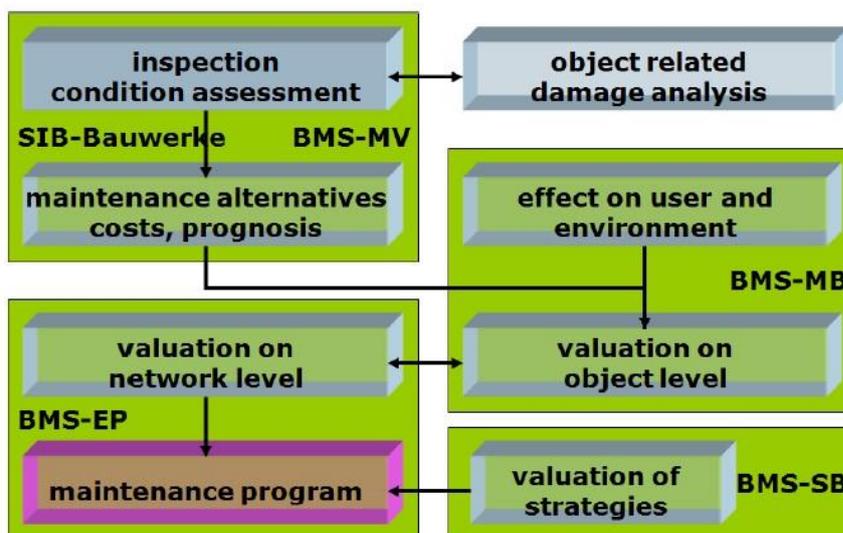
Segundo Johnson e Boyle (2017), o sistema de gerenciamento mais utilizado nos Estados Unidos da América é o anteriormente conhecido como Pontis. Essa ferramenta foi reformulada e denominada de AASHTOWare Bridge Management (BrM). Trata-se de um sistema robusto para inspeção e gerenciamento licenciado pela grande parte dos departamentos estaduais de transporte (DOTs), assim como outras instituições de transporte.

2.2.2.2 Alemanha

No que diz respeito à Alemanha, Holst (2012) menciona que em 1997 o Instituto Federal de Pesquisa Rodoviária realizou, juntamente com o Ministério Federal de Transportes, Construção e Desenvolvimento Urbano e as autoridades rodoviárias dos estados federais, as primeiras pesquisas objetivando projetar um sistema de gerenciamento que permitisse a gestão das suas principais rodovias.

Baseado na informação disponível das pontes contidas no normativo DIN 1076, bem como ter analisado os diversos sistemas de gestão no mundo, resolveu-se no desenvolvimento de um sistema subsidiado nas informações de cada estrutura existente no banco de dados. A Figura 9 apresenta o fluxograma do sistema de gerenciamento de pontes daquele país (HOST, 2012).

Figura 9 – Sistema de gerenciamento de pontes da Alemanha



Fonte: Host (2012).

Importante destacar que entre 1998 e 1999 alguns países da Europa, tais como, Alemanha, França, Eslovênia, Noruega, Reino Unido e Espanha, constituíram um projeto denominado BRIME (Bridge Management in Europe) que teve como principal objetivo a obtenção de dados relativos à condição das pontes, à taxa de deterioração, à capacidade de carga, ao efeito sobre o tráfego e à vida útil residual dessas estruturas.

A esse respeito, Moscoso (2017) menciona que se destacou como um projeto desenvolvido por laboratórios de pesquisa de rodovias daqueles países, tendo os seguintes módulos:

- Revisões para inspeção
- Módulo de inventário e inspeção
- Organização e Implantação do Banco de Dados
- Processo de Tomada de Decisão

2.2.2.3 Portugal

Segundo Moscoso (2017), o sistema de gerenciamento de Obras de Arte Especiais foi elaborado pela Betar Consultores em 2006. Atualmente, as rodovias federais estão sob a gestão da Estradas de Portugal S.A – EP e as ferrovias estão sob a responsabilidade da Rede Ferroviária Nacional – REFER.

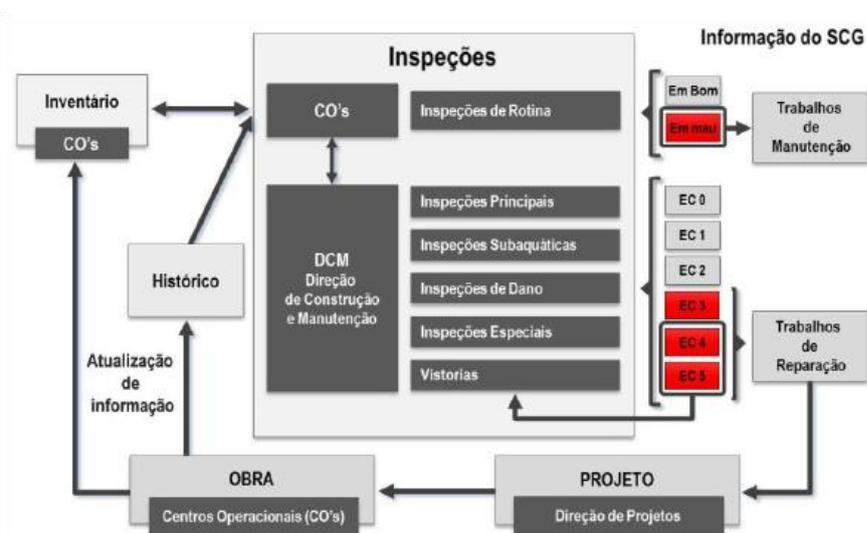
Horta e Freire (2012) definem o Sistema de Gestão de Conservação de Obras de Arte (SGOA) da Estradas de Portugal S.A. (EP) como “uma ferramenta de apoio à decisão implementada com o principal objetivo de definir prioridades de intervenção dimensionadas à realidade da empresa”.

O referido sistema baseia-se nas vistorias executadas pelos profissionais envolvidos na gestão da conservação, estando a sua confiabilidade intimamente ligada à qualidade das avaliações realizadas. A Figura 10 exemplifica o modelo de funcionamento do Sistema de Gestão e Conservação de Obras de Arte, conforme Horta e Freire (2012).

Ainda segundo esses autores, a gestão desse sistema é subsidiada por algumas atividades que são divididas em etapas:

- Inventário / histórico
- Inspeções principais / subaquáticas
- Modelo de previsão / apoio à decisão

Figura 10 – Modelo de funcionamento do SGOA



Fonte: Horta e Freire (2012).

2.3 VIDA ÚTIL, DURABILIDADE, DESEMPENHO, CICLO DE VIDA E CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

Os temas que serão abordados a seguir estão relacionados ou interferem nas condições estruturais, funcionais e de conservação das OAEs. Sendo assim, deverão ser considerados nas etapas de planejamento, de concepção, de execução e de manutenção dessas estruturas.

2.3.1 Vida útil

Nos últimos anos, em decorrência da importância social e econômica desses tipos de construções, diversos pesquisadores vêm se aprofundando no estudo da estimativa de vida útil para pontes e viadutos. A esse respeito, alguns países do mundo visualizam como boa prática a adoção de uma vida útil de projeto entre 100 e 150 anos. Os aspectos relacionados ao planejamento de manutenções e à durabilidade dos materiais devem ser criteriosamente observados. Entretanto, além desses pontos, deve-se dar especial atenção à elaboração de um projeto adequado.

Sendo assim, no tocante à vida útil de OAEs, pode-se dizer que existe uma forte relação entre o projeto adequadamente concebido e a correta especificação dos materiais que serão utilizados, pois isso poderá reduzir custos de manutenção e prolongar a vida útil. Além disso, também existe a intensidade do tráfego e, principalmente, as cargas móveis a que tais estruturas estarão submetidas, e que influenciam diretamente o fenômeno da fadiga que também exerce um importante papel na vida útil das pontes.

Volland *et al.* (2020) classificam a vida útil de duas formas: técnica e econômica. Segundo os autores, o período no qual um determinado elemento ou estrutura não cumpre a função pretendida de maneira razoável é denominado de vida útil técnica. Os mesmos autores afirmam que a vida útil econômica equivale a um período específico em que os custos previstos para recuperação de um elemento ou estrutura excedem os considerados na etapa de projeto.

Segundo Mirza (2015), a Canadian Standard CSA-S6-00 - Canadian Highway Bridge Design Code (CHBDC) define para as pontes e viadutos uma vida útil de 75 anos.

No que tange à expectativa de vida de pontes e viadutos, Srikanth e Arockiasamy (2020) identificaram, por meio de Ford *et al.* (2011), a influência da atribuição do índice de condição e das ações de manutenção preventiva nessas estruturas. O Quadro 8 apresenta as premissas e os resultados decorrentes daquele estudo.

Quadro 8 – Expectativa de vida de pontes conforme Ford *et al.* (2011) apud Srikanth e Arockiasamy (2020)

Autores	Expectativa de vida de pontes
Estes and Frangopol (1999)	Para tabuleiros (Superestrutura) de concreto armado: IC 4 – Entre 24 e 48 anos IC 3 – Entre 29 e 58 anos
	Para infraestrutura de concreto armado: IC 4 – Entre 23 e 42 anos IC 3 – Entre 27 e 50 anos
Jiang and Sinha (1989) – Indiana (USA)	IC 4 – 50 anos IC 3 – 60 anos

Gion <i>et al.</i> (1992) – Indiana (USA)	Para um nível baixo de manutenção: Pontes em concreto – 50 anos Pontes metálicas – 65 anos
Cope (2009) e Sinha <i>et al.</i> (2009) – Indiana (USA)	Pode variar entre 35 e 80 anos dependendo do nível de manutenção aplicado a essas estruturas
Sinha <i>et al.</i> (2005) – Indiana (USA)	Para maiores intervenções (reabilitação) realizadas entre 20 e 25 anos, a estrutura poderá alcançar uma vida útil entre 70 e 80 anos
Massachusetts Infrastructure Investment Coalition (2005) – Massachusetts (USA)	Caso não sejam executadas manutenções de maior porte, a estrutura pode atingir 60 anos de vida útil Previsão de vida útil de 90 anos, se houver intervenções de manutenção em 35 anos, ou 110 anos de expectativa de vida útil, caso haja reabilitação em 50 anos
Thompson and Sobanjo (2010) – Florida (USA)	Para tabuleiros de concreto – 146 anos Para superestrutura de concreto armado (80 anos) e em concreto protendido (até 335 anos)
Hearn and Xi (2007) – Colorado (USA)	Estimou-se a vida útil da estrutura e do tabuleiro da ponte em 56 anos e 19 anos, respectivamente
Zhang <i>et al.</i> (2008) - Chicago (USA)	Para pontes móveis – 75 a 100 anos
NX Infrastructure (2008) – Chicago (USA)	Para tabuleiro de pontes em aço inoxidável – 75 a 120 anos
Hallberg (2005) - Suécia	Estimativa de pontes para alcançar entre 40 e 150 anos
Van Noortwijk and Klatter (2004) – Holanda	Projetadas para alcançar entre 80 e 100 anos
Morcous (2006) – Canadá	Tabuleiros de pontes estimados entre 38 e 45 anos

Fonte: Adaptado de Ford *et al.* (2011) apud Srikanth e Arockiasamy (2020) (Tradução nossa).

2.3.2 Durabilidade

Assim como a vida útil, a durabilidade de pontes e viadutos em concreto armado vem recebendo especial atenção dos pesquisadores, tendo em vista que a sua perda gradual está relacionada a danos na estrutura e em alguns momentos o processo é endógeno, não permitindo uma fácil percepção das anomalias.

Dessa forma, para proporcionar uma maior durabilidade a essas estruturas, aspectos inerentes às fases de projeto e de execução deverão receber atenção especial. A adoção de outras medidas, tais como, monitoramento estrutural e a realização de manutenções regulares têm papel imprescindível, pois ações tardias podem afetar as condições de conservação e de estabilidade. Além disso, é importante evitar a perda de desempenho e, conseqüentemente, que se atinja o Estado Limite Último.

Existem diversas pesquisas relacionadas à durabilidade. Filgueira Filho *et al.* (2021) realizaram uma análise numérica exploratória de algumas metodologias que podem ser aplicadas na etapa de projeto de pontes, com o fito de permitir o alcance da vida útil pré-estabelecida a uma ponte em concreto armado. Para tanto, Filgueira Filho *et al.* (2021),

utilizaram quatro softwares comerciais para obter o cobrimento mínimo necessário para evitar a corrosão das armaduras.

Santarsiero, Masi e Picciano (2021) aplicaram uma estrutura de análise mecanoquímica aos dentes Gerber da Ponte Musmeci em concreto armado, localizada em Potenza, Itália. Os resultados possibilitaram avaliar a capacidade de resistência dos dentes Gerber em três situações: a) no momento da construção, b) após quarenta e cinco anos de construção e c) por um período prolongado de cinquenta anos. Os resultados oriundos desse estudo destacaram a influência da corrosão na capacidade de carga final, assim como no mecanismo de colapso.

Outra pesquisa bastante interessante investigou o impacto atual e a longo prazo das condições climáticas na deterioração das pontes de concreto armado na região centro-oeste dos EUA (KHATAMI e SHAFEI, 2021). O estudo constatou que a abertura das fissuras aumenta à medida que o cenário climático se intensifica, particularmente, no que se refere ao aumento da temperatura média, à exposição, à elevada umidade relativa, e à utilização de sais de degelo oriunda das severas tempestades de inverno.

A FHWA, através do The Second Strategic Highway Research Program - SHRP2 (2015), avaliou a durabilidade de fundações de concreto armado que teve como objetivo a determinação do tipo, da qualidade e o cobrimento de concreto, possibilitando assim a avaliação de deterioração e medidas de mitigação das anomalias.

Huang, Yang e Zeng (2011) propuseram um novo sistema objetivando a avaliação da durabilidade das pontes de concreto existentes por meio de dois indicadores: corrosão de armaduras e defeitos no concreto.

2.3.3 Desempenho

Atualmente estão sendo utilizados indicadores de desempenho para analisar o ciclo de vida de pontes novas e existentes. Na Europa, o Programa Europeu COST ACTION TU 1406, formado por 29 países europeus e seis não localizados na Europa, foi criado em 2015 com o intuito de desenvolver e estabelecer planos de controle de qualidade para pontes rodoviárias, no que concerne à segurança, à manutenção e à gestão das OAEs, objetivando padronizar procedimentos para avaliação de seu desempenho (MATOS e CASAS, 2018; MATOS *et al.*, 2016a, MATOS, CASAS e FERNANDES, 2016).

Em 2019, decorrente do COST ACTION TU 1406 foi publicada uma normatização, a nível europeu, que destaca as especificações de qualidade para as pontes rodoviárias, através da atribuição de 5 notas técnicas, sendo 1 para boa condição e 5 para condição crítica (SANTOS *et al.*, 2022).

Com o avanço da tecnologia, indubitavelmente ficou mais fácil realizar o acompanhamento das estruturas no que concerne ao desempenho e à durabilidade antes mesmo de alcançarem os Estados Limites de Serviço e Último.

Uma das ferramentas mais utilizadas se refere ao Structural Health Monitoring (SHM), ou seja, o monitoramento da saúde estrutural. Para tanto, podem ser obtidas as informações referentes à fluência, às deformações e a variações de temperatura. Como exemplo disso, técnicas geodésicas e de deslocamento podem ser usadas para acompanhamento de torres de pontes de grandes vãos.

A esse respeito, Kaloop e Hu (2016) desenvolveram uma pesquisa que teve a finalidade de investigar os parâmetros e o desempenho dinâmico das torres da Ponte Yonghe (China) baseado na resposta de um monitoramento de integridade por meio de um sistema de posicionamento global (GPS). Os resultados obtidos nesse estudo demonstraram que as cargas provenientes do tráfego têm um impacto significativo sobre os desempenhos semiestático e dinâmico.

Ainda sobre essa questão, estão sendo desenvolvidas pesquisas para analisar não somente o desempenho como um todo, mas sim relacionadas aos aspectos do ciclo de vida e confiabilidade estrutural, os quais serão tratados adiante.

2.3.4 Ciclo de vida

A análise do ciclo de vida de uma ponte trata-se de uma atividade bastante complexa, considerando que não existe muita clareza quanto à metodologia que deverá ser empregada na fase de concepção de projeto, principalmente no que diz respeito aos critérios social, ambiental e econômico que devem ser considerados (GERVÁSIO, 2011).

Dessa forma, deverão ser quantificados os três indicadores supramencionados, de maneira a permitir que sejam realizadas, ao longo do ciclo de vida, as análises estruturais, de tráfego, ambiental, econômica e social, devendo nestas três últimas ser verificadas as incertezas envolvidas.

Em alguns países, as pesquisas sobre ciclo de vida estão sendo vastamente aprofundadas, tornando-se tópicos de bastante interesse no que diz respeito à sustentabilidade, e associadas aos aspectos de custos e aos riscos a que tais estruturas estão suscetíveis.

Kim Hyusink *et al.* (2020) analisaram os impactos da execução de manutenções sobre os custos do ciclo de vida de pontes. O estudo propôs o cenário mais adequado de manutenção para a vida útil das estruturas de concreto de pontes. Para tanto, os autores utilizaram as informações do inventário nacional dos Estados Unidos para constatar alterações na

classificação da condição de estabilidade, além de ter realizado um levantamento dos registros de manutenção no decorrer da sua vida útil.

Rincón, Silva e Villarraga (2019) realizaram um estudo sobre o conceito de flexibilidade nos sistemas de infraestrutura. Nesta análise, os autores verificaram que a adição desse conceito contribui para a mitigação de efeitos indesejados relativos a incertezas, melhorando o desempenho do ciclo de vida da estrutura.

Testes laboratoriais em componentes estruturais (aparelhos de apoio, juntas de dilatação, amortecedores e isoladores sísmicos) utilizados em pontes e viadutos vêm sendo realizados. Sobre esse assunto, Mendez-Galindo, Meng e O'Suilleabhain (2019) verificaram que tais testes podem desempenhar um papel muito importante no controle de qualidade do ciclo de vida de estruturas novas e existentes, por meio da garantia da qualidade, da durabilidade e do desempenho desses componentes.

Dong e Frangopol (2016) investigaram os efeitos do risco em pontes rodoviárias associados a inundações e a terremotos. Ainda segundo os autores, “o risco pode ser definido como o produto da consequência da falha estrutural e a probabilidade de ocorrência de falha”. Nesse tocante, os autores ainda destacam que esse parâmetro está se tornando um importante indicador baseado no desempenho relativo ao projeto e à avaliação de sistemas estruturais expostos a perigos.

Sabatino e Frangopol (2016) afirmam que “a análise compreensiva do procedimento de risco e da sustentabilidade são cruciais na avaliação e, em última instância, na mitigação de consequências prejudiciais da falência estrutural à economia, à sociedade e ao meio ambiente.”

Algumas orientações relativas à etapa de projeto também são apresentadas na pesquisa de Da Silva *et al.* (2016). Nesse estudo, os autores fornecem orientações e recomendações para melhorar o desempenho do ciclo de vida de pontes rodoviárias nas etapas de projeto, construção, operação, processo de final da vida útil e gestão de tráfego.

2.3.5 Confiabilidade estrutural

Sabe-se que existem diversas incertezas que podem comprometer o desempenho de uma determinada estrutura no decorrer da sua vida útil. É por esse aspecto que deverão ser consideradas, principalmente na fase de projeto. Segundo Beck (2019), as incertezas são classificadas em epistêmicas (física e de previsão), intrínsecas (estatística, de decisão, de modelo e fenomenológica) e erro humano.

Segundo o autor, as epistêmicas estão relacionadas com o nosso conhecimento sobre as variáveis e processos envolvidos. No que diz respeito à incerteza intrínseca, afirma que faz

parte dos processos envolvidos, sendo, dessa forma, irredutível. Já o erro humano é considerado como inevitável. Entretanto, há possibilidade de redução por meio de qualificação e treinamento.

A confiabilidade (R) de uma estrutura está relacionada à probabilidade de que não tenha comportamento falho ao exercer suas funções. Destaca-se ainda por avaliar a probabilidade de falha (pf) independentemente do tempo, permitindo obter, inclusive, índices de confiabilidade.

A esse respeito, Beck (2019) define confiabilidade (R) de um produto, componente ou sistema de engenharia como sendo “a probabilidade de que este sistema não falhe, dentro de uma vida de projeto especificada, respeitadas as condições de operação e de projeto.”

Ainda segundo o autor, o conceito de probabilidade de falha estrutural (pf) é definido como “a probabilidade de o sistema falhar, não atendendo às especificações de projeto, dentro de uma vida de projeto especificada, mesmo respeitadas as condições de operação e projeto do sistema.”

As Equações (1) e (2) descrevem a relação de complementação entre conceitos mencionada anteriormente:

$$R = 1 - pf \quad (1)$$

$$pf = P\{S \geq R\} \quad (2)$$

Para determinação dos índices de confiabilidade podem ser utilizados modelos probabilísticos ou métodos estatísticos, os quais têm o objetivo de avaliar as incertezas envolvidas nos projetos de um modo em geral. Nesse sentido, são utilizadas ferramentas como o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM), o Método de Confiabilidade de Segunda Ordem (SORM) e o Método de Simulação Monte Carlo, um dos mais adotados na Engenharia Civil.

A utilização de métodos probabilísticos em diversos países para a avaliação da segurança de pontes existentes se destaca por ser o que existe de mais avançado e representa uma tendência mundial, pela grande quantia de recursos financeiros economizada na adequação de pontes antigas às cargas transmitidas pelo tráfego atual, cujas soluções não seriam possíveis com a adoção dos métodos tradicionais, baseados nos processos determinísticos ou semiprobabilísticos que são utilizados nos projetos de pontes novas (VITÓRIO, 2015a).

Diversas pesquisas em nível internacional estão sendo realizadas. Pukl *et al.* (2016) descrevem no seu estudo que a análise não linear é uma metodologia bem estabelecida para fins de avaliação da segurança de pontes rodoviárias.

Esses autores ainda mencionam que a associação de análise numérica não linear com métodos estocásticos de simulação se caracteriza como uma ferramenta importante para avaliar o comportamento estrutural e a confiabilidade dessa tipologia construtiva. Para tanto, eles utilizaram o software SARA.

Em pesquisa desenvolvida por Inkoom e Sobanjo (2019), utilizando 20 anos de dados históricos de inspeção de pontes situadas na Flórida, foram empregados os critérios de confiabilidade para identificar e classificar os componentes de estruturas de pontes no tocante à deterioração.

Mankar *et al.* (2019) apresentaram uma estrutura de confiabilidade probabilística para avaliação da fadiga em lajes de pontes de concreto existentes através do uso de dados de monitoramento. Os autores realizaram um estudo de caso para a armadura de laje de concreto armado do Viaduto Crêt de l'Anneau, tendo realizado também a aferição de fatores de segurança parciais de resistência para o prolongamento da vida útil da estrutura.

Em estudo semelhante, Jeong *et al.* (2017) criaram uma metodologia para determinar a vida útil de uma ponte, ou de conjunto de pontes, baseada em um modelo determinístico por sua vez fundamentado no índice de condição (IC) dessa estrutura associado à qualidade da inspeção. Tal estudo utilizou resultados de quase dez anos de classificação de condições de pontes e desenvolveu um modelo de regressão não linear que leva em consideração o índice de confiabilidade da inspeção (Inspection Reliability Index - IRI).

Koteš e Vičan (2012) analisaram os níveis de confiabilidade para avaliação de pontes existentes de acordo com os Eurocódigos. O estudo abordou os resultados sobre níveis modificados de confiabilidade, tendo sido determinados por intermédio da idade e do tempo de vida restante planejado das pontes. Ainda sobre o assunto, foram apresentadas as principais diferenças entre a avaliação de pontes existentes e recém-projetadas. Foi possível também determinar os fatores de segurança parciais de materiais e cargas dos níveis de confiabilidade modificados.

Já Bugge (2014) analisou a confiabilidade estrutural da Ponte Hardanger, tendo utilizado o Método Monte Carlo e os multicritérios do modo de vibração com o Estado Limite.

3 AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS EXISTENTES

A avaliação das condições de estabilidade e funcionalidade de pontes e viadutos existentes trata-se de um tema que tem merecido nos últimos anos a atenção de pesquisadores de vários países do mundo. Isso é plenamente justificável pela necessidade da adoção de providências urgentes para restauração das malhas viárias que passam por um processo de envelhecimento, em um cenário de carência de recursos financeiros para o investimento em infraestrutura rodoviária, inclusive em Obras de Arte Especiais que pela própria natureza são estruturas caras e difícil substituição.

O problema torna-se mais complexo quando se constata a escassez de literatura técnica especializada sobre o tema, o que dificulta bastante os procedimentos das avaliações, que são geralmente feitas com o uso dos critérios previstos em normas para dimensionamento de novas estruturas, como é o caso do Brasil.

Considerando que a avaliação da segurança de uma ponte existente é bem mais complexa do que a determinação da segurança de uma ponte nova, isso pode levar a uma avaliação equivocada quanto à segurança real da estrutura e, evidentemente, a um nível de confiabilidade não satisfatório.

Partindo do pressuposto que a degradação reduz ao longo do tempo as características de resistência e, conseqüentemente, os níveis de segurança e de funcionalidade dos seus componentes estruturais, é de fundamental importância que se realize não somente um diagnóstico isolado de determinada OAE, pois a segurança e a confiabilidade precisam ser asseguradas por inspeções regulares, ensaios de caracterização dos materiais, avaliações e monitoramentos estruturais que permitem retratar de modo mais realista o comportamento da obra sob as condições de uso a que está submetida.

Nesse sentido, este capítulo mostrará as abordagens atualmente adotadas para avaliação de OAEs existentes, destacando os métodos mais utilizados.

3.1 MÉTODOS MAIS UTILIZADOS PARA AVALIAÇÃO DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS EXISTENTES

Diferentemente do processo de dimensionamento de novas estruturas, o procedimento para análise da segurança de pontes existentes requer um tratamento de dados diferenciado.

Sabe-se que a incerteza em um processo de avaliação de segurança de obras existentes é ainda maior do que no dimensionamento de novas estruturas, tendo em vista que as informações referentes aos projetos, à frequência e ao registro de inspeções e manutenções

executadas em pontes e viadutos existentes quase não estão disponíveis por parte dos órgãos gestores, tornando difícil realizar uma avaliação mais precisa dessas estruturas.

No Brasil, essa questão fica ainda mais complicada, pelo fato de a análise das condições de conservação e segurança de pontes não ser uma atividade rotineira e haver uma insuficiência na produção do conhecimento sobre o tema, principalmente no que se refere a pesquisas, a normas técnicas específicas e a publicações em geral.

Os métodos de avaliação das condições de segurança podem ter abordagem determinística, semiprobabilística e probabilística, além dos métodos de engenharia, conforme descrições a seguir.

3.1.1 Abordagem determinística

Nesse caso, a avaliação baseia-se no método de ruptura, utilizado nas antigas normas para o dimensionamento de estruturas, que tem um coeficiente de segurança para as incertezas da variabilidade da resistência e ações. Esta abordagem não considera corretamente essas incertezas associadas às resistências e às solicitações (MOREIRA, 2014). Por esses aspectos, tal abordagem vem sendo considerada inadequada e conservadora (VITÓRIO, 2015b).

Embora alguns pesquisadores possam citar o Método dos Fatores como determinístico, esse se baseia na análise da degradação de fatores que pode ser traduzida quantitativamente em valores e funções para expressar a vida útil residual de componentes das estruturas (CHEN, HUAN e HSU, 2017). Contudo, tal método possui uma fundamentação probabilística que será abordada no Capítulo 4.

Outra abordagem determinística se refere à utilização de análise de regressão linear. Esse método permite o desenvolvimento de relações não lineares, bem como destaca-se pelo fácil entendimento e aplicação (HASSAN, LIN e THANANJEYAN, 2017). Osorio-Lird *et al.* (2017) e Transportation Association of Canada (TAC, 2013) ressaltam ainda que o incremento e a eficiência de modelos de desempenho que utilizam tal ferramenta estão sujeitos ao registro de dados históricos importantes, inclusive a condição ao longo do tempo e idade do pavimento.

O uso das técnicas de regressão também vem sendo bastante difundido para investigação da influência das variáveis na atribuição de notas técnicas às superestruturas e aos tabuleiros das pontes.

A esse respeito, Kim Ki *et al.* (2020) propôs a aplicação de análise de regressão linear simples para verificar quais os fatores que podem afetar a vida útil do tabuleiro de pontes.

Srikanth e Arockiasamy (2021) investigaram os efeitos de algumas variáveis através da abordagem de análise de regressão multivariada. Hasan e Elwakil (2021; 2020; 2019a; 2019b)

também utilizaram em suas pesquisas as técnicas de regressão para verificar a relação dessas variáveis na imputação de notas técnicas aos tabuleiros das pontes. Adriano e Chua (2017) desenvolveram um modelo matemático, através de regressão linear, para calcular o índice de condição de uma ponte e estimar a sua vida útil.

Ghonima (2017) aplicou regressão logística a 3296 observações extraídas de um banco de dados com o objetivo de avaliar parâmetros ambientais e estruturais, assim como analisar como tais parâmetros afetam a deterioração do tabuleiro da ponte.

Agrawal, Kawaguchi e Chen (2008, 2010), em suas pesquisas, destacaram alguns dos métodos determinísticos mais utilizados para avaliar as taxas de deterioração de pontes.

3.1.2 Abordagem semiprobabilística

Esse tipo de abordagem tem como referência os coeficientes parciais de segurança previstos pelas normas atuais para o dimensionamento de obras novas, baseando-se nos Estados Limites.

Tais coeficientes foram ajustados para que determinada estrutura atenda aos parâmetros de resistência e solicitações preconizadas pelo grau de confiabilidade pretendido e, apesar de ser utilizado também para a avaliação de pontes existentes, é conservador e não é apropriado para realizar tal avaliação a essas estruturas (VITÓRIO, 2015b; MOREIRA, 2014).

Embora essa abordagem proporcione uma demanda de tempo e diversos cálculos necessários para sua efetivação, alguns autores a vêm utilizando. Novak e Novak (2020) associaram a abordagem semiprobabilística ao método de elementos finitos não lineares e coeficientes de variação, objetivando a estimativa do valor de projeto da resistência.

Sifre e Lenner (2021) utilizaram esse tipo de abordagem com a calibração dos fatores de carga para avaliação de pontes existentes. Os autores verificaram que reduções dos efeitos da carga estática determinadas em projeto poderão ser efetuadas, mantendo-se os níveis de segurança prescritos.

Ebrahim e Abdel-Jawad (2020) aplicaram a teoria de confiabilidade, através do software MATLAB, a um modelo semiprobabilístico para fins de previsão da vida útil remanescente das estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão por carbonatação.

3.1.3 Abordagem probabilística

Assim como os modelos semiprobabilísticos, a abordagem probabilística também se baseia nos Estados Limites (MOREIRA, 2014).

Pode ser parcialmente probabilística, com o uso de métodos simplificados nos quais as variáveis são definidas pela média e desvio padrão, sendo definida uma função Estado Limite onde a segurança é garantida pela probabilidade dessa função não ser atingida.

Também pode ser uma abordagem puramente probabilística com os parâmetros de incerteza (geometria, ações, resistência, dentre outros) considerados por meio de variáveis aleatórias, sendo a probabilidade de falha obtida por meio das funções de probabilidade de cada parâmetro. Este tipo de avaliação é o mais avançado e há uma tendência mundial da sua utilização (VITÓRIO, 2015b).

A publicação do Probabilistic Model Code (2001) tornou mais acessível o conhecimento sobre a análise probabilística de uma grande variedade de estruturas, por meio da definição dos modelos probabilísticos para as ações, para as características mecânicas dos materiais e para a geometria das estruturas.

A Figura 11 apresenta as três abordagens mencionadas anteriormente, destacando ainda as representações esquemática e gráfica em relação às variáveis de entrada e saída no processo de degradação ao longo do tempo do concreto segundo Possan, Dal Molin e Andrade (2018).

Figura 11 – Representação esquemática e gráfica das variáveis de entrada e saída no processo de degradação do concreto ao longo do tempo

Kind of approach	Schematic representation of input variables (x_i) and output ones (y_i)	Graphical representation of the effect of input variables applied to concrete degradation in time (t_n)
<i>Deterministic (a)</i>		
<i>Probabilistic (b)</i>		
<i>Semi-probabilistic (c)</i>		

Fonte: Possan, Dal Molin e Andrade (2018).

Segundo o relatório técnico da Australasian Road Transport and Traffic Agencies (AUSTRROADS, 2015), os modelos estocásticos podem ser classificados em: Markov, SemiMarkov, Sobrevivência Weibull, híbridos Markov-Weibull e de deterioração por processo Gamma. Alguns desses modelos serão apresentados mais adiante.

3.1.4 Abordagem através de Métodos de Engenharia

Além das abordagens anteriores, existem os métodos de engenharia os quais permitem avaliar as estruturas através da modelagem do desempenho de seus elementos para um certo grupo de agentes de degradação. Dominicini e Calmon (2017) elaboraram uma pesquisa que abordou um modelo computacional de penetração de cloretos por difusão em estruturas de concreto armado, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) no domínio bidimensional, prevendo assim, o tempo necessário que os agentes agressivos (cloretos) consigam despassivar a armadura.

Outro estudo bastante interessante desenvolvido por Ghodoosi *et al.* (2018) apresentaram um modelo baseado em resultados do uso da técnica não destrutiva denominada Ground Penetrating Radar – GPR, a qual permitiu analisar o nível de confiabilidade do tabuleiro de uma ponte no Canadá, através da modelagem não-linear (Modelagem de elementos finitos – MEF).

3.2 AVALIAÇÃO DE PONTES EXISTENTES NO BRASIL

No Brasil, não existe literatura técnica voltada especificamente à avaliação da segurança de pontes existentes. De modo geral, são utilizados os métodos semiprobabilísticos das normas vigentes para o cálculo de pontes novas, adotando-se um procedimento que contempla geralmente inspeções visuais, alguns ensaios de materiais, análise estrutural (linear elástica) e, algumas vezes, prova de carga estática. Raramente são realizados ensaios dinâmicos.

O Manual de Recuperação de Pontes e Estruturas do DNIT (2010) comenta que a norma estrutural de obras novas não deve ser usada diretamente para a avaliação da segurança de pontes existentes e que devem ser adotadas as seguintes diretrizes: critérios de avaliação, propriedades estruturais e cargas, avaliação dos resultados da inspeção, análise estrutural e critérios de avaliação

A última versão da norma de projetos de pontes, ABNT NBR 7187:2021 – Projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto, editada em 21/07/2021, incluiu um anexo para a avaliação de pontes existentes (Anexo D). Não se enquadram nesse anexo as estruturas recém-construídas, recém-recebidas ou as que estão no início da operação.

A inclusão na norma de projeto de pontes de um anexo destinado à avaliação de obras existentes significa um primeiro passo, ainda que preliminar, para elaboração de uma literatura mais abrangente que permita avaliar de forma mais precisa as condições de segurança das pontes que fazem parte do sistema viário brasileiro.

De acordo com a ABNT NBR 7187 (2021), as seguintes premissas deverão ser observadas para avaliação de OAEs existentes:

- As pontes existentes devem ser acompanhadas por meio de inspeção especial, com periodicidade estipulada pela ABNT NBR 9452 (2019);
- Para anomalias que afetam a durabilidade, deve ser realizada intervenção corretiva conforme a ABNT NBR 9452 (2019);
- No caso de identificação de anomalias que possam comprometer os aspectos de estabilidade e segurança estrutural, uma verificação numérica deve ser realizada para compreender seu comportamento estrutural, bem como indicar as intervenções necessárias;
- Para situações em que não existam projetos originais executivos e sem detalhes construtivos suficientes para embasar uma análise completa do comportamento da estrutura, a ponte deverá ter o seu projeto reconstituído utilizando critérios, recomendações e norma da época da sua construção, e em seguida ser verificada para as condições atuais de esforços e normas vigentes.

A critério do profissional responsável pela verificação pode ser necessário realizar investigações adicionais, como provas de cargas, aberturas de pontos de inspeção da armadura existente e ensaios não destrutivos.

Para o caso de pontes existentes em bom estado, quando a verificação estrutural não identificar limitação estrutural coerente com a anomalia observada, sendo necessário apenas intervenções para recuperação dos requisitos de durabilidade, é permitido adotar reduções nos coeficientes de majoração de esforços, quando forem atendidas as seguintes condições:

- a) Quando a obra apresentar parâmetros estruturais e de durabilidade com classificação igual ou superior a 4, obtida em inspeção especial, conforme a ABNT NBR 9452 (2019), sempre condicionando a confirmação de classificação estrutural mediante uma verificação estrutural.
- b) Casos em que não exista limitação de acesso a todos os elementos estruturais, a menos que se adotem outras providências destinadas a sanar essa deficiência.

c) Quando a obra demonstrar um bom comportamento estrutural, no mínimo ao longo de 30 anos após o início de operação, correspondente à parte significativa de sua vida útil, obrigatoriamente comprovado por meio de verificação estrutural.

Atendidos os requisitos acima, poderão ser adotados nas pontes rodoviárias os seguintes coeficientes de majoração de esforços:

- Para as ações permanentes agrupadas: $\gamma_g = 1,20$
- Para as ações variáveis: $\gamma_q = 1,35$

De acordo com a ABNT NBR 7187 (2021), as obras liberadas com essas condições devem passar por inspeções com periodicidade definidas pelo profissional responsável pela avaliação.

3.3 SITUAÇÃO EM OUTROS PAÍSES

Diversos países dispõem de normas, regulamentos e outros dispositivos que permitem a avaliação da segurança de pontes existentes, como o Canadá, Estados Unidos, Dinamarca, República Tcheca, Reino Unido, além de outros países da Europa.

Na União Europeia, onde esse tema tem sido tratado com a maior importância, foram financiados nas três últimas décadas alguns projetos de pesquisa voltados para a conservação, segurança e gestão de pontes, cujos relatórios finais recomendaram a avaliação estrutural em cinco níveis com complexidade crescente, começando pelo mais simples (nível 1), que usa o modelo das normas de projetos de estruturas novas, até o mais sofisticado (nível 5) que combina a análise não linear com a análise probabilística.

O Quadro 9 mostra os cinco níveis de avaliação propostos pelos projetos BRIME (2001) e COST 345 (2004).

Quadro 9 – Níveis de segurança de pontes existentes

Nível	Modelos de resistência e ações	Modelos de análise	Métodos de avaliação
1	Como definido na norma em vigor	Modelos simples. Regime elástico linear	Método dos fatores parciais de segurança com os coeficientes iguais ao dimensionamento
2			
3	Modelos de ações e resistências a partir de ensaios	Modelos refinados. Pode-se redistribuir esforços, dentro dos limites da ductilidade da estrutura	Modificação dos coeficientes de segurança
4			
5	Modelos probabilísticos para todas as variáveis		Análise puramente probabilística

Fonte: Adaptado de BRIME (2001) e COST 345 (2004).

3.4 MÉTODOS PROBABILÍSTICOS MAIS USADOS NA AVALIAÇÃO DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS

Os métodos probabilísticos vêm ganhando grande aceitação por parte da comunidade técnica e acadêmica, pois, conforme dito anteriormente, são mais realistas e reduzem as incertezas envolvidas no processo de avaliação de uma estrutura. Navarro López (2020), em sua pesquisa, destaca as vantagens e limitações das várias metodologias utilizadas nos modelos probabilísticos para a avaliação de estruturas, conforme descritos a seguir. Tais métodos também são denominados como modelos de deterioração.

3.4.1 Modelo de Markov

O Modelo de Markov pode ser descrito como um processo aleatório o qual permite caracterizar o comportamento de um sistema ao longo do tempo com conceitos probabilísticos perfeitamente definidos. Tal processo pode ser classificado como discreto ou contínuo, tendo em vista que o tempo é considerado como uma variável e pode ter sua natureza discreta, sendo $X(t)$, $t=0, 1, 2, \dots$ ou contínuo, sendo $X(t)$, $t>0$ (DE LIMA, GRECO e PEREIRA, 2018).

Dessa forma, o Modelo de Markov se caracteriza como discreto no tempo e nas variáveis, uma vez que as notas técnicas atribuídas nas vistorias se destacam por possuírem natureza discreta (DE LIMA, GRECO e BITTENCOURT, 2019). Esses mesmos autores afirmam que, ao estudar o processo de Markov em cadeia, é possível verificar a probabilidade de uma determinada ponte manter sua nota técnica (Índice de condição) ou modificá-lo em um intervalo de tempo fixo Δt .

Um aspecto importante no que tange às variáveis, foi abordado por Madanat *et al.* (1995). Os autores afirmam que, mesmo que o processo de degradação tenha caráter contínuo, a suposição das notas técnicas como variáveis discretas é vastamente empregada para avaliação da condição estrutural, diminuindo as dificuldades relacionadas ao constante monitoramento desse processo.

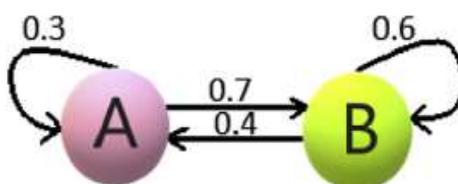
Oliveira *et al.* (2017) afirmam que esse modelo possui um caso particular também conhecido como Cadeia de Markov, sendo adequada e vastamente usada para fins de desenvolvimento de modelos estatísticos de degradação no que concerne aos materiais empregados em obras de infraestrutura, tais como, pavimentos, edifícios, dentre outros. Os autores ainda destacam que é possível a aplicação desse método em um conjunto de dados que possa ser obtido em inspeções regulares, ou seja, que haja uma periodicidade de atualização do seu banco de dados.

Tendo em vista que muitos dos softwares utilizados em sistemas de gerenciamento de pontes (Bridge Management Systems – BMS) usam tais ferramentas para modelar a deterioração ao longo do tempo de uma ponte ou de seus elementos, considera-se esse método de análise de deterioração o mais usado para prever o status das OAEs (HENRIQUES *et al.*, 2019; DE LIMA, GRECO e BITTENCOURT, 2019; TRAN *et al.*, 2018; ZAMBON *et al.*, 2017; ZANINI, FALESCHINI e PELLEGRINO, 2016; MAŠOVIĆ e HAJDIN, 2014).

A Equação (3) apresenta a probabilidade de transição de um elemento do estado i em um tempo inicial para um estado j em um tempo Δt e a Figura 12 destaca a representação da Cadeia de Markov contendo os estados A e B e os respectivos números que representam as probabilidades de transição (SRIKANTH e AROCKIASAMY, 2020).

$$P(\Delta t)_{ij} = \Pr(X_{\Delta t} = j | X_0 = i) \quad (3)$$

Figura 12 – Representação da Cadeia de Markov



Fonte: Srikanth e Arockiasamy (2020).

Frangopol, Dong e Sabatino (2016) afirmam que o elemento principal da Cadeia de Markov é a matriz de transição a qual especifica a probabilidade que o estado de um componente muda para outro estado dentro um período especificado. Os autores destacam ainda que a atribuição de um índice de condição para classificar a estabilidade de uma ponte se trata de medida subjetiva, não podendo apresentar a real capacidade de carga dos elementos estruturais.

A estrutura da matriz ($n \times n$) de transição de probabilidade (Transition Probability Matrix - TPM) está apresentada na Equação (4). Cada elemento p_{ij} exprime a probabilidade de uma nota técnica da ponte mudar de i para j no decorrer de certo intervalo de tempo (Δt).

$$P = [P_{ij}] = \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Após utilizar a distribuição Weibull e a abordagem de cadeias de Markov para calcular as taxas de deterioração de componentes de pontes no Estado de Nova Iorque empregando dados históricos de inspeção, Agrawal, Kawaguchi e Chen (2010) observaram que a abordagem baseada em Weibull apresentou um melhor desempenho no que tange às condições observadas quando aplicadas as cadeias de Markov.

É possível ainda empregar os modelos probabilísticos para obtenção de curvas de deterioração de pontes e viadutos. Saeed *et al.* (2017a) desenvolveram uma metodologia para modelagem probabilística da condição de pontes rodoviárias. Através desse modelo, foi possível proceder à simulação de alguns cenários por meio de curvas de deterioração probabilísticas para os elementos da superestrutura e infraestrutura.

3.4.2 Simulação Monte Carlo

Trata-se de um método de simulação numérica que proporciona a resolução de problemas complexos de maneira simplificada. Outro aspecto importante desse método se refere à possibilidade de controlar o erro vinculado à avaliação da probabilidade de falha. Moreira (2014) menciona que esse método não deve ser utilizado em avaliações de segurança de estruturas existentes, em decorrência da grande necessidade de amostras para obtenção de pequenas probabilidades de falha.

Algumas pesquisas estão sendo realizadas através da associação da Simulação Monte Carlo a outros modelos de deterioração. Osorio-Lird *et al.* (2017) executaram uma pesquisa na qual foi aplicada a Simulação Monte Carlo às cadeias de Markov para fins de desenvolvimento de modelos de desempenho para gerenciamento de pavimento urbano.

Ainda sobre a utilização de mais de uma metodologia probabilística, Abu Dabous e Al-Khayyat (2018) desenvolveram um método de avaliação de ponte baseado em raciocínio analítico evidencial (ER) e Simulação Monte Carlo. Tal método utiliza a abordagem ER que trata as avaliações de condição como graus de avaliação probabilística. Esse método integra a técnica de simulação Monte Carlo com a abordagem ER para melhorar a classificação da condição de ponte, eliminando a subjetividade na avaliação das notas técnicas atribuídas inicialmente.

Naderpour, Kheyroddin e Mortazavi (2019) avaliaram o risco de projeto para construção de pontes iranianas por meio da técnica de simulação Monte Carlo. Através dessa implementação, foi possível identificar que o risco financeiro influenciou negativamente os projetos de pontes.

3.4.3 Redes Neurais Artificiais

As redes neurais artificiais (RNAs) são classificadas como tipos de modelos de inteligência artificial (AI) que utilizam técnicas computacionais para fins de entendimento sobre algo específico.

Segundo Santos *et al.* (2022) e Oliveira, Neto e Tavares (2007), a composição das RNAs foi influenciada pela estrutura do cérebro humano que permite reconhecer, realizar associações e generalizar padrões, com o intuito de expor particularidades indispensáveis à análise de modelagens complexas por meio de técnicas computacionais tradicionais.

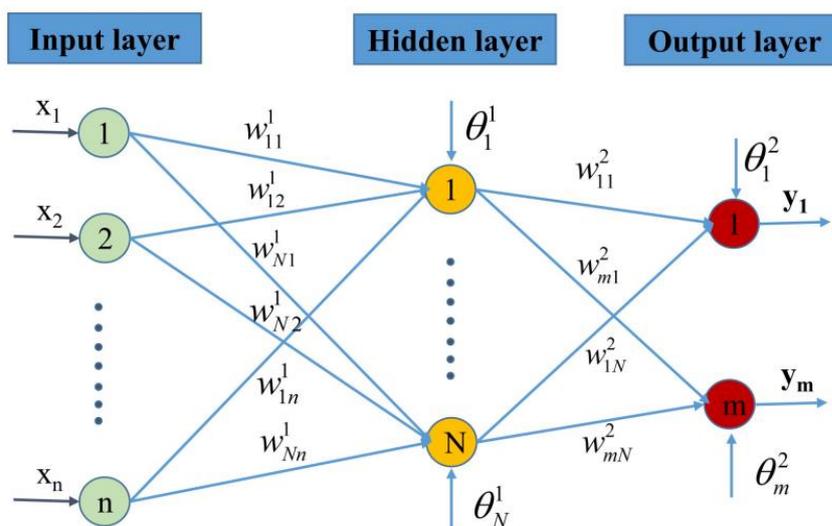
Mangalathu, Heo e Jeon (2018) afirmam, de maneira análoga, que se trata de uma técnica baseada em uma grande conexão de unidades simples chamadas neurônios, semelhantes aos axônios contidos no cérebro humano. Ainda segundo os mesmos autores, as RNAs são compostas por três camadas de neurônios: entrada (à esquerda da rede), oculta (intermediária) e saída (à direita da rede). Em sua pesquisa, os autores aplicaram as redes neurais artificiais com uma metodologia baseada na multidimensionalidade para obtenção de fragilidades de pontes esconsas de concreto.

Outro estudo interessante sobre a aplicação de redes neurais artificiais a pontes se refere ao efetuado por Fathalla, Tanaka e Maekawa (2018). Os autores desenvolveram uma metodologia para estimar a fadiga residual de tabuleiros de pontes em concreto armado. Para isto, basearam-se nos padrões de trincas superficiais observadas em inspeções locais, tendo sido confirmado que a localização, orientação e largura da fissura são consideradas como fatores principais na vida residual.

Miao (2021) aplicou a pontes existentes uma metodologia a qual associou uma rede neural artificial ao método de análise de sensibilidade com o objetivo de estimar a deterioração e determinar a periodicidade de inspeção e o tempo ideal de manutenção. No que se refere a este último aspecto, o autor afirmou que uma rede neural artificial pode auxiliar no planejamento das ações de manutenção, além de estabelecer as relações entre os fatores potenciais e as notas técnicas de deterioração das pontes para fins de previsão da sua deterioração.

A Figura 13 mostra a estrutura de uma rede neural artificial representada pelas três camadas (entrada, saída e intermediária) conforme Nguyen *et al.* (2021).

Figura 13 – Modelo de rede neural artificial



Fonte: Nguyen *et al.* (2021).

3.4.4 Modelo Bayesiano

Além dos métodos anteriormente mencionados, também são usadas as abordagens bayesianas as quais são fundamentais na aplicação a modelos probabilísticos para fins de avaliação da confiabilidade de estruturas existentes. O componente basilar do modelo bayesiano respalda-se na atribuição de probabilidades a todas as quantidades desconhecidas.

Li e Jia (2020) desenvolveram em sua pesquisa uma estrutura bayesiana que permitiu incorporar dados completos e incompletos de inspeção da condição de pontes, a fim de calibrar parâmetros de modelos estatísticos utilizados para investigar o tempo que determinada ponte ou componente estrutural permanece na classificação de condição de estabilidade.

Esses autores ainda destacaram a importância da inserção de dados incompletos para selecionar o modelo mais adequado para avaliar a condição de degradação dessa tipologia construtiva, especialmente quando há poucos dados completos e as informações incompletas retratam uma expressiva parcela do conjunto de elementos disponíveis.

Jacinto, Neves e Santos (2015) desenvolveram um estudo no qual associaram métodos simples aos bayesianos, por meio de análise probabilística, para avaliar uma ponte existente. No final da pesquisa, eles afirmaram que os métodos bayesianos garantem que a incerteza ocasionada pela utilização de uma pequena amostra coletada na estrutura é sempre considerada.

Tais métodos já foram empregados para combinar informações obtidas em inspeções e análise de especialistas da engenharia (ENRIGHT e FRANGOPOL, 1999).

Alguns dos modelos mencionados anteriormente não foram desenvolvidos nessa pesquisa devido à sua inaplicabilidade, haja vista a dificuldade de obtenção de informações regulares das inspeções visuais.

Considerando que esta pesquisa de doutorado tem o fito de estimar a vida útil de 98 OAEs localizadas nas rodovias federais do Estado de Pernambuco, o próximo capítulo será dedicado ao detalhamento do Método dos Fatores e das Técnicas de Análise de Sobrevivência. Ao final da pesquisa, também será efetuada uma análise comparativa entre os resultados entre as duas metodologias acima mencionadas e o normativo DNIT (2004a). Os conceitos pertinentes à norma DNIT (2004a) foram devidamente apresentados no Capítulo 2.

4 ANÁLISE DE SOBREVIVÊNCIA, MÉTODO DOS FATORES E MÉTODO DELPHI

A previsão da vida útil das estruturas de concreto em geral vem sendo objeto de estudo por vários pesquisadores em todo o mundo, com atenção especial para as obras submetidas aos agentes agressivos do meio ambiente, como as estruturas offshore e as pontes e viadutos.

As OAEs apresentam a particularidade de terem a vida útil reduzida pelo funcionamento inadequado de componentes específicos como juntas de dilatação, aparelhos de apoio, drenos do tabuleiro, porosidade e defeitos do pavimento, etc., que, de modo geral, possuem vidas úteis inferiores à da estrutura da ponte e se tornam elementos geradores das manifestações patológicas que aceleram o processo de deterioração e, como consequência, a redução da durabilidade e vida útil da estrutura.

Considerando que as OAEs também se caracterizam pela grande importância quanto aos impactos financeiros para os órgãos gestores, e em última análise, para a sociedade. A busca pelo conhecimento que possa subsidiar as ações relacionadas às futuras manutenções, bem como às melhores soluções de intervenções preventivas e corretivas têm sido objeto de diversas pesquisas relativas ao tema que estão sendo atualmente desenvolvidas, principalmente em nível internacional, com destaque para a Europa, algumas delas transformadas em manuais, normas e outras publicações específicas.

Por isso, torna-se importante aplicar os conceitos de durabilidade e de vida útil como fatores prioritários que devem iniciar na etapa de elaboração dos projetos e ter continuidade ao longo do ciclo de vida dessas estruturas.

Nesse sentido, este capítulo fará a abordagem dos conceitos teóricos e das aplicações de duas metodologias quando utilizadas para a estimativa de vida útil voltada para a manutenção de pontes e viadutos. Trata-se do Método dos Fatores sob a ótica da ISO 15.686 (2011) e da Análise de Sobrevivência.

4.1 ANÁLISE DE SOBREVIVÊNCIA

A análise de dados de duração ou vida, também conhecida como análise de sobrevivência, é uma categoria de análise estatística que modela o tempo até à ocorrência de um evento de interesse (GOYAL, 2015). Na área da medicina, a ocorrência desse evento é comumente definida como uma falha, a qual pode ser entendida como a morte, a reincidência de determinada doença, assim como a verificação do efeito de um tratamento em algum paciente. Sendo assim, o tempo observado é denominado tempo de falha (T).

Uma vez que essa técnica estatística vem sendo bastante empregada na área de confiabilidade de pontes (DAS e SIL, 2020; NABIZADEH, TABATABAI E TABATABAI, 2019; TABATABAI, NABIZADEH e TABATABAI, 2018; TABATABAI, LEE e TABATABAI, 2016; TABATABAI, LEE e TABATABAI, 2015; TABATABAI, TABATABAI e LEE, 2011) para, por exemplo, determinar o tempo para o início da corrosão, verificar o tempo até a fissuração de determinado elemento estrutural, e o tempo para o fim da vida útil de tabuleiros de pontes (TABATABAI, TABATABAI e LEE, 2011).

Neste item serão abordados os conceitos gerais da análise de sobrevida, bem como a concepção de censura. Além disso, será apresentado o estimador de Kaplan-Meier para o tempo de sobrevida e suas características, bem como algumas funções de distribuição de probabilidade usadas na modelagem dos resultados de variáveis explicativas no tempo de sobrevida. Informações mais detalhadas sobre essa temática poderão ser verificadas na pesquisa de Dey, Mukherjee e Chakraborty (2020).

4.1.1 Conceitos Gerais

Segundo Stevens *et al.* (2020) e Balakumaran e Weyers (2020), a análise de sobrevivência consiste em um conjunto de métodos estatísticos utilizados para prever e modelar o tempo para a ocorrência de um determinado evento. O tempo, neste caso, é denominado por T (tempo de falha) e considerado como variável resposta.

Também denominadas de técnicas de análise de sobrevida, têm sido bastante utilizadas na área biomédica (NABIZADEH, TABATABAI e TABATABAI, 2018), assim como em engenharia, ciências, antropologia, engenharia social, e outros campos, onde os eventos podem estar relacionados, por exemplo, ao fim da vida útil, ao fracasso, à morte, à doença, ao divórcio, ao desemprego, à expiração dos alimentos, e a demais eventos do gênero (BALAKUMARAN e WEYERS, 2020).

Como mencionado anteriormente, sabe-se que tal metodologia é vastamente empregada na área médica. Entretanto, segundo Tabatabai, Nabizadeh e Tabatabai (2018), Nabizadeh, Tabatabai e Tabatabai (2018) e Tabatabai, Tabatabai e Lee (2011), as terminologias “sobrevivência” equivalente à “confiabilidade” usada na engenharia e “risco” utilizada em análise de sobrevivência a qual é análoga ao “tempo de falha” são frequentemente substituídas para uma melhor compreensão e utilização na engenharia.

4.1.1.1 Censura

Wang, Li e Reddy (2019), Moore (2016) e Borges (2014) afirmam que ao longo de determinado estudo através das técnicas de análise de sobrevivência, os eventos de interesse podem não ser observados durante o intervalo do período de ocorrência da falha, resultando assim em observações incompletas. Este fato é comumente verificado na estimativa da deterioração de uma ponte por meio da classificação do seu índice de condição, por exemplo, a qual poderá causar um desvio entre o resultado da estimativa e a sua situação real (HE *et al.*, 2020; GOYAL, 2016).

Dessa forma, uma das principais vantagens de utilizar a análise de sobrevivência em comparação a outros modelos é a possibilidade de lidar com observações censuradas (BALAKUMARAN e WEYERS, 2020).

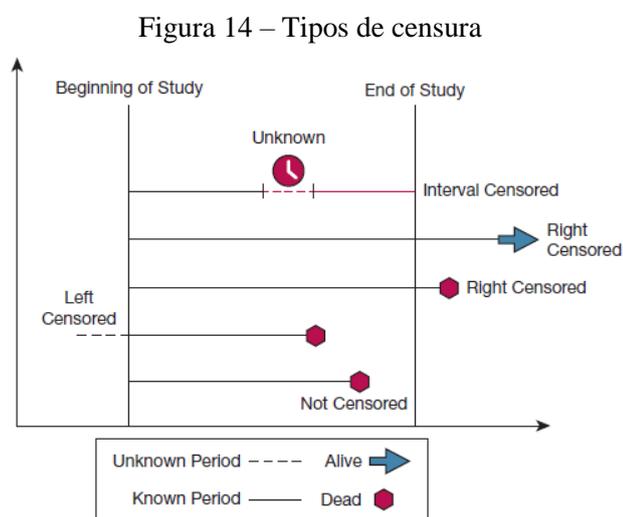
No que se refere à censura, pode ser dividida em três grupos conforme o que segue:

- Censura à direita – Trata-se do tipo de censura mais comum em pesquisas, sendo o ponto inicial do intervalo de observação conhecido (HE *et al.*, 2020). Segundo Stevens *et al.* (2020) ocorre quando a classificação do estado da ponte ainda não atingiu um determinado valor no momento da sua inspeção. Em linhas gerais, tomando-se por base a diferença do ponto final em relação ao início da observação, a censura à direita pode ser dividida em tipo I, tipo II e tipo III (MOORE, 2016):
 - Tipo I - Os tempos de censura são pré-especificados. A título de exemplo, podem-se citar pacientes que não tenham experimentado o evento de interesse antes do final do estudo, sendo estes considerados censurados;
 - Tipo II - Quando há ocorrência de um determinado número de falhas pré-determinado. He *et al.* (2020) afirma que esse tipo de censura ocorre quando a observação não termina até que os resultados do evento sejam suficientes. O tempo de sobrevivência do indivíduo sem resultado do evento é desconhecido;
 - Tipo III – Quando há a interrupção do acompanhamento e não foi possível alcançar o final do estudo.
- Censura à esquerda - O evento de interesse ocorreu antes do início do intervalo de observação, mas não se conhece o momento exato (HE *et al.*, 2020). Ou seja, o tempo de sobrevivência observado é maior ou igual ao verdadeiro tempo de sobrevivência (WANG, LI E REDDY, 2019). A esse respeito, Stevens *et al.* (2020) descreve como

exemplo uma ponte que já ultrapassou a classificação da condição de estabilidade no momento da inspeção

- Censura intervalar - O resultado do evento de interesse só é conhecido por se encontrar em um intervalo, mesmo que não tenha sido observado exatamente (WANG, LI E REDDY, 2019; HE *et al.*, 2020; DEY, MUKHERJEE E CHAKRABORTY, 2020)

A Figura 14 detalha os diferentes tipos de censura que podem representar qualquer evento de falha ou morte em determinado estudo, tais como, a ocorrência de acidente vascular cerebral ou até mesmo alguma falha em algum componente de uma máquina (DEY, MUKHERJEE e CHAKRABORTY, 2020).



Fonte: Dey, Mukherjee e Chakraborty (2020).

4.1.1.2 Funções de sobrevivência e de risco

Também conhecida como teoria da confiabilidade (dependente do tempo) (Stevens *et al.*, 2020), a análise de sobrevivência possibilita a verificação do tempo de vida de um determinado indivíduo, equipamento ou estrutura o qual é representado por uma variável aleatória T , não negativa e absolutamente contínua. Esse tempo é aferido desde o momento inicial até a ocorrência desse evento, sendo denominado de tempo de falha.

Dessa forma, o tempo de falha pode ser especificado pelas funções de sobrevivência e de taxa de falha (ou risco). Ambas as funções são vastamente usadas quando da aplicação das técnicas de análise de sobrevivência e serão detalhadas adiante conforme os conceitos contidos

nas pesquisas de Wang, Li e Reddy (2019), Maki *et al.* (2018) e Fang, Ishida e Yamazaki (2018).

4.1.1.2.1 Função densidade de probabilidade

Segundo Fang, Ishida e Yamazaki (2018), a função densidade de probabilidade $f(t)$ representa o tempo exato de ocorrência do evento e pode ser expressa pela Equação (5):

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t \leq T < t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (5)$$

4.1.1.2.2 Função de distribuição acumulada

Uma vez que a função de densidade de probabilidade $f(t)$ é representada pela Equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.** anteriormente apresentada e pela Equação (6), a função de distribuição acumulada $F(t)$ pode ser definida pela Equação (7):

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) \quad (6)$$

$$F(t) = P(T < t) \quad (7)$$

Onde:

- T - Tempo de sobrevivência como uma variável aleatória;
- t – Tempo até a ocorrência do evento.

4.1.1.2.3 Função de sobrevivência

A função de sobrevivência (S) representa a probabilidade de determinada observação não falhar até um tempo t especificado ou ir além dele (DEY, MUKHERJEE e CHAKRABORTY, 2020; WANG, LI E REDDY, 2019). Representa-se esta função através da Equação (8) a seguir:

$$S(t) = P(T > t) = 1 - F(t) \quad (8)$$

Onde:

- $S(t) = 1$ no tempo $t = 0$ e $S(t) \rightarrow 0$ as $t \rightarrow \infty$.

4.1.1.2.4 Função de risco (Taxa de falha)

De acordo com Dunn e Clark (2009) e Wang, Li e Reddy (2019), a função de risco $h(t)$, também denominada de taxa de mortalidade instantânea ou taxa de falha condicional, não indica a hipótese ou probabilidade de o evento de interesse ocorrer, mas representa a probabilidade de o evento ocorrer no momento t dado que nenhum evento ocorreu antes do momento t . A função de risco $h(t)$ pode ser representada pela Equação (9) adiante:

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t \leq T < t + \Delta t | T \geq t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t \cdot S(t)} = \frac{f(t)}{S(t)} \quad (9)$$

Das e Sil (2020) afirmaram em sua pesquisa que o tempo de envelhecimento de pontes, particularmente no que diz respeito aos seus tabuleiros, poderia ser expresso pela Equação (10):

$$\text{Taxa de risco} = \frac{\text{Número de falhas}}{\text{Tempo total em operação}} \quad (10)$$

Ainda segundo Das e Sil (2020), também destacado na pesquisa de Wang, Li e Reddy (2019), sabe-se que tanto a função de sobrevivência $S(t)$ quanto a função de risco $h(t)$ não são negativas. Entretanto, existe um outro parâmetro que está relacionado à função de risco $h(t)$: a função de risco acumulada ou taxa de falha acumulada $H(t)$ estabelecida pela Equação (11) adiante:

$$H(t) = \int_0^t h(x) dx \quad (11)$$

Uma vez que por definição $f(t)$ pode ser expressa pela Equação (12):

$$f(t) = -\frac{d}{dt} S(t) \quad (12)$$

Dessa forma, a função de risco pode ser representada pela Equação (13):

$$h(t) = \frac{f(t)}{S(t)} = -\frac{d}{dt} S(t) \cdot \frac{1}{S(t)} = -\frac{d}{dt} [\ln S(t)] \quad (13)$$

Por fim, a Função de sobrevivência apresentada na Equação (14) pode ser rerepresentada pela Equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.**):

$$S(t) = \exp[-H(t)] \quad (14)$$

As demais funções também podem ser reescritas conforme as Equações (15), (16) e (17) a seguir:

$$F(t) = 1 - \exp[-H(t)] \quad (15)$$

$$f(t) = h(t)\exp[-H(t)] \quad (16)$$

$$H(t) = -\ln S(t) \quad (17)$$

- Monotonia da função de risco

Uma vez que a função de sobrevivência possui um comportamento decrescente que dificulta a percepção do risco ao longo do tempo, essa visualização pode ser facilmente verificada através da função de risco. Borges (2014) destaca que há cinco possibilidades para essa função conforme a seguir:

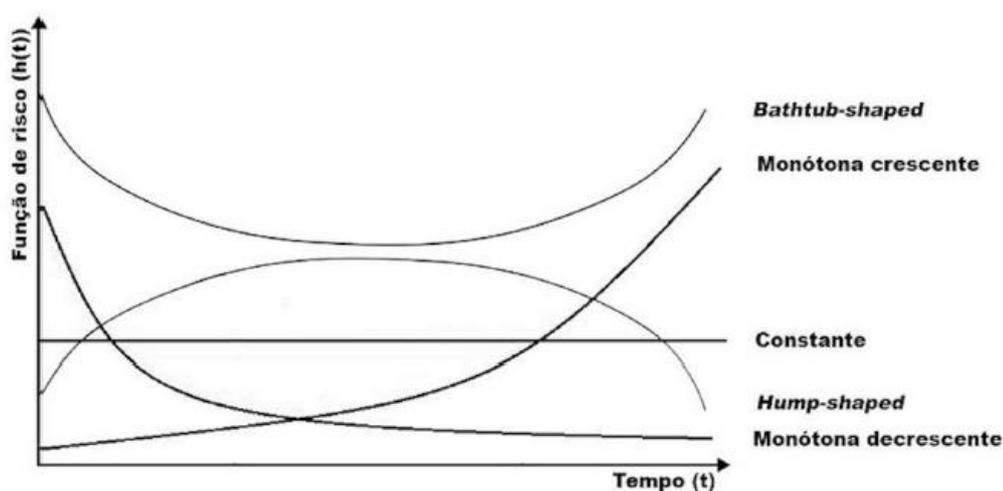
- Crescente – por conter um risco crescente é considerada a forma mais comum;
- Decrescente – um pouco mais rara devido ao próprio formato;
- Constante – pode advir de um período curto de observação ou de uma ocorrência inesperada;
- Formato (curva) de banheira (Bathtub-shape) – descreve um certo tipo de taxa de falha que contempla três tipos de deterioração/fases de falha: fase inicial (Infancy phase), fase de taxa de falha constante e fase de desgaste/envelhecimento (Wear out phase) (DAS e SIL, 2020). De acordo com Beck (2019), a curva da banheira descreve aproximadamente o comportamento de falhas de elementos estruturais ou de estruturas. Segundo esse mesmo autor, a fase inicial corresponde, por exemplo, a falhas específicas, tais como, retirada prematura de escoramento, sobrecarga, dentre outras. Já a fase constante pode compreender uma sobrecarga ao longo da vida útil da estrutura. A terceira e última fase tem sua taxa de falha aumentada. Alguns exemplos que podem ocorrer são: uma

resistência da estrutura reduzida por fadiga, corrosão de perda de aderência do concreto, entre outros;

- Unimodal (Hump-shaped) – Este formato pode ocorrer quando, por exemplo, da realização de uma intervenção cirúrgica a qual possibilita o risco de morte ao paciente, acontecendo, entretanto, sem complicações.

A Figura 15 aborda os cinco tipos de funções devidamente explicitados acima:

Figura 15 – Monotonia da função de risco



Fonte: Borges (2014).

4.1.1.3 MODELOS DE DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE

Adiante serão apresentados algumas das distribuições de probabilidades que podem ser usadas em análise de confiabilidade (engenharia).

Dentre as distribuições de probabilidade, apenas a distribuição Normal não pode ser utilizada na análise de sobrevida, visto que admite valores negativos, não sendo, dessa forma, apropriada para modelagem do tempo de sobrevivência de pontes, visto que os dados de sobrevivência são normalmente censurados e incompletos, e o formato da distribuição do tempo de sobrevivência é inclinado (NABIZADEHDARABI, 2015).

De acordo com Raqab, Al-Awadhi e Kundu (2018), as distribuições Weibull, Lognormal e Log-logística têm sido utilizadas de maneira eficaz na análise de dados de vida útil positivamente inclinados. Os autores ainda afirmam que as três distribuições mencionadas

anteriormente possuem diversas características distributivas relevantes e as suas funções de densidade de probabilidade também podem assumir diferentes formas.

As distribuições Exponencial, Weibull, Lognormal, Gamma, Gompertz e Log-logística são tradicionalmente consideradas para análises de sobrevivência (LEE e GO, 1997 apud NABIZADEHDARABI, 2015). Entretanto, esta pesquisa dará enfoque apenas às distribuições de probabilidades mais utilizadas em pesquisas voltadas à análise de sobrevida: Exponencial, Weibull, Lognormal e Log-logística.

4.1.1.3.1 Distribuição exponencial

De acordo com DAS e SIL (2020) e Li *et al.* (2015), esta distribuição é frequentemente utilizada a qual possibilita avaliar a confiabilidade de determinado produto. DAS e SIL (2020) ainda afirmam que essa distribuição é mais adequada para a observação aleatória de uma falha, não dependendo, dessa forma, da idade do item avaliado.

Li *et al.* (2015) também afirmam que essa função de distribuição requer o conhecimento de apenas um parâmetro de taxa ou escala inversa, λ , tornando simples a sua utilização. Dessa forma, considera-se a falha ou morte como um evento aleatório e independente do tempo (WANG, LI e REDDY, 2019).

Outro aspecto se refere ao comportamento da distribuição. Li *et al.* (2015) destacam que quando o valor de λ é diminuído, a distribuição expande-se para a direita. Já quando λ é aumentado, a distribuição é direcionada à origem, representando assim um risco mais elevado e um período de sobrevivência mais curto (WANG, LI e REDDY (2019). Neste caso, Li *et al.* (2015) mencionam que se trata de um caso especial da distribuição Weibull.

As funções densidade de probabilidade, de sobrevivência e de risco da distribuição exponencial estão apresentadas nas Equações (18), (19) e (20):

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (18)$$

$$S(t) = \exp(-\lambda t) \quad (19)$$

$$h(t) = \lambda \quad (20)$$

4.1.1.3.2 Distribuição Weibull

Weibull é uma distribuição contínua de probabilidade a qual possibilita estimar a confiabilidade de um sistema (DAS e SIL, 2020; NABIZADEHDARABI, 2019). Trata-se da distribuição mais usada na análise de sobrevivência, visto que proporciona uma aceitável

flexibilidade para a função de risco ao se comparar com a distribuição exponencial (WANG, LI e REDDY, 2019; BORGES, 2014).

Segundo DAS e SIL (2020), a principal vantagem na utilização dessa distribuição se refere à possibilidade de uso com uma amostra muito pequena para análise da vida útil. Ainda sobre essa distribuição, ela é caracterizada pelos parâmetros de escala $\lambda > 0$ e de forma $k > 0$, para $t > 0$ os quais quantificam os comportamentos dessa distribuição (ZHANG e MARSH, 2020).

A respeito dos parâmetros do modelo Weibull, são consideradas as seguintes condições:

- Para $k > 1$, a função é monótona crescente (BORGES, 2014)
- Quando $k = 1$, significa dizer que o risco será uma constante, e, para este caso, a distribuição é considerada exponencial (WANG, LI e REDDY, 2019; BORGES, 2014)
- Quando $k < 1$, a função de risco será decrescente no decorrer do tempo, ou seja, monótona decrescente (WANG, LI e REDDY, 2019; BORGES, 2014)

As funções densidade de probabilidade, de sobrevivência e de risco estão representadas conforme as Equações (21), (22) e (23).

$$f(t) = \lambda kt^{k-1} \exp(-\lambda t^k) \quad (21)$$

$$S(t) = \exp(-\lambda t^k) \quad (22)$$

$$h(t) = \lambda kt^{k-1} \quad (23)$$

4.1.1.3.3 Distribuição Lognormal

Nabizadehdarabi (2019), em sua tese de doutorado, destaca que uma variável aleatória pode ser considerada como lognormalmente distribuída quando o logaritmo dessa variável obedece às características da distribuição normal. Das e Sil (2020) destacam que esse tipo de distribuição é apropriado para modelos de degradação de falhas, tais como, corrosão de armaduras e fissuramento no tabuleiro de uma ponte.

As funções densidade de probabilidade, de sobrevivência e de risco da distribuição Lognormal são representadas pelos parâmetros média (μ), desvio-padrão (σ) e variância (σ^2) e estão exemplificadas, respectivamente, nas Equações (24), (25) e (26) segundo Wang, Li e Reddy (2019).

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma t}} \exp\left(-\frac{(\log(t) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (24)$$

$$S(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\log(t) - \mu}{\sigma}\right) \quad (25)$$

$$h(t) = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma t}} \exp\left(-\frac{(\log(t) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)}{1 - \Phi\left(\frac{\log(t) - \mu}{\sigma}\right)} \quad (26)$$

4.1.1.3.4 Distribuição Log-logística

Caracteriza-se como uma função de probabilidade contínua de variáveis aleatórias não-negativas (NABIZADEHDARABI, 2019). Ainda segundo o autor, a referida distribuição é utilizada em aplicações diversas, tais como, análises de sobrevivência em pacientes com câncer, hidrologia e economia.

Nabizadehdarabi (2019) afirma ainda que, ao se exprimir uma variável aleatória através de uma função de distribuição log-logística, o logaritmo da variável acompanha a distribuição logística.

As Equações (27), (28) e (29) destacam as funções densidade de probabilidade, de sobrevivência e de risco da distribuição log-logística, respectivamente. Os parâmetros λ e k se referem à escala e à forma desse modelo de distribuição (WANG, LI e REDDY, 2019).

$$f(t) = \frac{\lambda kt^{k-1}}{(1 + \lambda t^k)^2} \quad (27)$$

$$S(t) = \frac{1}{1 + \lambda t^k} \quad (28)$$

$$h(t) = \frac{\lambda kt^{k-1}}{1 + \lambda t^k} \quad (29)$$

4.1.2 Métodos estatísticos para análise de sobrevivência

Existem três métodos estatísticos que auxiliam a análise de sobrevivência: não paramétricos, semiparamétricos e paramétricos. Adiante, os supramencionados métodos estatísticos serão detalhados.

4.1.2.1 Métodos paramétricos

Os modelos paramétricos são considerados os mais eficientes e precisos para fins de estimativa do tempo para o evento de interesse, uma vez que permitem obter respostas probabilísticas mais pormenorizadas, caracterizando-se, dessa forma, como os mais abrangentes (WANG, LI e REDDY, 2019; TABATABAI, NABIZADEH e TABATABAI, 2018). Goyal, Whelan e Cavalline (2020) descrevem as distribuições exponencial e Weibull como exemplos desses modelos.

Dos diversos métodos paramétricos existentes, os mais utilizados são os modelos proporcional de risco e de tempo de falha acelerado (NABIZADEH e TABATABAI, 2020). Tabatabai, Nabizadeh e Tabatabai (2018) afirmam que, quando a proporcionalidade dos riscos é definida por uma análise inicial (Estimador de Kaplan-Meier, por exemplo), o modelo proporcional de riscos pode ser aplicado. Já quando as covariáveis agem com efeito multiplicador na escala temporal, o modelo de tempo de falha acelerado é mais empregado.

A função de risco do modelo de proporcional está apresentada na Equação (30).

$$h(t|x, \theta) = h_0(t)g(x|\theta) \quad (30)$$

Onde:

- θ - vetor contendo parâmetros desconhecidos;
- x - vetor que compreende p -covariáveis;
- $g(x|\theta) = e^{\sum_{k=1}^p \theta_k x_k}$;
- $h_0(t)$ - função de risco.

Em relação ao modelo de tempo de falha acelerado, as funções de distribuição de probabilidade, de sobrevivência e de risco são detalhadas nas Equações (31**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), (32) e (33), respectivamente.

$$f(t|x, \theta) = f_0(tg(x|\theta))g(x|\theta) \quad (31)$$

$$S(t|x, \theta) = S_0(tg(x|\theta)) \quad (32)$$

$$h(t|x, \theta) = h_0(tg(x|\theta))g(x|\theta) \quad (33)$$

4.1.2.2 Métodos semiparamétricos

A abordagem semiparamétrica é a preferida entre as demais abordagens, tendo em vista que não faz suposições sobre o formato da distribuição. Destaca-se ainda por permitir a realização de análises diversificadas e ser de fácil de manuseio (TABATABAI, NABIZADEH e TABATABAI, 2018; GOYAL, WHELAN e CAVALLINE, 2020).

Também conhecido como modelo de regressão de COX (COX, 1972) ou de risco proporcional de COX, ele é considerado o mais utilizado nesse tipo de abordagem (Goyal, Whelan e Cavalline, 2020), assim como considera a influência relativa das covariáveis nos resultados e supõe a proporcionalidade dos riscos (NABIZADEH, TABATABAI e TABATABAI, 2018). As funções de risco e de sobrevivência de Cox estão apresentadas nas Equações (34) e (35) conforme Wang, Li e Reddy (2019).

$$h(t, X_i) = h_0(t) \exp(X_i \beta) \quad (34)$$

$$S(t) = \exp(-H_0(t) \exp(X\beta)) = S_0(t) \exp(X\beta) \quad (35)$$

Onde:

- $h_0(t)$ - função de risco;
- $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iP})$ - vetor correspondente à covariável para o instante i ;
- $\beta^T = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_P)$ - vetor do coeficiente;
- $H_0(t)$ - função de risco acumulada;
- $S_0(t)$ - função de sobrevivência.

4.1.2.3 Métodos não paramétricos

Métodos não paramétricos se caracterizam como a forma mais simples de análise de sobrevivência, pois não consideram os efeitos simultâneos de covariáveis múltiplas nos resultados (NABIZADEH, TABATABAI e TABATABAI, 2018; TABATABAI, NABIZADEH e TABATABAI, 2018). Entretanto, Qiao, Labi e Fricker (2019) mencionam que, mesmo apresentando facilidade de utilização, o método é limitado no que se refere à sua capacidade de associar a função de sobrevivência a covariáveis externas.

4.1.2.3.1 Estimador de Kaplan Meier

O método mais utilizado para estimar o tempo de sobrevivência em diversas áreas é o Estimador de Kaplan-Meier (GOYAL, WHELAN e CAVALLINE, 2020; NABIZADEH, TABATABAI e TABATABAI, 2018). Kaplan e Meier (1958) estabeleceram esse método, pois

quando existe a censura na observação para efetuar a análise de sobrevivência, alguns tempos de vida não poderão ser verificados na sua totalidade (BORGES, 2014).

Balakumaran e Weyers (2020) afirmam que esse método calcula a probabilidade de sobrevivência através do ajuste da função de sobrevivência.

Ainda segundo esses autores, a distribuição de sobrevivência e o cálculo do tempo médio de sobrevivência são apresentados nas Equações (36) e (37).

$$\hat{S}(t_i) = \prod_{j=1}^i \left(1 - \frac{d_j}{n_j}\right) \quad (36)$$

$$\hat{u} = \sum_{i=1}^D \hat{S}(t_{i-1})(t_i - t_{i-1}) \quad (37)$$

Onde:

- $\hat{S}(t_i)$ é a distribuição de sobrevivência no tempo t_i ;
- \hat{u} é o tempo de sobrevivência médio estimado
- d_i é o número de falhas no tempo t_i ;
- n_i é número de indivíduos sob risco antes de t_i ; e
- t_i é o tempo em anos.

O Quadro 10, adaptado de Wang, Li e Reddy (2019), apresenta as vantagens e desvantagens dos métodos estatísticos para análise de sobrevivência.

Quadro 10 – Vantagens e desvantagens dos métodos estatísticos utilizados na análise de sobrevivência

Método	Vantagens	Desvantagens
Paramétrico	De fácil interpretação, torna-se mais eficiente e preciso quando os tempos de sobrevivência seguem uma distribuição específica	Quando a premissa da distribuição não é respeitada, ela pode ser inconsistente e pode fornecer resultados insatisfatórios
Semiparamétrico	Não é necessário o conhecimento da distribuição implícita do tempo de sobrevivência	A distribuição do resultado é desconhecida, dificultando a interpretação
Não paramétrico	Mais eficiente quando as distribuições não são conhecidas.	Dificuldade na interpretação. Produz estimativas imprecisas.

Fonte: Adaptado de Wang, Li e Reddy (2019).

4.1.3 ESTUDOS DESENVOLVIDOS COM A UTILIZAÇÃO DAS TÉCNICAS DE SOBREVIVÊNCIA

Além dos diversos estudos mencionados anteriormente que embasaram a explanação dos conceitos gerais sobre as técnicas de sobrevivência, serão apresentadas algumas pesquisas onde foi aplicada a metodologia em questão.

Stevens *et al.* (2021) utilizaram técnicas de sobrevivência a fim de definir controles ambientais e operacionais sobre a deterioração de pontes rodoviárias. Os autores mostraram o resultado da aplicação das curvas de degradação através da utilização do modelo de risco proporcional de COX.

Anderson, Unnikrishnan e Schumacher (2021) aplicaram em seu estudo análise de sobrevivência baseada em heterogeneidade para identificar os fatores que contribuem consideravelmente para a classificação do tempo de permanência na mesma nota técnica de um tabuleiro de ponte, em pesquisa que obteve as informações do inventário nacional de pontes da FHWA do ano de 2020, tendo dividido os dados em três grupos de classificação da condição de estabilidade (CR): CR alto (nota técnica 7 ou 8), CR médio (Nota técnica 6) e CR baixo (Nota técnica 4 e 5).

Nabizadeh, Al-Barqawi e Tabatabai (2021) abordaram o uso das técnicas de sobrevivência e foi aplicado para verificar a resistência à fadiga de sete cabos de protensão para desenvolver testes probabilísticos de modelos e curvas S-N não lineares seguindo as observações contidas na pesquisa de Nabizadeh e Tabatabai (2020).

Maki *et al.* (2018) aplicaram as técnicas de sobrevivência utilizando dados de inspeção de pontes da região montanhosa de Hokuriku (Japão), com intuito de investigar as causas de deterioração do tabuleiro de concreto armado de uma ponte rodoviária.

4.2 MÉTODO DOS FATORES

Nos anos 80, pesquisadores japoneses envidaram esforços para o desenvolvimento de metodologias que permitissem a estimativa da vida útil das construções e de seus componentes (Souza *et al.*, 2018; Emídio *et al.*, 2014).

A partir desses estudos, foi publicado em 1989 um guia para prever o planejamento das construções pelo Instituto Arquitetônico do Japão (*Architeturat Institute of Japan – AIJ*). Desenvolvido pelo CIB/W80 (EMÍDIO *et al.*, 2014), foi devidamente traduzido para o inglês em 1993 (Silva, De Brito e Gaspar, 2016b) e instituído como Método dos Fatores, sendo mais tarde normatizado pela ISO 15686 (2004).

De acordo com Hernández-Moreno e Torres-Quintana (2020), “os métodos mais recomendáveis para estimar a vida útil das construções são os baseados na norma ISO 15686, uma vez que é um método qualitativo baseado na experiência do projetista”.

Esses autores também mencionam que a metodologia em questão não necessita de avaliações matemáticas extremamente complicadas, nem testes físicos para verificar o "envelhecimento acelerado" em laboratório, sendo considerado um método prático para as etapas de planejamento e concepção de edifícios e demais componentes de uma construção.

É possível obter a vida útil estimada (VUE) de uma estrutura ou de um componente (novo ou existente) da construção através da multiplicação da Vida Útil de Referência (VUR) por sete fatores que caracterizam os atributos que afetam a durabilidade da estrutura ou de seus elementos (SILVA *et al.*, 2021; SILVA e PRIETO, 2021; LOLI, BERTOLIN e KOTOVA, 2020; FREGONARA e FERRANDO, 2018; FREGONARA e PATTONO, 2018; SOUZA *et al.*, 2018; SERRALHEIRO, De BRITO e SILVA, 2017; SILVA, De BRITO e GASPAR, 2016a; GALBUSERA, De BRITO e SILVA, 2015).

A estimativa da vida útil de determinada estrutura ou elemento pode ser expressa pela Equação (38):

$$VUE = VUR \times A \times B \times C \times D \times E \times F \times G \quad (38)$$

Onde:

- VUE é a vida útil estimada;
- VUR é a vida útil de referência;
- A, B, C, D, E, F e G são os fatores modificantes.

Serralheiro, De Brito e Silva (2017) afirmam que a VUR, em condições normais de uso, pode ser considerada como a vida útil esperada. Além disso, a vida útil de referência auxilia a estimativa da vida útil de uma estrutura ou de seus componentes (JANJUA, SARKER e BISWAS, 2019; MATOS, 2007 e ZARZAR JÚNIOR, 2007). Ainda segundo os autores, os aspectos relativos aos agentes de degradação, assim como as consequências da intensidade e da variação da ação dos agentes e a justaposição dos efeitos da ação de vários deles deverão ser considerados nessa análise.

A norma ISO 15686 (2011) preconiza variáveis em três níveis que estão diretamente associadas à predominância exercida sobre cada fator. Para cada uma dessas variáveis poderá ser imputado um peso de acordo com o que se segue:

- 0,80 – Para situações muito desfavoráveis à estrutura ou ao componente estudado;
- 1,00 – Para atributos nas condições que foram consideradas para a vida útil ser idêntica à VUR;
- 1,20 – Para situações muito favoráveis à estrutura ou ao componente estudado.

A respeito da quantificação dos fatores de durabilidade, pode ser realizada por meio da atribuição de valores extremos (0,80 e 1,20) relativos à VUR. Todavia, valores intermediários podem ser atribuídos em concordância com as condições da estrutura. A esse respeito, Silva e Prieto (2021), Souza *et al.* (2018), Silva, De Brito e Gaspar (2016c) e Zarzar Júnior (2007) em imputaram valores intermediários de ponderação suas pesquisas.

4.2.1 Descrição dos Fatores

A seguir, são descritos os sete fatores que podem afetar a durabilidade de uma estrutura, conforme HOVDE (2005):

- Fator A – Qualidade dos materiais empregados na construção

Relaciona-se ao material utilizado em um componente específico no que se refere à sua própria qualidade, ou para a superfície de tratamento, a fim de protegê-lo contra exposição externa ou interna.

- Fator B – Nível de qualidade do projeto

Representa o nível de projeto do componente (elemento) ou da estrutura, ou seja, a forma como é projetada contra exposição climática, ciclos de molhagem e secagem, projeto estrutural, demais projetos complementares e outros.

- Fator C – Nível de qualidade da execução

Possibilita a conferência do nível de execução da estrutura em relação aos normativos previstos no termo de referência.

- Fator D – Características do meio ambiente interno

Exprime a exposição ambiental interna do componente (elemento) ou da estrutura. Vale salientar que esse fator não se aplica à determinação da vida útil para materiais, componentes e

estrutura externos. Para tal situação, o valor definido para a variável de influência desse fator deverá ser 1,0.

- Fator E – Características do meio ambiente externo

Expressa a exposição ambiental externa do componente (elemento) ou da estrutura.

- Fator F – Características do uso

Permite a verificação das condições de uso do material ou do componente, como por exemplo, deterioração, tipo de construção em que o material ou componente foi aplicado.

- Fator G – Nível de manutenção

Indica o nível da manutenção do material, componente ou estrutura.

4.2.2 Estudos desenvolvidos com a utilização do Método dos Fatores

Algumas pesquisas foram desenvolvidas aplicando-se o Método dos Fatores, destacando-se as seguintes:

Abu-Tair *et al.* (2002) destacaram em sua pesquisa a necessidade de modelagem do processo de deterioração de estruturas de concreto e os principais aspectos que deverão ser observados. Após a aplicação do Método dos Fatores a mais de 400 pontes do Reino Unido, os pesquisadores sinalizaram quanto à imprecisão desse método. Todavia, afirmaram ser possível torná-lo mais confiável através da utilização de subfatores, bem como proceder ao refinamento através da utilização do Método Delphi e a recalibração dos fatores por meio da adoção de abordagem probabilística, visando reduzir as incertezas envolvidas no processo.

Aktas e Bilec (2011) propuseram em seu estudo uma abordagem sistemática para estimar a vida útil de produtos, tendo sido incluídos fatores técnicos e sociais. Em virtude disso, um método híbrido de previsão de vida útil, associando a abordagem estatística apresentada pela Norma ASTM G166 (2005) da Sociedade Americana para Testes e Materiais com o Método dos Fatores foi apresentado. Os autores verificaram que a combinação dos dois métodos possibilita a estimativa da vida útil para a ampla variedade de produtos usados nas construções.

Straub (2015) elaborou sua pesquisa destacando a importância da confiabilidade dos dados sobre a vida útil de produtos utilizados nos edifícios para fins de análise de ciclo de vida e planejamento de manutenções. Nessa pesquisa, foi observado que todos os bancos de dados internacionalmente disponíveis estavam em desacordo com a ISO 15686 (2011). Ainda sobre

o exposto, apesar de alguns especialistas terem se posicionado de modo contrário ao uso desse método, eles afirmaram que tal metodologia fornece boas oportunidades para elaboração ou circunstâncias específicas de projetos. O autor ainda afirma que os dados genéricos de vida útil dos produtos podem ser tolerados através da descrição dos fatores, dos critérios estruturais e das condições em uso.

Edirisinghe, Setunge e Zhang (2015) também realizaram uma análise, a qual combinou o uso da Cadeia de Markov com o Método dos Fatores por fornecer uma maior confiabilidade na previsão de deterioração baseada em dados oriundos de inspeção visual. Essa análise foi possível em decorrência da disponibilidade de informações de inspeções visuais regulares.

Outra pesquisa interessante foi desenvolvida por Marques, De Brito e Silva (2018). Os autores implementaram uma metodologia para estimar a vida útil de sistemas compostos de isolamento térmico externo. Para tanto, foram utilizados modelos de degradação cuja extrapolação das curvas de deterioração foi associada ao Método dos Fatores para fins de comparação entre o valor obtido por esse método e pelas curvas de degradação, tendo este valor se aproximado da curva média de degradação.

Ainda sobre a utilização desse método, Souza *et al.* (2018) aplicaram-no para fins de previsão de vida útil de revestimentos cerâmicos localizados em Brasília, Brasil.

Os autores propuseram a utilização desse método por meio de duas abordagens (determinística e probabilística), pois, segundo eles, o Método dos Fatores possui vantagens (facilidade de uso e operação simples) e desvantagens (os resultados obtidos se caracterizam como valor absoluto que, muitas vezes, não corresponde à realidade, devido à complexidade dos fenômenos de degradação).

Dessa forma, os autores aplicaram funções de distribuição de probabilidade a esse método, tendo verificado ao final que o emprego dessa abordagem probabilística se caracteriza como mais adequado para obter informações relevantes, retratando propriamente o processo de degradação.

Silva e Prieto (2021) em seu estudo apontaram as vantagens desse método: a) caracteriza-se como modelo simples e de fácil aplicação, mesmo em situações em que novas informações são obtidas; b) possibilita a verificação da combinação dos fatores de degradação; c) permite obter a vida útil estimada, a partir dos dados das condições de uso da estrutura analisada, através da aplicação de um método padronizado.

4.2.3 Interpretação estatística do Método dos Fatores

Embora o Método dos Fatores também seja objeto de questionamentos por pesquisadores (Serralheiro, De Brito e Silva, 2017; Magos *et al.*, 2016; Silva, de Brito e Gaspar, 2016b; Hovde, 2005) e considerado como determinístico (Goulouti *et al.*, 2020; Silva, de Brito e Gaspar, 2016b; Chai *et al.*, 2015), muitas vezes pode ser induzida uma visão limitada e subjetiva, que permite a alguns autores (Loli, Bertolin e Kotova, 2020; Fregonara e Ferrando, 2018; Straub, 2015) sugerir um aperfeiçoamento dessa metodologia (utilização de subfatores e abordagem probabilística mediante aplicação de funções de distribuição de probabilidade).

Entretanto, Emídio *et al.* (2014) afirma que esse método não é mais visto atualmente como um método determinístico, mas sim como uma estrutura geral para a previsão da vida útil. De maneira semelhante, Magos *et al.* (2016) afirmam que esse método se destaca como uma ferramenta simples, eficiente e que apresenta grande potencial para o planejamento de manutenções.

Além disso, o método contém uma interpretação estatística que será apresentada a seguir.

4.2.4 Demonstração da interpretação estatística do método dos fatores

Considere a Equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) apresentada anteriormente a qual permite obter a vida útil estimada de uma estrutura ou componente.

Em seguida, para justificar a utilização da ponderação atribuída com intervalo entre 0,80 e 1,20, considerou-se o Teorema do estatístico russo Chebychev.

Segundo Amaya e Sierra-Pérez (2022), esse teorema especifica uma relação à qual poderá existir entre a média (μ) e o desvio-padrão (σ) que envolve a probabilidade de uma variável assumir um determinado valor entre k desvios-padrão e a sua média. Neste caso, k é uma constante que pode abranger qualquer valor real.

Ainda segundo esses autores, a Equação (39) destaca o supracitado teorema exibindo as percentagens de confiabilidade em que a probabilidade de que a variável x situa-se entre os valores do intervalo determinado por $\mu \pm \sigma$.

$$P \left(\mu - k\sigma < \mu + k\sigma \leq 1 - \frac{1}{k^2} \right) \quad (39)$$

Quando $k = 2$, haverá uma probabilidade de que 75% da variável x esteja entre os valores do intervalo. Para $k = 3$, a confiabilidade seria de 89%.

Segundo Amaya e Sierra-Pérez (2022) e Martins e Domingues (2005) apud Santo Junior (2020), pode-se aplicar esse teorema a qualquer distribuição de dados, contanto que:

a) O intervalo $(\bar{X} \pm 2S)$ ou $(\mu \pm 2\sigma)$ contenha, no mínimo, 75% de todas as observações;

b) O intervalo $(\bar{X} \pm 3S)$ ou $(\mu \pm 3\sigma)$ contenha, no mínimo, 89% de todas as observações.

Onde:

- \bar{X} - Média aritmética (amostra);
- μ - Média aritmética (população);
- S - Desvio-padrão amostral;
- σ - Desvio-padrão populacional.

A esse respeito, assim como Amaya e Sierra-Pérez (2022), Wah, Chen e Owen (2021), Wah *et al.* (2019) e Yan *et al.* (2005) confirmam que essa abordagem pode ser utilizada para detectar danos em estruturas, atribuindo-se, dessa forma, limites de controle superior $(\mu + 3\sigma)$ e inferior $(\mu - 3\sigma)$.

4.2.4.1 Cálculo da interpretação estatística do Método dos Fatores

Inicialmente, ao elevarmos os pesos extremos (inferior e superior) ao número total de fatores em referência à VUR, obtemos:

$$0,80^7 = 0,210$$

$$1,20^7 = 3,583$$

$$\mu = 1,00$$

Sendo assim, para situações mais desfavoráveis (Equação (40)) e favoráveis (Equação (41)), teremos, respectivamente:

$$\mu - 3\sigma = 0,210 \tag{40}$$

$$\mu + 3\sigma = 3,583 \tag{41}$$

Ao calcularmos os desvios-padrão para ambas as situações, temos os seguintes valores de σ_1 e σ_2 contidos nas Equações (42) e (43):

$$\sigma_1 = \frac{\mu - 0,210}{3} \text{ onde } \sigma_1 = 0,263 \quad (42)$$

$$\sigma_2 = \frac{-\mu + 3,583}{3} \text{ onde } \sigma_2 = 0,861 \quad (43)$$

Baseado nos desvios-padrão, foram obtidos os coeficientes de variação (C.V) conforme as Equações (44) e (45):

$$C.V_1 = \frac{0,263}{1,00} \text{ onde } C.V_1 = 0,263 \text{ ou } C.V_1 = 26,3\% \quad (44)$$

$$C.V_2 = \frac{0,861}{1,00} \text{ onde } C.V_2 = 0,861 \text{ ou } C.V_2 = 86,1\% \quad (45)$$

- Pela estatística empírica

Todos os possíveis valores da variável aleatória VUE estariam entre $0,210 \times \text{VUR}$ e $3,583 \times \text{VUR}$, ou seja, 100% dos valores. Dessa forma, adotando-se uma vida útil de referência de 50 anos, teremos:

$$0,210 \times 50 = 10,50 \text{ anos}$$

$$3,583 \times 50 = 179,15 \text{ anos}$$

- Pela estatística matemática

Aplicando a fórmula de Chebychev, verifica-se que 89% dos valores de VUE estarão dentro do intervalo acima.

Se houvesse a intenção de dobrar a vida útil, ao invés de 3,583, deveríamos ter o valor máximo para os fatores como se segue:

$$k = 2,00^{\frac{1}{7}}, \text{ obtendo-se assim } k = 1,104$$

Tomando-se como base $k = 1,10$, ou seja, 10% de desvio em relação ao valor 1,00, teríamos:

$$0,90^7 = 0,478$$

Em outras palavras, para este caso o valor mínimo seria aproximadamente 50%, conforme representação da Equação (46).

$$VUE = 47,8\% \times VUR \quad (46)$$

4.3 MÉTODO DELPHI

De acordo com Sablatzky (2022), Hesse, Atadero e Ozbek (2017), e Yousuf (2007), o Método Delphi foi inicialmente elaborado pela RAND Corporation entre 1950 e 1960, o qual foi utilizado pela primeira vez para previsão de desenvolvimento de tecnologia. Esse método tem sido amplamente utilizado em questões políticas, econômicas, desenvolvimento cultural e social e outros campos (ZHU *et al.*, 2022).

Caracteriza-se por ser uma ferramenta que possibilita o refinamento de qualquer outro método, através da coleta de dados, a qual permitirá obter um consenso a respeito de uma determinada questão (BELL e KWIATKOWSKI, 2021).

Para tanto, especialistas são consultados individualmente, mediante rodadas consecutivas com um questionário elaborado, usando os resultados médios da rodada antecedente como base, no intuito de impulsionar a convergência de julgamentos (MADRIGAL, LANZAROTE e BRETONES, 2015).

Segundo Mahdi, Ebid e Khallaf (2019), uma das vantagens dessa metodologia é não exigir que todos os especialistas estejam presentes em um mesmo lugar, permitindo assim a identificação de especialistas independentemente da sua localização.

Os mesmos autores ainda destacam que esse método possibilita a eliminação da parcialidade, tendo em vista que os especialistas concedem suas próprias informações, sem receber, dessa maneira, alguma influência do grupo. Várias iterações são realizadas para obter consenso entre os participantes, bem como propiciar a tomada de decisão. Para isso, são realizadas duas ou mais iterações (PENG, 2019; ZHU, 2019).

Ainda segundo Zhu (2019), as etapas básicas do Método Delphi são as seguintes: 1) Determinação do tópico, preparação do material de apoio, elaboração do questionário e seleção do grupo de especialistas. Todos os indicadores de avaliação devem ser mencionados no questionário. 2) Emissão de questionário ao grupo de especialistas, solicitação da opinião dos especialistas e execução do processamento estatístico por meio de várias rodadas.

4.3.1 Estudos desenvolvidos através da utilização do Método Delphi

Ji, Liu e Li (2022), em uma das etapas da sua pesquisa, utilizaram esse método para realizar um levantamento geral dos fatores de risco de segurança durante o período de construção de uma ponte através da avaliação de 15 especialistas.

Meyer, Von Der Gracht e Hartmann (2022) analisaram a contribuição de 14 tecnologias e medidas logísticas para a sustentabilidade no transporte rodoviário de cargas, aproveitando a previsão tecnológica utilizando o método Delphi.

Por meio da aplicação desse método, Mohamad e Tran (2021) desenvolveram uma metodologia para ajudar as agências rodoviárias a lidar com a escassez de especialistas em inspeção, priorizando vistorias com base na criticidade.

Galvão, Matos e Oliveira (2021) forneceram uma estrutura de investigação para permitir que projetistas e construtores, através do conhecimento dos erros mais relevantes na engenharia de pontes executadas em concreto armado relativos às fases de concepção e de construção, possam definir estratégias eficientes para mitigação de riscos, garantindo assim uma maior segurança estrutural. Para identificação desses erros, foi empregado o Método Delphi.

Com exceção do Método Delphi, os conceitos que embasaram os fundamentos e as aplicações práticas da Análise de Sobrevivência e do Método dos Fatores foram expostos neste capítulo e serão aplicados no Estudo de Caso do Capítulo 5 desta pesquisa.

Inicialmente, serão utilizadas as técnicas de Análise de Sobrevivência, objetivando obter a confiabilidade estimada e a taxa de falha acumulada da superestrutura das pontes em concreto armado e protendido.

Em seguida, será aplicado o Método dos Fatores às OAEs da amostra selecionada, considerando que tal metodologia permite analisar o processo de degradação, podendo ser expressa quantitativamente em valores e funções que expressam a vida útil residual.

Por fim, será realizada uma análise comparativa entre as supracitadas abordagens e os resultados provenientes da aplicação da norma DNIT (2004a), a fim de verificar a sua eficiência em relação à vulnerabilidade dessas estruturas. Destaca-se que as duas abordagens têm respaldo científico de outros pesquisadores (conforme as citações relacionadas no texto) para avaliação de pontes no que concerne à estimativa de vida útil.

5 ESTUDO DE CASO

O presente capítulo apresenta um estudo referente à utilização de modelos de deterioração aplicados a um conjunto de 98 pontes e viadutos rodoviários federais situados no Estado de Pernambuco. Tais obras foram escolhidas por apresentarem níveis de degradação e condições estruturais representativos da média das tipologias mais frequentes na malha viária brasileira.

De maneira semelhante a Vitório (2013), a presente pesquisa limitou-se aos aspectos inerentes à superestrutura das pontes da amostra anteriormente informada, uma vez que não existem informações suficientes relativas à infraestrutura que permitam avaliá-las através dos modelos de deterioração, inviabilizando assim a análise daquelas partes constituintes.

5.1 COLETA DAS INFORMAÇÕES DAS ESTRUTURAS ANALISADAS

Tendo em vista o momento pandêmico, não seria adequado utilizar as informações necessárias à pesquisa em epígrafe dos anos 2020/2021 para não influenciar nos resultados obtidos desse estudo de caso, particularmente no que tange ao volume médio diário de veículos (VMD).

Além disso, o contrato que previa a execução dos serviços de disponibilização, operação e manutenção de equipamentos eletrônicos de controle de velocidade nas rodovias federais sob circunscrição do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT encerrou-se por decurso de prazo e o novo contrato não previu a mesma quantidade de equipamentos, tão pouco os mesmos locais de instalação.

Dessa forma, parte dos dados utilizados nesta pesquisa foram coletados das fichas de inspeções visuais executadas nas estruturas do presente estudo do ano 2019 cujas informações foram devidamente registradas no Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais (SGO) do DNIT.

Também foram obtidas informações referentes ao VMD que trafega pelos segmentos em que cada ponte se situa através dos contratos de contagem volumétrica de veículos do DNIT (2018b, 2018c). Vale destacar que foi realizada uma estimativa de tráfego baseada no VMD 2009 do DNIT para algumas OAES do conjunto analisado.

5.1.1 Critérios adotados para escolha das estruturas analisadas

Objetivando a aplicação dos modelos de deterioração mencionados anteriormente, são apresentados adiante os critérios que foram adotados para seleção das estruturas analisadas.

As pontes que não foram inspecionadas e, por conseguinte, não apresentaram notas técnicas no SGO foram desconsideradas da amostra.

As pontes com indicativo de intervenção (reabilitação e/ou recuperação) também foram removidas da amostra.

Uma vez que a norma DNIT 010/2004-PRO classifica as pontes com nota técnica 5 (melhor condição) a 1 (pior condição) e orienta como ação corretiva que a ponte seja colocada “Em observação” quando a essas estruturas se atribui a nota 3, seria ideal considerar somente as OAEs com classificação de notas 5 a 3 na amostra para fins de aplicação das técnicas de análise de sobrevivência, desconsiderando aquelas que contêm as menores condições de estabilidade, visto que essas OAEs necessitam de intervenções devido ao comprometimento da sua vida útil, exigindo a sua inclusão em um plano de manutenções ou que sejam recuperadas estruturalmente em um curto prazo.

A esse respeito, vale frisar que a Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT preconiza a inclusão das pontes das rodovias concessionadas que forem classificadas com nota 2 e 1 em um planejamento estratégico de recuperação.

Entretanto, no intuito de evitar a censura de informações que poderiam ser relevantes à pesquisa e por entender que a atribuição de uma nota técnica se caracteriza como um processo que constitui alta variabilidade entre os inspetores foram preservadas na amostra as estruturas com notas técnicas 2 e 1.

Além disso, algumas dessas estruturas foram classificadas em inspeções visuais anteriores com tais notas técnicas, não tendo sido recuperadas até o presente momento. Isto pode indicar uma atribuição equivocada da sua nota técnica.

Normalmente, nos Estados Unidos da América, as orientações publicadas pela FHWA segundo Ahmad (2011) e algumas das diversas agências de transportes daquele país consideram como o final da vida útil do tabuleiro de uma ponte aquela classificação que considera a necessidade de maiores reparos na estrutura (Inferior à Nota 4 – De um intervalo de classificação de 0 a 9), fato este considerado nas pesquisas de Manafpour *et al.* (2018), Tabatabai, Nabizadeh e Tabatabai (2018), Nabizadeh, Tabatabai e Tabatabai (2018), Tabatabai, Tabatabai e Lee (2011).

Partindo-se da verificação do total de 618 pontes e viadutos rodoviários federais do Estado de Pernambuco, foram selecionadas aquelas estruturas que possuem as seguintes informações: a) ano de construção, b) informações geométricas (comprimento, largura, dentre outras) registradas no SGO e c) existência de equipamentos redutores de velocidade próximos

à OAE selecionada para fins de obtenção da quantidade média de veículos que transitam sobre a ponte.

Sendo assim, foram obtidas apenas 98 OAES, escolhidas devidamente pelo tipo de material da estrutura, sendo 76 em concreto armado e 22 em concreto protendido, pois atenderam aos critérios das diferentes metodologias que serão avaliadas. Mister destacar que as estruturas construídas em aço, madeira, entre outros materiais, foram desconsideradas da amostra por não apresentarem um número suficiente que permitisse a análise.

Para aplicação das técnicas de Análise de Sobrevivência, além dos demais dados constantes no SGO, foram utilizadas as seguintes informações: a) ano de construção (variável resposta do modelo), b) Comprimento total da OAE, c) material da estrutura e d) VMD (volume médio diário de veículos que passa pela superestrutura – obtido através dos redutores eletrônicos de velocidade localizados próximos às pontes estudadas). Tais equipamentos apenas realizam a contagem volumétrica dos veículos, não tendo sido possível identificar a sua categoria (passeio, moto, caminhão e ônibus). Demais detalhes serão explanados mais adiante.

O Quadro 11 exibe a quantidade total das pontes das rodovias federais de Pernambuco consideradas neste estudo por tipo de material.

Quadro 11 – Quantidade de OAES por tipo de material

Rodovia	Material da estrutura		Total de OAES
	Concreto armado	Concreto protendido	
BR-101/PE	16	11	27
BR-104/PE	11	02	13
BR-116/PE	-	01	01
BR-232/PE	22	02	24
BR-407/PE	03	03	06
BR-408/PE	01	02	03
BR-423/PE	02	-	02
BR-424/PE	21	-	21
BR-428/PE	-	01	01
Total	76	22	98

Fonte: O autor (2022).

Adiante, são informados o quantitativo total, a nota técnica imputada pelo inspetor baseada nos critérios da norma DNIT 010/2004-PRO e as principais informações (geométrica e sistemas estruturais) das pontes em concreto protendido (Quadros 12 a 18) e concreto armado (Quadros 19 a 25).

Quadro 12 – OAEs analisadas em concreto protendido (BR-101/PE)

OAE	Rodovia	km	Ext.	Larg.	Classe (Trem tipo - tf)	Material	Tipo de estrutura	Sistema construtivo	Ano de construção	VMD	Cidade mais próxima	Nota Superestrutura (2019)
1	BR-101	213,42	40,60	13,60	45	Concreto Protendido	Viga de concreto protendido	Pré-moldado protendido	1985	8850	Xexéu	4
2	BR-101	210,32	40,20	13,60	45	Concreto Protendido	Viga de concreto protendido	Pré-moldado protendido	1985	8850	Xexéu	4
3	BR-101	210,32	40,20	11,40	45	Concreto Protendido	Viga de concreto protendido	Pré-moldado protendido	2015	11508	Xexéu	4
4	BR-101	206,32	25,30	13,50	45	Concreto Protendido	Viga de concreto protendido	Pré-moldado protendido	1985	11508	Xexéu	4
5	BR-101	197,85	30,00	11,40	45	Concreto Protendido	Viga de concreto protendido	Pré-moldado protendido	1985	8850	Xexéu	4
6	BR-101	185,48	159,80	13,62	24	Concreto Protendido	Viga de concreto protendido	Pré-moldado protendido	1957	8850	Palmares	4
7	BR-101	47,35	39,50	16,45	45	Concreto Protendido	Viga de concreto protendido	Pré-moldado protendido	1985	11247	Cabo de Santo Agostinho	4

8	BR-101	13,31	105,00	23,41	45	Concreto Protendido	Viga de concreto protendido	Pré-moldado protendido	2014	22840	Goiana	4
9	BR-101	12,39	39,40	11,40	45	Concreto Protendido	Viga de concreto protendido	Pré-moldado protendido	1985	11593	Cabo de Santo Agostinho	4
10	BR-101	12,39	39,40	16,55	45	Concreto Protendido	Viga de concreto protendido	Pré-moldado protendido	1985	11247	Cabo de Santo Agostinho	4
11	BR-101	14,77	39,50	11,30	45	Concreto Protendido	Viga de concreto protendido	Pré-moldado protendido	1985	11593	Cabo de Santo Agostinho	1

Fonte: O autor (2022).

Quadro 13 – OAEs analisadas em concreto protendido (BR-104/PE)

OAE	Rodovia	km	Ext.	Larg.	Classe (Trem tipo - tf)	Material	Tipo de estrutura	Sistema construtivo	Ano de construção	VMD	Cidade mais próxima	Nota Superestrutura (2019)
12	BR-104	93,77	79,60	10,00	36	Concreto Protendido	Viga de concreto protendido	Moldado no local (Pré- fabricado)	1965	11785	Cupira	4
13	BR-104	139,11	50,00	10,00	36	Concreto Protendido	Viga de concreto protendido	Moldado no local (Pré- fabricado)	1965	11785	Quipapá	4

Fonte: O autor (2022).

Quadro 14 – OAEs analisadas em concreto protendido (BR-116/PE)

OAE	Rodovia	km	Ext.	Larg.	Classe (Trem tipo - tf)	Material	Tipo de estrutura	Sistema construtivo	Ano de construção	VMD	Cidade mais próxima	Nota Superestrutura (2019)
14	BR-116	20,83	42,50	13,00	45	Concreto Protendido	Viga de concreto protendido	Pré-moldado protendido	1985	7148	Salgueiro	4

Fonte: O autor (2022).

Quadro 15 – OAEs analisadas em concreto protendido (BR-232/PE)

OAE	Rodovia	km	Ext.	Larg.	Classe (Trem tipo - tf)	Material	Tipo de estrutura	Sistema construtivo	Ano de construção	VMD	Cidade mais próxima	Nota Superestrutura (2019)
15	BR-232	312,31	31,30	13,10	45	Concreto Protendido	Viga de concreto protendido	Pré-moldado protendido	1985	12720	Sertânia	4
16	BR-232	514,12	35,80	13,30	45	Concreto Protendido	Viga de concreto protendido	Pré-moldado protendido	1985	34909	Salgueiro	4

Fonte: O autor (2022).

Quadro 16 – OAEs analisadas em concreto protendido (BR-407/PE)

OAE	Rodovia	km	Ext.	Larg.	Classe (Trem tipo - tf)	Material	Tipo de estrutura	Sistema construtivo	Ano de construção	VMD	Cidade mais próxima	Nota Superestrutura (2019)
17	BR-407	128,57	138,00	7,30	36*	Concreto Protendido	Viga Caixão Concreto Protendido	Moldado no local	1980	19015	Petrolina	4
18	BR-407	128,88	132,50	12,30	36*	Concreto Protendido	Viga Caixão Concreto Protendido	Moldado no local	1980	14460	Petrolina	2
19	BR-407	128,87	132,00	7,30	36*	Concreto Protendido	Viga Caixão Concreto Protendido	Moldado no local	1980	19015	Petrolina	4

Fonte: O autor (2022).

* Trem tipo obtido através da observação da evolução da seção transversal das pontes rodoviárias (DNIT, 2004b)

Quadro 17 – OAEs analisadas em concreto protendido (BR-408/PE)

OAE	Rodovia	km	Ext.	Larg.	Classe (Trem tipo - tf)	Material	Tipo de estrutura	Sistema construtivo	Ano de construção	VMD	Cidade mais próxima	Nota Superestrutura (2019)
20	BR-408	93,43	25,90	12,10	45*	Concreto Protendido	Viga de Concreto protendido	Pré-moldado protendido	1997	32735	São Lourenço da Mata	4
21	BR-408	105,03	23,40	11,20	36	Concreto Protendido	Viga de Concreto protendido	Pré-moldado protendido	1975	32735	Jaboatão dos Guararapes	4

Fonte: O autor (2022).

* Trem tipo obtido através da observação da evolução da seção transversal das pontes rodoviárias (DNIT, 2004b)

Quadro 18 – OAEs analisadas em concreto protendido (BR-428/PE)

OAE	Rodovia	km	Ext.	Larg.	Classe (Trem tipo - tf)	Material	Tipo de estrutura	Sistema construtivo	Ano de construção	VMD	Cidade mais próxima	Nota Superestrutura (2019)
22	BR-428	28,62	36,00	13,00	45	Concreto Protendido	Viga de Concreto protendido	Viga calha pré-moldada (Sist. protótipo) (Pré-moldado protendido)	1985	3596	Cabrobó	4

Fonte: O autor (2022).

Quadro 19 – OAEs analisadas em concreto armado (BR-101/PE)

OAE	Rodovia	km	Ext.	Larg.	Classe (Trem tipo - tf)	Material	Tipo de estrutura	Sistema construtivo	Ano de construção	VMD	Cidade mais próxima	Nota Superestrutura (2019)
23	BR-101	213,83	75,70	13,60	45	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Pré-moldado de concreto armado (Moldado no local)	1985	8850	Xexéu	4
24	BR-101	213,83	75,50	11,50	45	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Pré-moldado de concreto armado (Moldado no local)	1985	11508	Xexéu	4
25	BR-101	213,41	40,20	11,20	36	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1960	11508	Xexéu	3
26	BR-101	206,33	16,90	11,20	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1958	8850	Xexéu	4
27	BR-101	153,17	67,00	12,90	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1958	8850	Ribeirão	3
28	BR-101	73,19	32,00	13,90	36	Concreto Armado	Viga Caixão Concreto Armado	Moldado no local	1980	17885	Camaragibe	3
29	BR-101	66,48	302,30	9,20	36	Concreto Armado	Viga Caixão Concreto Armado	Moldado no local	1979	24509	Recife	3

30	BR-101	66,45	302,30	9,20	36	Concreto Armado	Viga Caixão Concreto Armado	Moldado no local	1979	23166	Recife	2
31	BR-101	65,25	92,60	12,30	36	Concreto Armado	Viga Caixão Concreto Armado	Moldado no local	1979	24509	Recife	4
32	BR-101	64,79	50,00	25,05	36	Concreto Armado	Viga Caixão Concreto Armado	Moldado no local	1979	41051	Recife	3
33	BR-101	62,25	92,60	12,30	36	Concreto Armado	Viga Caixão Concreto Armado	Moldado no local	1979	31060	Recife	2
34	BR-101	54,44	27,20	13,00	36	Concreto Armado	Viga Caixão Concreto Armado	Moldado no local	1979	32530	Paulista	3
35	BR-101	54,44	25,70	8,50	36	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1979	29405	Paulista	2
36	BR-101	51,96	13,97	6,25	36	Concreto Armado	Laje de concreto armado	Moldado no local	1960	29405	Abreu e Lima	3
37	BR-101	47,35	8,90	7,70	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Pré-moldado de concreto armado (Moldado no local)	1986	2343	Abreu e Lima	1
38	BR-101	41,38	36,00	8,15	36	Concreto Armado	Viga Caixão Concreto Armado	Moldado no local	1987	38194	Igarassu	3

Fonte: O autor (2022).

Quadro 20 – OAEs analisadas em concreto armado (BR-104/PE)

OAE	Rodovia	km	Ext.	Larg.	Classe (Trem tipo - tf)	Material	Tipo de estrutura	Sistema construtivo	Ano de construção	VMD	Cidade mais próxima	Nota Superestrutura (2019)
39	BR-104	82,68	25,00	10,00	36	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1982	11785	Agrestina	3
40	BR-104	89,82	30,30	10,10	36	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1965	11785	Agrestina	3
41	BR-104	91,88	100,00	10,00	36	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1965	11785	Agrestina	3
42	BR-104	100,84	10,10	11,20	36	Concreto Armado	Laje de concreto armado	Moldado no local	1965	11785	Cupira	3
43	BR-104	105,96	45,00	10,00	36	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1965	11785	Cupira	4
44	BR-104	111,46	44,00	10,10	36	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1965	11785	Cupira	4
45	BR-104	112,84	46,40	10,00	36	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1965	11785	Panelas	4
46	BR-104	113,65	46,20	10,00	36	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1965	11785	Panelas	3

47	BR-104	135,56	47,30	8,50	36	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1965	11785	Quipapá	4
48	BR-104	141,46	25,10	10,00	36	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1965	11785	Quipapá	3
49	BR-104	52,32	24,00	12,00	36	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1965	6052	Caruaru	4

Fonte: O autor (2022).

Quadro 21 – OAEs analisadas em concreto armado (BR-232/PE)

OAE	Rodovia	km	Ext.	Larg.	Classe (Trem tipo - tf)	Material	Tipo de estrutura	Sistema construtivo	Ano de construção	VMD	Cidade mais próxima	Nota Superestrutura (2019)
50	BR-232	129,86	40,00	16,00	45*	Concreto Armado	Viga Caixão Concreto Armado	Moldado no local	1989	56824*	Caruaru	4
51	BR-232	168,84	15,60	10,00	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1965	14206*	Belo Jardim	2
52	BR-232	139,44	6,80	11,30	36	Concreto Armado	Laje de concreto armado	Moldado no local	1965	22730*	Caruaru	5
53	BR-232	177,91	8,60	18,80	36	Concreto Armado	Laje de concreto armado	Moldado no local	1965	14206	Belo Jardim	3
54	BR-232	182,38	8,90	9,90	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	14206	Belo Jardim	3
55	BR-232	184,20	10,00	10,00	24	Concreto Armado	Laje de concreto armado	Moldado no local	1950	9614	Belo Jardim	2
56	BR-232	194,97	40,10	10,00	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	9614	Belo Jardim	3
57	BR-232	200,77	8,70	19,45	36	Concreto Armado	Laje de concreto armado	Moldado no local	1965	7571	Pesqueira	3

58	BR-232	206,87	10,60	10,20	24	Concreto Armado	Laje de concreto armado	Moldado no local	1950	7571	Pesqueira	3
59	BR-232	254,15	16,15	19,83	36	Concreto Armado	Laje de concreto armado	Moldado no local	1960	12720	Buíque	4
60	BR-232	274,75	47,18	9,71	36	Concreto Armado	Laje de concreto armado	Moldado no local	1972	12720	Arcoverde	3
61	BR-232	283,88	16,90	11,60	36	Concreto Armado	Laje de concreto armado	Moldado no local	1960	7250*	Arcoverde	3
62	BR-232	294,44	7,00	13,40	24	Concreto Armado	Laje de concreto armado	Moldado no local	1950	7250*	Custódia	3
63	BR-232	296,54	10,70	10,00	36	Concreto Armado	Laje de concreto armado	Moldado no local	1972	7250*	Arcoverde	3
64	BR-232	303,85	10,50	10,00	36	Concreto Armado	Laje de concreto armado	Moldado no local	1972	7250*	Sertânia	3
65	BR-232	304,69	10,50	10,00	36	Concreto Armado	Laje de concreto armado	Moldado no local	1972	7250*	Custódia	3
66	BR-232	444,67	13,20	14,90	36	Concreto Armado	Laje de concreto armado	Moldado no local	1960	11040	Serra Talhada	4
67	BR-232	539,41	80,90	5,90	36	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1975	34909	Parnamirim	3

68	BR-232	172,59	40,00	8,50	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	9614	Belo Jardim	2
69	BR-232	191,40	30,40	10,00	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	9614	Belo Jardim	2
70	BR-232	223,45	40,09	10,00	36	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1972	7571	Arcoverde	2
71	BR-232	288,04	115,00	10,00	36	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1972	12720	Arcoverde	3

Fonte: O autor (2022).

* Trem tipo obtido através da observação da evolução da seção transversal das pontes rodoviárias (DNIT, 2004b)

Quadro 22 – OAEs analisadas em concreto armado (BR-407/PE)

OAE	Rodovia	km	Ext.	Larg.	Classe (Trem tipo - tf)	Material	Tipo de estrutura	Sistema construtivo	Ano de construção	VMD	Cidade mais próxima	Nota Superestrutura (2019)
72	BR-407	74,64	43,00	10,00	36*	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1970	5093	Petrolina	4
73	BR-407	90,86	41,40	10,00	36*	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1970	5093	Petrolina	4
74	BR-407	100,01	20,50	10,00	36*	Concreto Armado	Laje de concreto armado	Moldado no local	1970	9943	Petrolina	3

Fonte: O autor (2022).

* Trem tipo obtido através da observação da evolução da seção transversal das pontes rodoviárias (DNIT, 2004b)

Quadro 23 – OAEs analisadas em concreto armado (BR-408/PE)

OAE	Rodovia	km	Ext.	Larg.	Classe (Trem tipo - tf)	Material	Tipo de estrutura	Sistema construtivo	Ano de construção	VMD	Cidade mais próxima	Nota Superestrutura (2019)
75	BR-408	93,43	24,70	12,80	45*	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1997	32735**	São Lourenço da Mata	4

Fonte: O autor (2022).

* Trem tipo obtido através da observação da evolução da seção transversal das pontes rodoviárias (DNIT, 2004b)

** Projeção de tráfego com base no contrato de contagem volumétrica do DNIT (2018b, 2018c) e no VMDa (DNIT, 2009)

Quadro 24 – OAEs analisadas em concreto armado (BR-423/PE)

OAE	Rodovia	km	Ext.	Larg.	Classe (Trem tipo - tf)	Material	Tipo de estrutura	Sistema construtivo	Ano de construção	VMD	Cidade mais próxima	Nota Superestrutura (2019)
76	BR-423	186,97	110,70	13,40	45	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1985	9044*	Águas Belas	3
77	BR-423	196,19	45,90	13,00	36	Concreto Armado	Viga Caixaão Concreto Armado	Moldado no local	1975	9044*	Águas Belas	3

Fonte: O autor (2022).

* Projeção de tráfego com base no contrato de contagem volumétrica do DNIT (2018b, 2018c) e no VMDa (DNIT, 2009)

Quadro 25 – OAEs analisadas em concreto armado (BR-424/PE)

OAE	Rodovia	km	Ext.	Larg.	Classe (Trem tipo - tf)	Material	Tipo de estrutura	Sistema construtivo	Ano de construção	VMD	Cidade mais próxima	Nota Superestrutura (2019)
78	BR-424	8,53	8,20	6,70	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	6050	Arcoverde	2
79	BR-424	10,25	8,30	6,80	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	6050	Arcoverde	3
80	BR-424	11,71	7,70	6,70	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	6050	Arcoverde	3
81	BR-424	14,13	16,50	6,71	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	6050	Pedra	2
82	BR-424	16,63	15,30	6,70	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	6050	Pedra	3
83	BR-424	23,15	10,80	7,30	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	6050	Arcoverde	3
84	BR-424	25,11	13,00	7,20	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	6050	Arcoverde	2
85	BR-424	26,41	41,30	7,45	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	6050	Venturosa	4

86	BR-424	28,16	7,80	7,20	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	6050	Arcoverde	3
87	BR-424	28,60	23,40	7,50	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	6050	Arcoverde	2
88	BR-424	30,06	12,10	7,20	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	6050	Venturosa	3
89	BR-424	32,62	7,80	7,30	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	6050	Venturosa	3
90	BR-424	33,56	15,90	7,30	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	6050	Venturosa	3
91	BR-424	33,94	13,00	7,30	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	6050	Venturosa	3
92	BR-424	37,46	13,80	7,00	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	6050	Venturosa	4
93	BR-424	41,09	6,90	7,30	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	6050	Venturosa	4
94	BR-424	42,97	40,50	8,30	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	6050	Águas Belas	3
95	BR-424	43,78	21,30	8,20	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	6050	Venturosa	3

96	BR-424	44,97	11,10	8,30	24	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1950	6050	Águas Belas	4
97	BR-424	82,93	10,60	8,10	36	Concreto Armado	Laje de concreto armado	Moldado no local	1965	8440	Caetés	3
98	BR-424	126,51	54,95	10,00	36	Concreto Armado	Viga de concreto armado	Moldado no local	1975	844*	Correntes	3

Fonte: O autor (2022).

* Projeção de tráfego com base no VMDa (DNIT, 2009)

5.2 APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE ANÁLISE DE SOBREVIVÊNCIA

Segundo Nabizadeh, Tabatabai e Tabatabai (2018), as técnicas de Análise de Sobrevivência se caracterizam como uma forma particular de análise de confiabilidade em que o tempo até a ocorrência de determinado evento é verificado por meio da consideração de variáveis (dependentes e independentes).

Nabizadeh, Tabatabai e Tabatabai (2018) ainda afirmam que, diferentemente das análises convencionais de confiabilidade das pontes, as análises de sobrevivência não consideram a relação entre carga e resistência. Além disso, essas técnicas são unicamente baseadas na observação e orientadas por dados.

Para aplicação das técnicas de Análise de Sobrevivência, adotou-se parte da metodologia empregada nas pesquisas de Nabizadeh, Tabatabai e Tabatabai (2019), Nabizadeh, Tabatabai e Tabatabai (2018), Tabatabai, Nabizadeh e Tabatabai (2018), e Tabatabai, Tabatabai e Lee (2011) os quais utilizaram os modelos de distribuição de Weibull, Log-Logística, Lognormal e Hypertabastic para avaliar os efeitos de algumas variáveis independentes que afetam a vida útil da superestrutura e dos tabuleiros de pontes em concreto.

Abdallah, Atadero e Ozbek (2021), Chyad e Abudayyeh (2020), Kim Ki *et al.* (2020), Lee *et al.* (2015), Agrawal, Kawaguchi e Chen (2010) apontaram em seus estudos que a superestrutura de pontes e seus componentes são extremamente suscetíveis à degradação, em decorrência da exposição a ambientes agressivos e às cargas elevadas que são transportadas pelos veículos de grande porte que trafegam sobre essas estruturas.

Sendo assim, este estudo de caso considerou os dados relativos à superestrutura das pontes de concreto da amostra (98 OAEs) que foram apresentados previamente no subitem 5.1.1, tendo em vista a sua extrema relevância entre as demais partes constituintes (mesoestrutura e infraestrutura). Para obtenção dos resultados, foram utilizados os softwares Excel (cálculo das estatísticas descritivas) e Linguagem R, versão 4.0.4 (análise estatística e gráfica).

Uma vez que os termos “sobrevivência” e “risco” frequentemente utilizados na medicina são similares aos vocábulos “confiabilidade” e “taxa de falha” usados em aplicações de engenharia, estes foram adotados para uma melhor adequação e compreensão no presente trabalho.

5.2.1 Análise dos dados

Para possibilitar a análise, foi considerada como variável resposta (dependente) a idade das OAEs. O comprimento total do tabuleiro, o material da estrutura e o VMD foram considerados como variáveis independentes. A observação desses parâmetros foi imprescindível, uma vez que permitiu investigar o impacto desses indicadores no processo de envelhecimento (tempo para alcançar o fim da vida útil) da superestrutura da ponte.

Dessa forma, após a inserção das variáveis supramencionadas em um arquivo Excel, foram gerados os Quadro 26 e Quadro 27 os quais apresentaram as estatísticas descritivas por meio da observação do número total de pontes e pelo tipo de material (concreto armado e concreto protendido), respectivamente.

Observa-se no Quadro 26 que as OAEs consideradas no presente estudo exibiram valores médios para idade, comprimento total e VMD de aproximadamente 50 anos, 43,00 m e 13.200 veículos.

Quadro 26 – Estatísticas descritivas para as variáveis consideradas das 98 OAEs analisadas

Estatísticas descritivas	Variáveis		
	Idade	Comprimento total	VMD
Média	50,26	43,49	13.196,00
Mediana	54,00	30,85	10.492,00
Moda	69,00	40,20	6.050,00
Desvio padrão	15,25	49,79	9.829,78
N	98		

Fonte: O autor (2022).

De acordo com os resultados destacados no Quadro 27, as pontes em concreto armado, em média, destacaram-se por possuírem tempo relativamente maior de construção em comparação àquelas construídas em concreto protendido. Isso pode ser justificado não apenas pelo início da utilização do concreto armado (Século XIX), mas também devido à maior proporcionalidade desse material na amostra analisada.

No que tange ao comprimento total, verificou-se que as superestruturas das pontes em concreto protendido apresentaram extensões um pouco maiores do que aquelas construídas em concreto armado. Em relação ao VMD, há indícios que, em média, o número de veículos que circulou nas pontes em concreto protendido foi um pouco maior quando comparado ao outro caso.

Quadro 27 – Informações estatísticas para as variáveis consideradas segundo o material da estrutura

Estatísticas Descritivas	Material da estrutura					
	Concreto Armado			Concreto Protendido		
	Idade	Comprimento total	VMD	Idade	Comprimento total	VMD
Média	54,83	38,42	12.874,00	35,39	60,04	14.247,00
Mediana	54,00	24,00	9.614,00	34,00	40,20	11.593,00
Moda	69,00	51,13	6.050,00	34,00	40,20	8.850,00
Desvio padrão	12,86	16,90	10.126,24	12,97	41,98	8.922,41
N	76			22		

Fonte: O autor (2022).

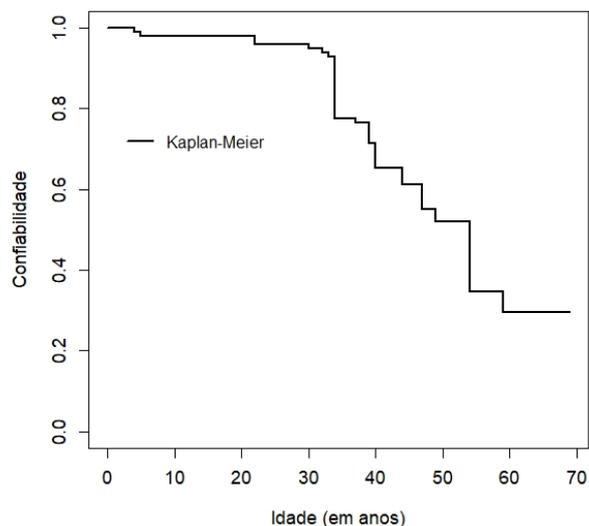
5.2.1.1 Estimativa das curvas de sobrevivência e de taxa de falha acumulada

A partir do estimador não-paramétrico proposto por Kaplan e Meier (1958), foi possível estimar as curvas de confiabilidade e de taxa de falha acumulada.

Para tanto, foi realizada a obtenção das curvas através da leitura dos dados informados em um arquivo .txt contendo as 98 OAEs desta pesquisa. As Figura 16 e Figura 17 representam a curva de confiabilidade estimada e a taxa de falha acumulada estimada, respectivamente.

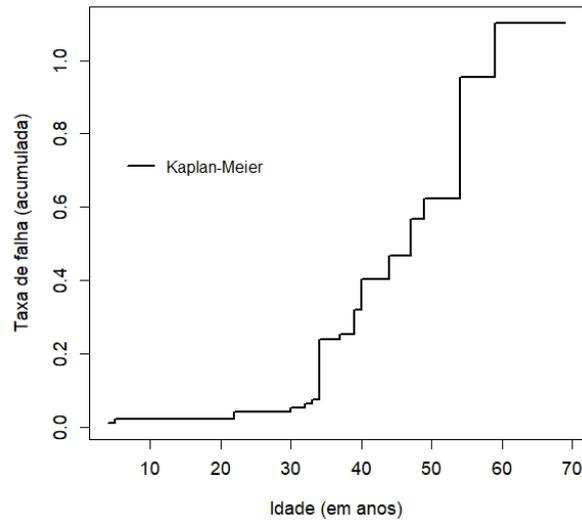
Verificou-se que, a partir dos 35 anos de construção, as superestruturas das pontes consideradas neste estudo têm sua confiabilidade reduzida e a taxa de falha acumulada aumentada, o que as condiciona a um maior risco de apresentar algum problema estrutural.

Figura 16 – Curva de confiabilidade estimada das 98 OAEs obtida via Kaplan-Meier



Fonte: O autor (2022).

Figura 17 – Curva da taxa de falha acumulada das 98 OAEs obtida via Kaplan-Meier

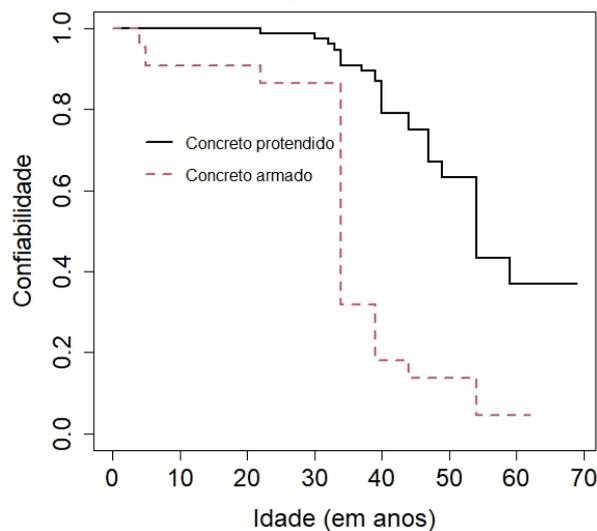


Fonte: O autor (2022).

Após executar essa análise preliminar, em termos do comportamento das curvas de confiabilidade de todas as pontes, foi realizada uma análise considerando o material da estrutura (concreto armado e concreto protendido).

De acordo com a Figura 18, a função de confiabilidade para as superestruturas das pontes em concreto protendido apresentou-se maior do que àquelas projetadas em concreto armado.

Figura 18 – Confiabilidade estimada das OAEs (concreto armado e protendido) obtida via Kaplan-Meier



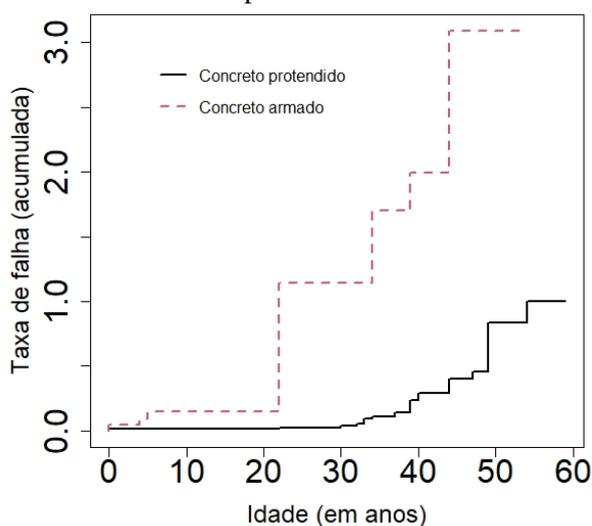
Fonte: O autor (2022).

Este fato corrobora com as características do concreto protendido, visto que permite alcançar grandes vãos com diminuição da altura das longarinas e das quantidades exigidas de

aço e concreto, devido ao uso eficiente de materiais de alta resistência, deduzindo assim, que as OAEs concebidas com esse tipo de material poderão alcançar uma maior vida útil.

Além das observações apresentadas anteriormente, também há razões intrínsecas (eliminação dos efeitos de tração, controle da corrosão por não existir fissuração e aplicação de cargas referentes aos maiores esforços que podem surgir, constituindo assim uma prova de carga) que contribuem para um melhor desempenho das estruturas projetadas em concreto protendido em relação às concebidas em concreto armado.

Figura 19 – Curva de taxa de falha acumulada das OAEs (concreto armado e protendido) obtida via Kaplan-Meier



Fonte: O autor (2022).

Uma vez que as curvas de confiabilidade (Figura 18) e de taxa de falha acumulada (Figura 19) apresentaram um cruzamento no início da vida útil, foi possível utilizar o modelo de tempo de falha acelerado o qual permitiu a incorporação de variáveis independentes que subsidiaram a análise.

5.2.1.2 Teste não-paramétrico para verificação da igualdade das curvas

No intuito de verificar a significância da amostra do presente estudo, foram utilizados os seguintes testes não-paramétricos: a) Teste Log-Rank, comumente denominado de Cox-Mantel, apresentado em Cox (1972) e Mantel e Haenszel (1959), b) Teste de Wilcoxon Generalizado proposto por Breslow (1974) e c) Teste apresentado por Tarone e Ware (1977).

A partir dos resultados obtidos do p-valor no Quadro 28, verificou-se que todos foram significativos ($0,0001 < 0,05$), sugerindo que as curvas de confiabilidade para o material da estrutura das pontes (concreto armado e concreto protendido) não são semelhantes para o conjunto de dados considerado na análise.

O Quadro 28 apresenta o resultado da aplicação dos testes não-paramétricos à amostra estudada.

Quadro 28 – Testes não-paramétricos para as curvas de confiabilidade segundo o material da estrutura

Testes	Z_{calc}	p -valor
Log-rank (Mantel-Cox)	4,262	<0,0001
Breslow (Wilcoxon generalizado)	5,132	<0,0001
Tarone-Ware	4,753	<0,0001

Fonte: O autor (2022).

5.2.1.3 Aplicação dos modelos de distribuição

Em virtude do cruzamento exibido nas curvas de confiabilidade (Figura 18) e taxa de falha acumulada (Figura 19) no início da vida útil, foi confirmada a possibilidade de utilização dos modelos de regressão de tempo de vida (falha) acelerado, tendo sido verificada ainda uma infinidade de modelos paramétricos que poderiam ser propostos para essa abordagem. Os critérios adotados neste estudo de caso para a escolha dos modelos de distribuição são explanados adiante.

5.2.1.3.1 Seleção dos modelos de distribuição utilizados no estudo de caso

Dentre os modelos de distribuição de probabilidade citados no capítulo 4 (Exponencial, Weibull, Lognormal e Log-logística), foram selecionados: a) Weibull e b) Lognormal.

Conforme afirmado por Wang, Li e Reddy (2019) e Borges (2014), o modelo Weibull se destaca por ser o mais utilizado na análise de sobrevivência, pois permite uma tolerância aceitável para a função de risco quando aquela é comparada à distribuição exponencial.

Uma vez que essa distribuição é a mais usada em modelagem de infraestrutura (Guler *et al.*, 2021) e possui como vantagem a sua utilização em amostras pequenas para avaliação da vida útil (DAS e SIL, 2020), que é o caso do conjunto de 98 OAEs dessa pesquisa, o modelo em questão foi considerado no estudo de caso.

Uma vez que a distribuição Lognormal é bastante adequada para modelos de deterioração de falhas, tais como, corrosão de armaduras e fissuramento no tabuleiro de uma ponte (DAS e SIL, 2020), o emprego deste modelo também foi considerado no estudo de caso.

- Critérios adotados para seleção do modelo de distribuição

Os critérios de informação de Akaike (Akaike Information Criteria - AICs) e bayesiano (Bayesian Information Criteria - BICs) são os métodos que podem ser utilizados para avaliação e comparação de modelos.

De acordo com Kim, Changkyu *et al.* (2020) e Hu *et al.* (2018), o AIC é uma medida bastante popular na comparação de modelos. Tal medida equilibra o ajuste do modelo com a sua simplicidade (LU, WANG e TOLLIVER, 2019).

Dessa forma, para selecionar o melhor modelo de distribuição entre os empregados neste estudo de caso, foi utilizado o AIC (Akaike, 1974), tendo em vista que essa metodologia considera o número de parâmetros do modelo e o valor maximizado estimado da função de log-verossimilhança.

Lu, Wang e Tolliver (2019) destacam que o modelo com o menor AIC é considerado o melhor modelo com base na validação aparente. Em outras palavras, um menor valor de AIC indica um melhor modelo/previsor.

O AIC pode ser representado pela Equação (47) (LU, WANG e TOLLIVER, 2019):

$$AIC = n \times \ln \left(\frac{\text{Soma residual dos quadrados}}{n} \right) + 2k \quad (47)$$

Onde:

- n - quantidade de dados da amostra;
- k - número de parâmetros livres da amostra.

Para aplicação das técnicas de análise de sobrevivência no presente estudo de caso, foram consideradas as seguintes variáveis:

- y – idade das pontes em anos (variável resposta do modelo);
- x₁ – refere-se ao comprimento total do tabuleiro das pontes;
- x₂ – representa o tráfego médio diário (VMD); e
- x₃ – variável dicotômica que representa o tipo de material da estrutura, (atribuição do valor “0” para concreto armado (n₁ = 76) e “1” para as OAEs em concreto protendido (n₂ = 22)

O ajuste dos modelos foi realizado por meio do software R, através das funções existentes nos pacotes *survival*, *survminer* e *flexsurv*. Sendo assim, utilizou-se o método da máxima verossimilhança para estimação dos parâmetros dos modelos pela função *flexsurvreg* do pacote *flexsurv* contido naquele software.

5.2.1.4 Resultados da aplicação dos modelos de distribuição

A partir da aplicação dos modelos de distribuição, foi possível realizar algumas observações.

Os Quadro 29 e Quadro 30 fornecem as estimativas dos parâmetros dos modelos considerados, assim como a “medida de bondade de ajuste” que proporcionou a mensuração da discrepância entre os valores observados e os esperados de cada modelo de probabilidade utilizado. Neste caso, considerou-se o próprio AIC.

Quadro 29 – Ajuste por meio da distribuição Weibull

Parâmetros	Estimativa	Desvio padrão	p-valor	AIC
θ	1,3139	0,1027	< 0,0001	620,5859
β_0	4,4297	0,0635	< 0,0001	
β_1	- 0,0009	0,0001	0,1100	
β_2	- 0,1873	0,0292	< 0,0001	
β_{31}	- 0,3650	0,0782	< 0,0001	

Fonte: O autor (2022).

Quadro 30 – Ajuste por meio da distribuição Lognormal

Parâmetros	Estimativa	Desvio padrão	p-valor	AIC
σ	1,5667	0,1027	< 0,0001	643,2743
β_0	4,3989	0,0924	< 0,0001	
β_1	- 0,0013	0,0001	0,1800	
β_2	- 0,0001	0,1126	< 0,0001	
β_{31}	- 0,6045	0,0887	< 0,0001	

Fonte: O autor (2022).

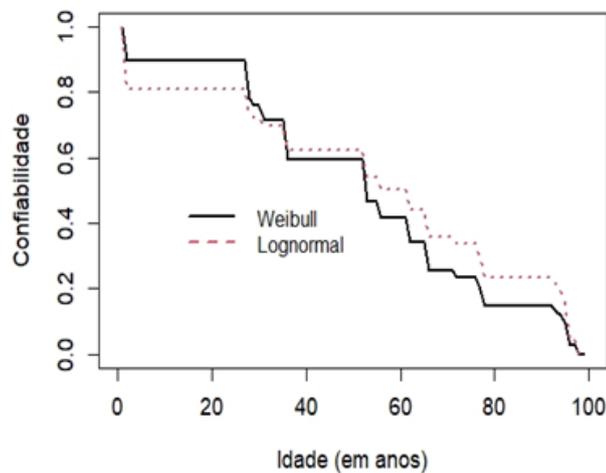
Diante disso, foi possível discutir alguns pontos:

- Em termos de vida útil de referência, considerou-se como 50, 63, 75 e 100 anos para ambos os materiais (concreto armado e protendido).
- Nesse sentido, alguns fatores que não foram considerados na modelagem podem influenciar a vida útil, tais como, critérios de projeto, qualidade na sua execução, manutenção preventiva, agressividade ambiental, utilização de adições (pozolanas), dentre outros. Assim sendo, para tentar quantificar a possível variabilidade (heterogeneidade) não observada nos modelos, podem-se utilizar na modelagem estatística e de confiabilidade os modelos de fragilidade, conforme Vaupel (1979). Destaca-se que, diante das limitações da amostra, caso fosse utilizada essa modelagem poderia levar a inconsistências no que tange à interpretação dos resultados.
- Uma vez considerado o mesmo tempo de vida útil para ambos os materiais, é plenamente possível, entretanto, existir uma ponte em concreto armado mais durável do que em concreto protendido, caso aquela não se encontre

em ambiente agressivo ou sua construção tenha respeitado as especificações técnicas da época, por exemplo.

Dessa forma, a Figura 20 abaixo apresenta as curvas estimadas de confiabilidade considerando os modelos Weibull e Lognormal. Observou-se que os modelos supracitados apresentaram uma boa similaridade em termos das curvas estimadas com o estimador de Kaplan Meier.

Figura 20 – Curvas estimadas de confiabilidade segundo os modelos Weibull e Lognormal (todas as pontes)



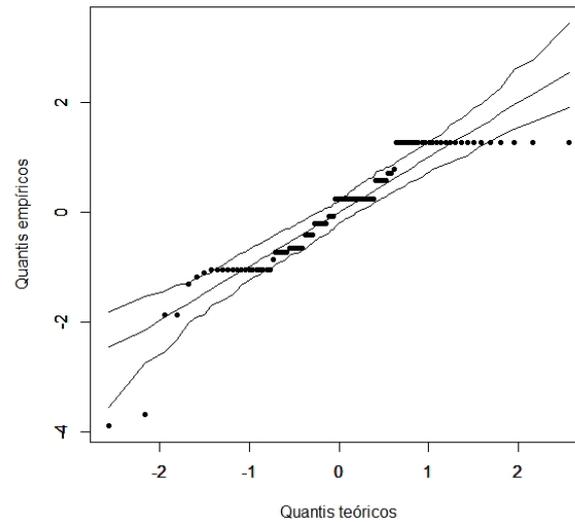
Fonte: O autor (2022).

5.2.1.5 Análise de resíduos

Adicionalmente, foi realizada uma análise de resíduos a fim de verificar a adequação dos modelos, tendo sido considerados os resíduos quantílicos propostos por Dunn e Smyth (1996).

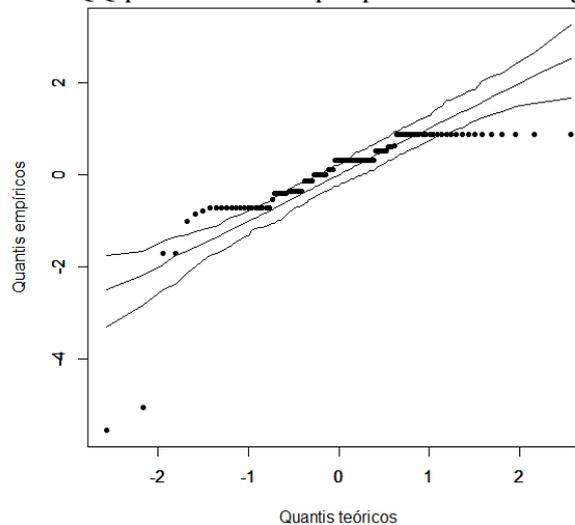
As Figura 21 e Figura 22 apresentam os gráficos quantis empíricos-quantis teóricos para ambos os modelos usados na análise (Weibull e Lognormal), respectivamente.

Figura 21 – QQ-plot com envelopes para o modelo Weibull



Fonte: O autor (2022).

Figura 22 – QQ-plot com envelopes para o modelo Lognormal



Fonte: O autor (2022).

Verificou-se que os resíduos ajustados considerando o modelo Weibull possuem um comportamento melhor em comparação àqueles gerados por meio do modelo Lognormal, principalmente quando são observadas as caudas dos resíduos ajustados.

Além disso, de acordo com o AIC obtido, o modelo de tempo de falha acelerado com a distribuição Weibull demonstrou um melhor desempenho em comparação com o modelo Lognormal. Portanto, as demais análises consideraram apenas o modelo Weibull.

5.2.1.6 Resultados obtidos através do Modelo Weibull

As estimativas das idades médias até o final da vida útil foram realizadas segundo o material da estrutura em níveis médios para o comprimento das pontes e a intensidade do

tráfego (VMD), de acordo com o modelo Weibull, para uma estimativa de 50, 63, 75 e 100 anos conforme os Quadros 31 a 34 adiante. Constatou-se que os valores obtidos das idades médias estimadas nos referidos quadros foram praticamente equivalentes.

Quadro 31 - Decis estimados para a idade média estimada no final da vida útil, segundo o modelo estimado e material de estrutura (50 anos)

Decis (confiabilidade)	Idade média estimada até o final da vida útil (em anos), segundo modelo Weibull	
	Concreto Armado	Concreto Protendido
20%	45	65
40%	37	57
60%	30	52
80%	23	43

Fonte: O autor (2022).

Quadro 32 - Decis estimados para a idade média estimada no final da vida útil, segundo o modelo estimado e material de estrutura (63 anos)

Decis (Confiabilidade)	Idade média estimada até o final da vida útil (em anos), segundo modelo Weibull	
	Concreto Armado	Concreto Protendido
20%	46	65
40%	36	58
60%	30	52
80%	22	44

Fonte: O autor (2022).

Quadro 33 - Decis estimados para a idade média estimada no final da vida útil, segundo o modelo estimado e material de estrutura (75 anos)

Decis (Confiabilidade)	Idade média estimada até o final da vida útil (em anos), segundo modelo Weibull	
	Concreto Armado	Concreto Protendido
20%	47	65
40%	38	58
60%	30	53
80%	23	44

Fonte: O autor (2022).

Quadro 34 – Decis estimados para a idade média estimada no final da vida útil, segundo o modelo estimado e material de estrutura (100 anos)

Decis (Confiabilidade)	Idade média estimada até o final da vida útil (em anos), segundo modelo Weibull	
	Concreto Armado	Concreto Protendido
20%	45	64
40%	37	61
60%	30	58
80%	22	44

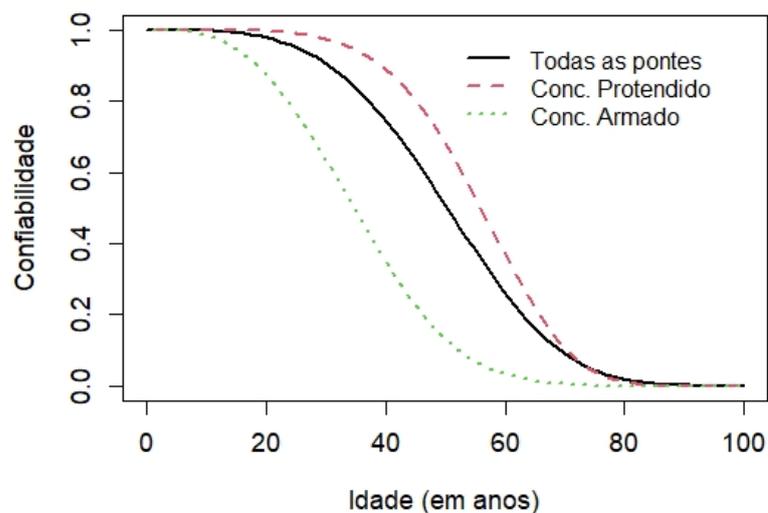
Fonte: O autor (2022).

5.2.1.7 Curvas de confiabilidade e taxa de falha acumulada

As curvas de confiabilidade e das taxas de falha acumulada em função da idade para os valores médios do VMD (13.196) e comprimento total do tabuleiro (43,49) das 98 OAEs estão apresentadas nas Figura 23 e Figura 24 considerando-se o modelo Weibull. Observou-se que as superestruturas das pontes em concreto armado e concreto protendido não possuem a mesma confiabilidade e taxa de falha acumulada.

A Figura 23 exibe a curva de confiabilidade das superestruturas das pontes em concreto armado e protendido aos 100 anos. Baseado nessa mesma figura, observou-se que a confiabilidade das pontes em concreto protendido foi maior do que das pontes em concreto armado.

Figura 23 – Curva de confiabilidade estimada segundo o modelo Weibull para o valor médio do VMD das superestruturas das 98 OAEs e pelo material da estrutura

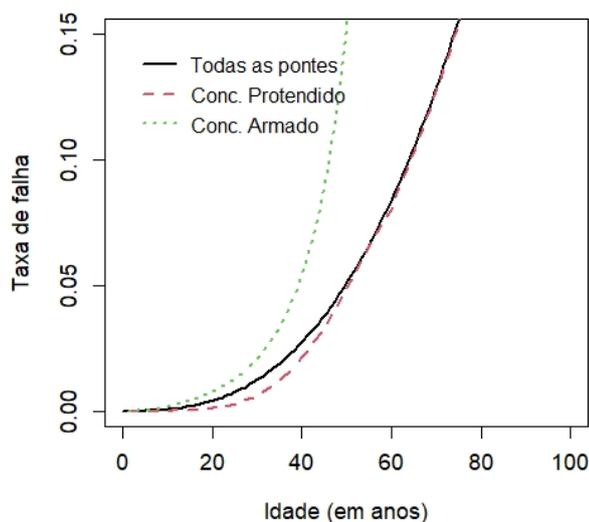


Fonte: O autor (2022).

A confiabilidade começa a partir de um valor de 1 ou 100% no início da vida útil e diminui à medida que a idade aumenta. Considerando, por exemplo, 50 anos de idade, a confiabilidade de todas as pontes, em concreto armado e em concreto protendido obtida foi de 0,52, 0,12 e 0,69, respectivamente (quando as variáveis independentes são mantidas nos valores médios).

Já a Figura 24 apresenta, para os 50 anos, a curva da taxa de falha acumulada das superestruturas das 98 OAEs e daquelas construídas em concreto protendido foi aproximadamente de 0,05. As pontes construídas em concreto armado apresentaram aproximadamente uma taxa de falha de 0,16.

Figura 24 – Curva da taxa de falha acumulada segundo o modelo Weibull para o valor médio do comprimento total das superestruturas das 98 OAEs e pelo material da estrutura



Fonte: O autor (2022).

5.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS FATORES À AMOSTRA ANALISADA

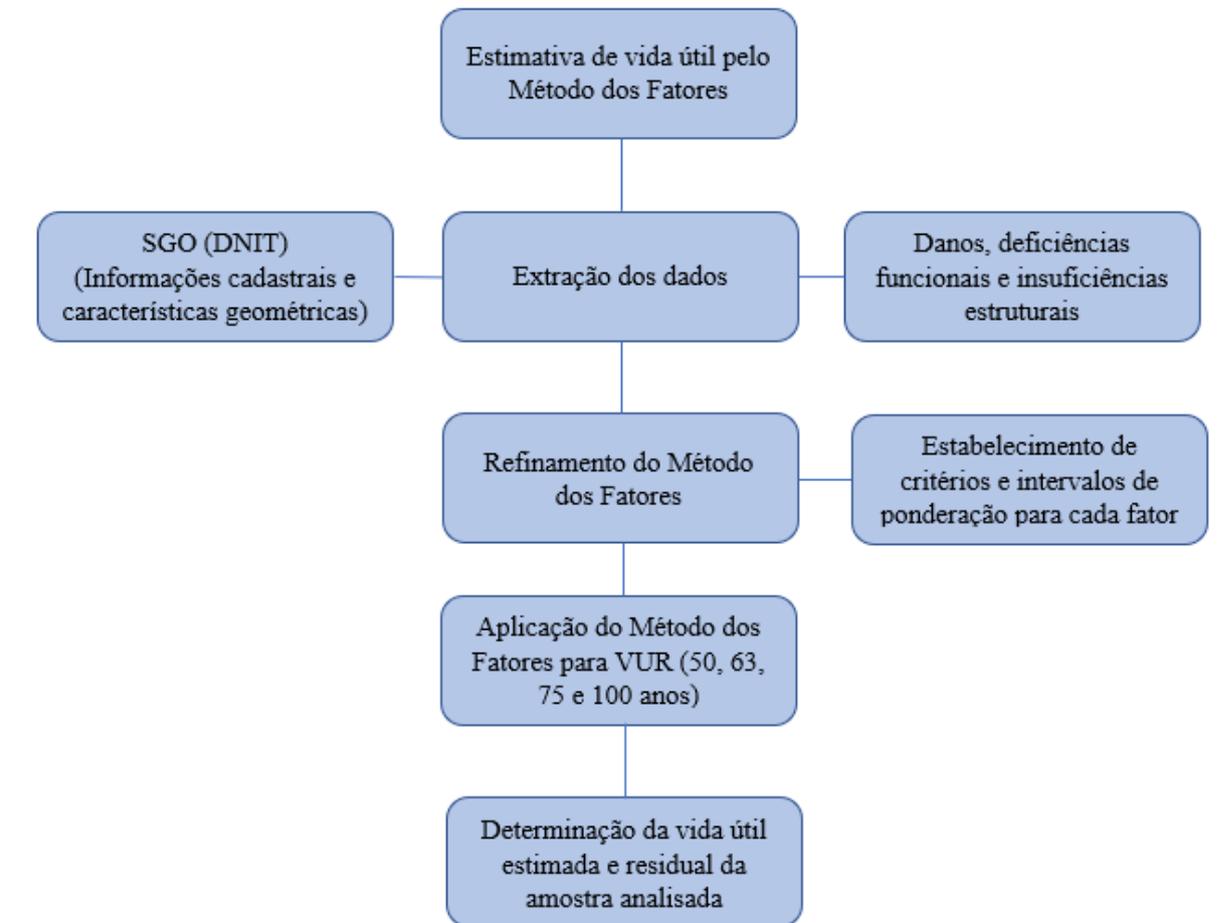
A estimativa de vida útil das OAEs foi executada por meio da aplicação do conceito de vida útil preconizado nas normas ISO 15686 (2011), NBR 15575-1 (ABNT, 2021) e NBR 15575-2 (ABNT, 2013).

Para isso, foram extraídas do SGO/DNIT as informações concernentes à incidência dos danos, das deficiências funcionais e das insuficiências estruturais resultantes das inspeções visuais realizadas em 2019. As vistorias realizadas respeitaram as diretrizes preconizadas na norma DNIT 010-PRO (2004).

Essas informações subsidiaram a definição de alguns critérios para possibilitar a avaliação das OAEs do presente estudo através do Método dos Fatores.

A Figura 25 apresenta o fluxograma da aplicação do Método dos Fatores à amostra analisada nesta pesquisa.

Figura 25 – Fluxograma da aplicação do Método dos Fatores à amostra analisada



Fonte: O autor (2022).

5.3.1 Estimativa de vida útil da amostra analisada

Para estimativa da vida útil do conjunto das OAES desta pesquisa, foi realizado inicialmente, um detalhamento dos problemas patológicos e das deficiências estruturais mais recorrentes em OAEs no que tange às suas partes constituintes (infraestrutura, mesoestrutura e superestrutura) conforme o Quadro 35.

Quadro 35 – Problemas patológicos e deficiências estruturais mais recorrentes nas partes constituintes de OAEs

Parte constituinte da OAE	Problemas patológicos e deficiências estruturais identificadas em OAEs
Infraestrutura	Erosão nas fundações de encontros e pilares
	Descalçamento das fundações de encontros e pilares
	Recalque de fundações de encontros e pilares
	Exposição e desconfinamento de estacas
	Deterioração do concreto de sapatas, blocos de estacas ou tubulões
	Corrosão das armaduras de sapatas, blocos de estacas e cintas
	Deterioração de concreto e corrosão de armaduras nos fustes dos tubulões
	Erosão nos aterros dos encontros
	Excentricidade entre o fuste do tubulão e o pilar
	Presença de concreto degradado em blocos de estacas devido à choque de veículos e/ou de embarcações
	Ninhos de concretagem em sapatas, blocos de estacas e cintas
	Deficiência no cobrimento com armadura exposta
	Deficiência no cobrimento sem armadura exposta
	Segregação do concreto nas sapatas, blocos de estacas e cintas
Mesoestrutura	Desplacamento do concreto de pilares e/ou dos encontros
	Lixiviação do concreto de pilares e/ou dos encontros
	Deformações em pilares e/ou nos encontros
	Fissuras em pilares e/ou nos encontros
	Corrosão de armaduras de pilares
	Esmagamento e/ou travamento de aparelhos de apoio
	Carbonatação, eflorescências, ninhos de concretagem e manchas superficiais
	Infiltrações causadas por deficiências de drenagem provenientes dos buzinetes
	Presença de concreto desagregado nos pilares devido à choque de veículos e/ou de embarcações
	Desaprumo e/ou deslocamento de pilares
Superestrutura	Desplacamento do concreto de longarinas
	Desplacamento do concreto de laje do tabuleiro
	Desplacamento do concreto de transversinas
	Fissuras nas longarinas
	Fissuras nas lajes do tabuleiro
	Fissuras nas transversinas
	Corrosão de armaduras nas longarinas
	Corrosão de armaduras nas lajes do tabuleiro
	Corrosão de armaduras nas transversinas
	Perda de seção de armadura e rompimento de estribos
	Deformações nas longarinas
	Deterioração dos lábios poliméricos das juntas de dilatação
	Ausência do perfil de vedação das juntas de dilatação
	Acúmulo de material nas juntas de dilatação

	Fissuras e/ou esmagamento de dente Gerber
	Carbonatação, eflorescências, ninhos de concretagem e manchas superficiais
	Esmagamento do concreto nos apoios
	Armadura principal de protensão exposta e com corrosão de armaduras
	Armadura principal rompida
	Colapso parcial de armadura principal ativa ou passiva
	Estai apresentando perda ou falta de protensão
	Flechas acima do previsto na NBR 6118
	Presença de concreto desagregado em longarinas devido à choque de veículos e/ou de embarcações
Laje (Placa) de transição	Recalque do terrapleno da laje de transição
	Desnível entre o aterro das cabeceiras e o estrado da ponte
	Fissura na laje de transição
Acabamento e serviços complementares	Acúmulo de material nos drenos de PVC, gerando empoçamento e/ou aquaplanagem
	Drenagem deficiente ou inexistente, provocando lâmina d'água e permitindo derrapagem ou aquaplanagem
	Guarda-corpo deteriorado ou inexistente
	Corrosão de armaduras dos guarda-corpos e nas barreiras New Jersey
Sinalização	Deficiência ou inexistência de placa de sinalização horizontal e vertical para prevenção de choque de veículos e de embarcação
Obras complementares	Inexistência ou fixação incorreta de defensas metálicas
	Placas de concreto do passeio apresentando buracos e/ou ausência de placas de concreto do passeio
	Deficiência na montagem do maciço de terra armada
	Escamas de concreto armado para terra armada apresentando desaprumo
	Deficiências no concreto soleira utilizado no arremate do maciço de terra armada

Fonte: Adaptado de Vitório (2008).

Na intenção de realizar uma análise comparativa entre os resultados oriundos da análise de sobrevivência e do método dos fatores, reitera-se que foram avaliados apenas os dados referentes à superestrutura de cada OAE da amostra, tendo em vista o nível de incerteza relacionado à integridade da fundação.

5.3.2 Panorama dos danos, das deficiências funcionais e das insuficiências estruturais da OAEs analisadas

Os dados concernentes à incidência dos danos aos elementos, das deficiências funcionais e das insuficiências estruturais da superestrutura das OAEs analisadas foram devidamente extraídos da mesma maneira como estão informados no SGO/DNIT.

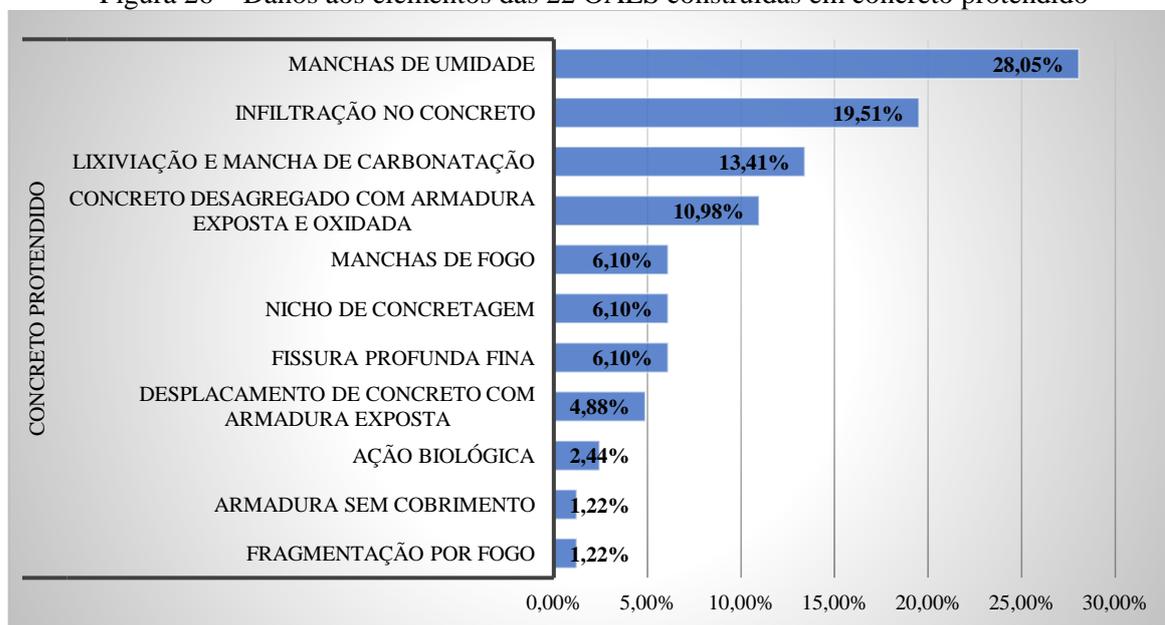
As Figuras 26 a 31 apresentam resumidamente as supracitadas informações por rodovia e pelo tipo de material da estrutura (concreto protendido e armado), assim como a indicação das suas quantidades e dos seus percentuais, respectivamente.

Considerando a impossibilidade de apresentação de todos os quadros que detalham as informações relativas aos danos aos elementos, deficiências funcionais e insuficiências estruturais, além dos pesos atribuídos a cada fator do conjunto da amostra analisada, foram apensados, a título de exemplo no presente estudo, apenas o Quadro A1. 1 (Apêndice A) e o Quadro B1. 1 (Apêndice B) referentes às rodovias BR-408/PE (Concreto protendido) e BR-423/PE (Concreto armado).

5.3.2.1 Concreto protendido

Observou-se que os danos aos elementos mais recorrentes no conjunto das 22 OAEs analisadas foram manchas de umidade, infiltração no concreto, concreto desagregado com armadura exposta e lixiviação e mancha de carbonatação os quais apresentaram 28,05%, 19,51%, 13,41% e 10,98%, respectivamente (Figura 26).

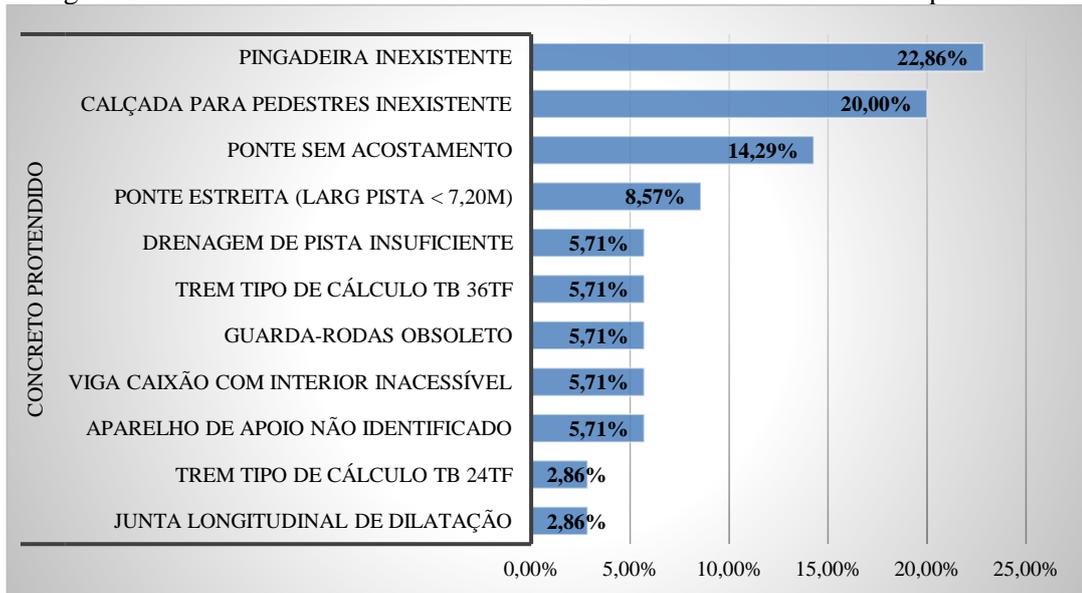
Figura 26 – Danos aos elementos das 22 OAEs construídas em concreto protendido



Fonte: O autor (2022).

A Figura 27 apresenta as deficiências funcionais mais presentes: pingadeira inexistente (22,86%), calçada para pedestres inexistente (20,00%) e ponte sem acostamento (14,29%).

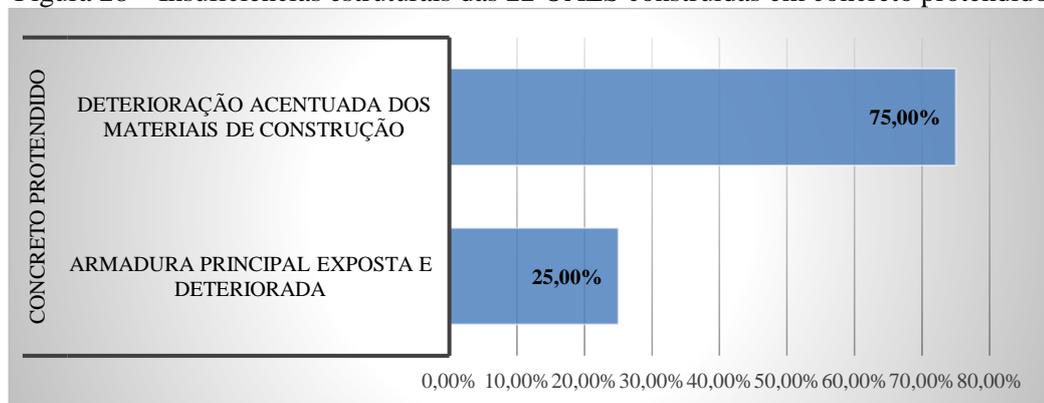
Figura 27 – Deficiências funcionais das 22 OAES construídas em concreto protendido



Fonte: O autor (2022).

Deterioração acentuada dos materiais e armadura principal exposta e deteriorada foram as insuficiências estruturais mais presentes no conjunto das 22 OAES em concreto protendido (Figura 28)

Figura 28 – Insuficiências estruturais das 22 OAES construídas em concreto protendido

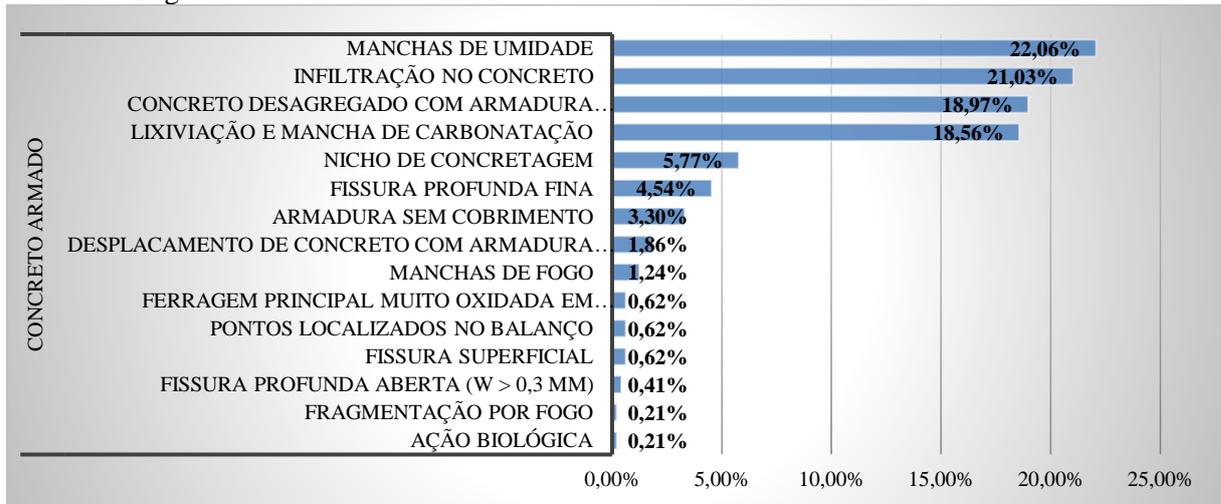


Fonte: O autor (2022).

5.3.2.2 Concreto armado

A Figura 29 destaca os danos aos elementos predominantes nas 76 OAES analisadas. Manchas de umidade, infiltração no concreto, concreto desagregado com armadura exposta e lixiviação e mancha de carbonatação os quais apresentaram 22,06%, 21,03%, 18,97% e 18,56%, respectivamente.

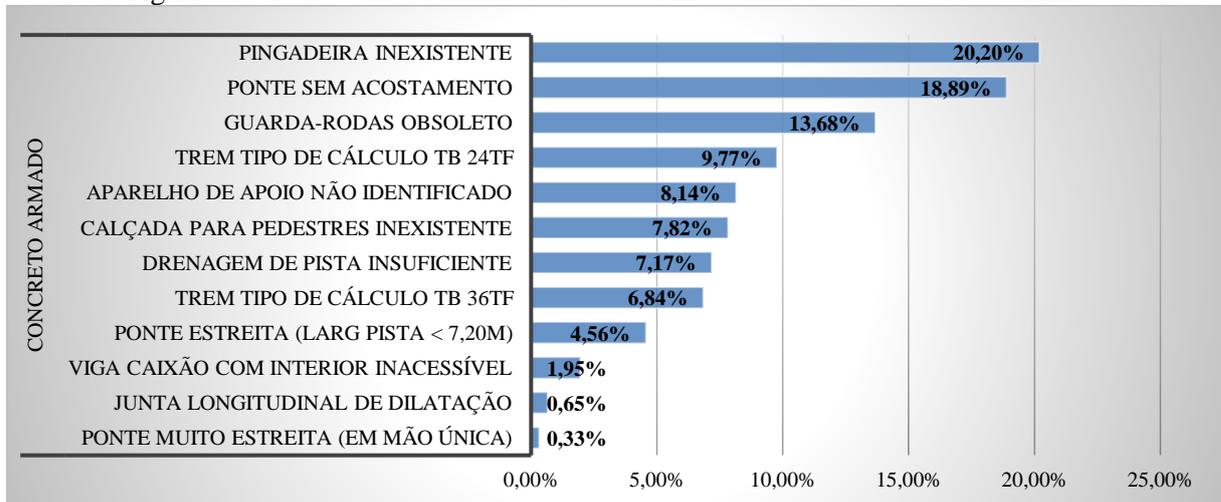
Figura 29 – Danos aos elementos das 76 OAES construídas em concreto armado



Fonte: O autor (2022).

As deficiências funcionais proeminentes nas 76 OAEs em concreto armado foram: pingadeira inexistente, ponte sem acostamento, guarda-rodas obsoleto e trem tipo de cálculo TB 24 tf apresentaram 20,20%, 18,89%, 13,68% e 9,77%, respectivamente (Figura 30).

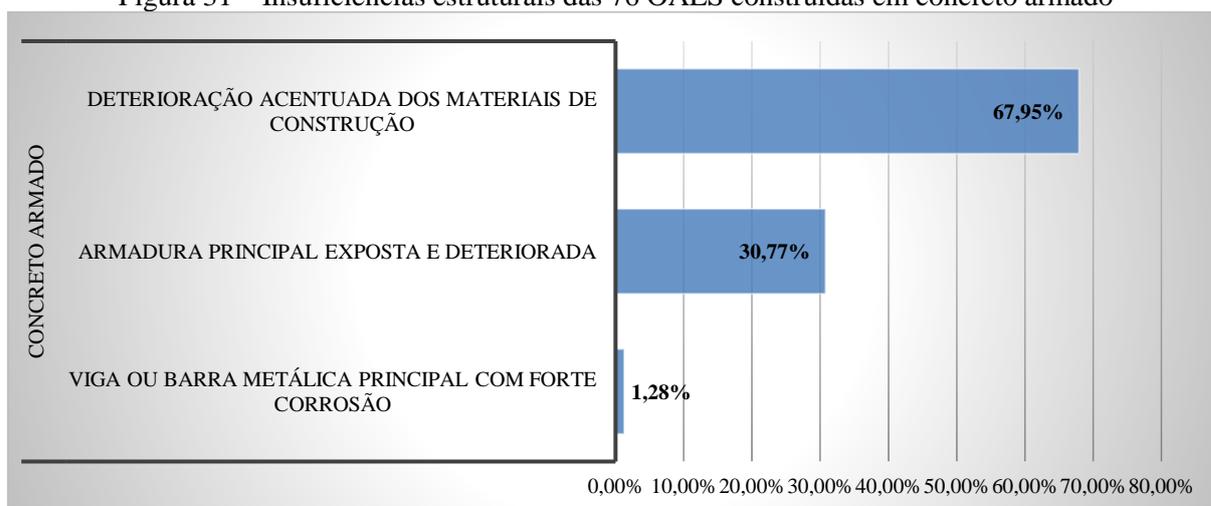
Figura 30 – Deficiências funcionais das 76 OAES construídas em concreto armado



Fonte: O autor (2022).

A Figura 31 exibe as insuficiências estruturais presentes nas 76 OAEs analisadas. Deterioração acentuada dos materiais de construção, armadura principal exposta e deteriorada, e viga ou barra metálica principal com forte corrosão apresentaram 67,95%, 30,77% e 1,28%, respectivamente.

Figura 31 – Insuficiências estruturais das 76 OAES construídas em concreto armado



Fonte: O autor (2022).

5.3.3 Critérios e intervalos de ponderação estabelecidos para cada fator

Para possibilitar a aplicação do Método dos Fatores, foram estabelecidos alguns critérios e percentuais de classificação para cada fator, visto que, no ato de vistoria de qualquer estrutura, deverão ser descritos os danos, as insuficiências estruturais e as deficiências funcionais observadas nas respectivas fichas de inspeção.

Conforme descrito no capítulo 4, a ponderação dos sete fatores (A, B, C, D, E, F e G) pode ser realizada por meio da imputação dos pesos 0,80 (situação muito desfavorável à estrutura ou elemento estrutural), 1,00 (Para atributos nas condições que foram consideradas para a vida útil ser idêntico à VUR) e 1,20 (situação muito favorável à estrutura ou ao elemento estudado), podendo, ainda, serem utilizados valores intermediários.

Sendo assim, uma vez que a degradação de uma estrutura ocorre de maneira a reduzir a sua vida útil, foi adotado o intervalo dos pesos utilizados iniciando-se na situação muito desfavorável (0,80) à neutra (1,00), pois apenas ocorrerá uma diminuição no nível de deterioração de uma ponte existente se for realizada alguma intervenção (recuperação, reforço e/ou reabilitação) ou se houver uma substituição dessa estrutura.

Caso sejam analisadas OAEs novas (recém-construídas), a quantificação dos pesos entre 1,00 e 1,20 poderia ser realizada, se fossem verificadas a adoção de materiais com características e desempenho superiores àqueles especificados em projeto (Fator A), condições acima das exigidas em projeto referentes à qualidade de execução, armazenamento (Fator C), dentre outros.

Dessa forma, são descritos adiante os critérios e intervalos de ponderação que foram adotados para cada fator.

5.3.3.1 Fator A

Em virtude da inexistência de informações relativas aos materiais, especialmente no que tange a ensaios in situ (Ex.: Verificação de concreto com f_{ck} acima do especificado em projeto) e em laboratório, foi atribuído o peso 1,00 por entender que tais materiais respeitaram todas as especificações previstas em projeto.

5.3.3.2 Fator B

Em decorrência da inexistência de informações relativas às especificações técnicas, à sequência do processo construtivo e aos materiais empregados, poderia ser atribuído o peso 1,00 para o Fator B por considerar que tais aspectos foram respeitados.

Entretanto, alguns aspectos relacionados à verificação do nível de projeto do componente (elemento) ou da estrutura (adequada concepção) contendo informações relativas à geometria, gabarito vertical, drenagem, foram facilmente verificados e devidamente ponderados, conforme deficiências funcionais no Quadro 36.

Quadro 36 – Peso e percentual para avaliação do Fator B

Deficiências funcionais	Peso
Pingadeira inexistente	0,900
Drenagem de pista insuficiente	0,900
Seção hidráulica (ponte curta)	0,800
Gabarito vertical sobre via urbana insuficiente	0,900
Gabarito vertical sobre rodovia insuficiente	0,800

Fonte: O autor (2022).

O peso final do Fator B foi obtido por meio da média aritmética simples entre as deficiências funcionais observadas. Para a inexistência de tais anomalias na estrutura analisada, foi atribuído o peso 1,00.

5.3.3.3 Fator C

Tendo em vista o não acompanhamento das OAEs à época da sua construção para fins de verificação das exigências e dos procedimentos executivos preconizados em projeto, bem

como a impossibilidade de apreciação da qualidade da execução, das condições de armazenamento, da facilidade de instalação, da proteção dos materiais e dos componentes da obra, foram considerados os seguintes indicadores para o Fator C, desde que caracterizados como falhas construtivas que compõem o conjunto que podem acontecer ou não simultaneamente:

- Existência de ninho de concretagem
- Exposição de armaduras por deficiência executiva (armadura sem cobrimento)
- Concreto com elevada porosidade
- Lixiviação e manchas de carbonatação
- Infiltração no concreto
- Fissuração profunda fina
- Fissura superficial
- Deslocamento do concreto
- Concreto desagregado com armadura exposta
- Região com concreto esmagado ou rompido
- Manchas de umidade
- Ferragem principal exposta em pontos localizados
- Erosão talude de aterro
- Estaca desconfinada
- Estaca esbelta com desconfinamento lateral
- Recalque de aterro de aproximação

As quatro últimas falhas construtivas acima foram relacionadas e deverão ser consideradas no momento de qualquer inspeção. Todavia, não foram ponderadas neste estudo, visto que apenas a superestrutura foi analisada.

O Quadro 37 apresenta o peso atribuído, destacando a situação e o percentual que foi observado para avaliação do Fator C, exceto o fenômeno da fissuração (fissura superficial e fissura profunda fina) que foi ponderado através do Quadro 38.

Para definição dos pesos do Quadro 38, foram considerados todos os intervalos entre os tipos de fissuras, dividindo-os em subgrupos para se obter os decréscimos que deveriam ser aplicados a partir do peso 1,00. O dano “fissura profunda aberta / rachadura ou trinca muito aberta” também foi considerado para realizar a obtenção dos pesos. Todavia, foi devidamente examinado no Fator F.

Quadro 37 – Situação, percentual e peso para avaliação do Fator C

Situação	Percentual	Peso
Neutra	0%	1,000
Pouco desfavorável	5 a 10%	0,950
Moderadamente desfavorável	10% a 15%	0,900
Desfavorável	15% a 20%	0,850
Muito Desfavorável	> 20%	0,800

Fonte: O autor (2022).

Quadro 38 – Tipo de fissura, classificação, abertura, percentual e peso para avaliação do Fator C

Tipo de fissura	Classificação	Abertura	Percentual	Peso
Fissura superficial	Microfissura	< 0,2 mm	< 5,0%	1,000
Fissura superficial	Microfissura	< 0,2 mm	5 a 10%	0,989
Fissura superficial	Microfissura	< 0,2 mm	10% a 15%	0,978
Fissura superficial	Microfissura	< 0,2 mm	15% a 20%	0,967
Fissura superficial	Microfissura	< 0,2 mm	> 20%	0,956
Fissura profunda fina	Fissura	0,2 mm a 0,4 mm	< 5,0%	0,956
Fissura profunda fina	Fissura	0,2 mm a 0,4 mm	5 a 10%	0,939
Fissura profunda fina	Fissura	0,2 mm a 0,4 mm	10% a 15%	0,922
Fissura profunda fina	Fissura	0,2 mm a 0,4 mm	15% a 20%	0,906
Fissura profunda fina	Fissura	0,2 mm a 0,4 mm	> 20%	0,889

Fonte: Adaptado de Bolina, Tutikian e Helene (2022).

O peso final do Fator C foi obtido por meio da média aritmética simples entre os danos observados.

5.3.3.4 Fator D

Foi considerada a atribuição do peso 0,80 para as pontes com tipologia estrutural “viga caixão de concreto armado e/ou protendido”, quando indicada a situação de interior inacessível. Do contrário, essas estruturas foram avaliadas com peso 1,00.

Em relação aos demais tipos de estrutura (Laje, viga Tipo “I”), de maneira semelhante aos Fatores A e B, também foi considerado o peso 1,00 por não existir ambiente interno.

5.3.3.5 Fator E

No que diz respeito ao Fator E, foram observados alguns critérios que norteiam a durabilidade das estruturas analisadas, tais como, o grau de corrosividade (NBR 8800/2008), a zona de agressividade ambiental (forte ou moderada) e a umidade relativa do ar (NBR 6118/2014) como indicadores para ponderação.

Dessa forma, as pontes localizadas na região metropolitana do Recife (RMR) foram quantificadas com o peso 0,80. As demais pontes da amostra foram ponderadas com o peso 1,00.

5.3.3.6 Fator F

Para avaliação do Fator F, seis critérios foram observados: quantidade média de veículos (VMD), verificação do trem tipo, insuficiências estruturais, ponderação da fissura profunda aberta / rachadura ou trinca muito aberta, atos de vandalismo e deficiências funcionais.

Sendo assim, foram elaborados alguns quadros os quais são apresentados adiante com as informações consideradas.

- Avaliação do VMD (F1)

O Quadro 39 apresenta os pesos atribuídos em função do tráfego de veículos, seguindo os preceitos da *IP – 02/2004 CLASSIFICAÇÃO DAS VIAS* da Prefeitura Municipal de São Paulo.

Uma vez que não é possível afirmar que um VMD acima de 10.000 poderá afetar significativamente uma ponte, situação que permitiria a atribuição do peso 0,80, foi adotado o peso 0,90 para a situação muito desfavorável (quantidade acima de 10.000 veículos), visto que sobrecargas elevadas decorrentes do tráfego podem ocasionar problemas funcionais no pavimento e contribuir para a fadiga dessas estruturas.

Quadro 39 – Situação, total de veículos e peso para avaliação do Fator F (F1 - VMD)

Situação	Total de veículos	Peso
Neutra	< 400	1,000
Pouco desfavorável (Pouco pesado)	401 - 1.500	0,975
Moderadamente desfavorável (Moderadamente pesado)	1.501 - 5.000	0,950
Desfavorável (Pesado)	5.001 a 10.000	0,925
Muito Desfavorável (Muito pesado)	> 10.000	0,900

Fonte: Adaptada da IP – 02/2004 (Prefeitura Municipal de São Paulo).

- Avaliação do trem tipo (F2)

Uma vez que não é possível afirmar que uma ponte concebida para a classe 24, que possui elevada robustez, não atenderá aos Estados Limite Último e de Serviço devido às sobrecargas oriundas da alta variabilidade (quantidade e capacidade de carga) do VMD atual, foi atribuído o peso 0,90 para a situação mais desfavorável (Quadro 40).

Vale destacar ainda que foram consideradas duas ponderações para o trem tipo 45 tf (situação pouco desfavorável – para estruturas construídas até 2013 e neutra – para estruturas construídas após 2013), considerando o melhoramento dos coeficientes de impacto da ABNT NBR 7188 que se encontra atualmente em revisão (Quadro 40).

Quadro 40 - Avaliação do Fator F (F2 - Trem tipo)

Situação	Trem tipo	Peso
Neutra**	45 tf	1,000
Pouco desfavorável*	45 tf	0,950
Desfavorável	36 tf	0,925
Muito Desfavorável	24 tf	0,900

Fonte: O autor (2022).

*Pontes construídas após 2013

**Pontes construídas até 2013

- Avaliação das insuficiências estruturais (F3)

Em relação à existência de insuficiências estruturais, os pesos foram considerados conforme Quadro 41.

Quadro 41 – Peso para avaliação do Fator F (F3 - Insuficiências estruturais)

Insuficiência estrutural	Peso
Vibração ou impacto excessivo	0,850
Armadura principal exposta e deteriorada	0,850
Armadura de protensão exposta e deteriorada	0,800

Fonte: O autor (2022).

- Avaliação de fissura profunda aberta / rachadura muito aberta (F4)

No que concerne à existência de trinca ou fissura muito aberta, os pesos foram considerados conforme Quadro 42.

Quadro 42 – Tipo de fissura, classificação, abertura, percentual e peso para avaliação do Fator F (F4 - Fissura profunda aberta / rachadura muito aberta)

Tipo de fissura	Classificação	Abertura	Percentual	Peso
Fissura profunda aberta, Rachadura ou trinca muito aberta	Trinca	0,5 mm a 1,4 mm	< 5,0%	0,889
Fissura profunda aberta, Rachadura ou trinca muito aberta	Trinca	0,5 mm a 1,4 mm	5 a 10%	0,867
Fissura profunda aberta, Rachadura ou trinca muito aberta	Trinca	0,5 mm a 1,4 mm	10% a 15%	0,844
Fissura profunda aberta, Rachadura ou trinca muito aberta	Trinca	0,5 mm a 1,4 mm	15% a 20%	0,822
Fissura profunda aberta, Rachadura ou trinca muito aberta	Trinca	0,5 mm a 1,4 mm	> 20%	0,800

Fonte: Adaptado de Bolina, Tutikian e Helene (2022).

- Avaliação dos atos de vandalismo (F5)

No que tange aos atos de vandalismo, foram consideradas as ocorrências de manchas e fragmentações por fogo, geralmente decorrentes da moradia irregular sob a estrutura, que podem ser frequentemente observadas no momento da inspeção das OAEs. O Quadro 43 destaca a situação, percentual e os pesos que foram atribuídos a esse tipo de dano.

Quadro 43 – Atos de vandalismo (F5 - Manchas e fragmentações por fogo)

Situação	Percentual	Peso
Neutra	< 5%	1,00
Pouco desfavorável	5% a 10%	0,95
Moderadamente desfavorável	10% a 15%	0,90
Desfavorável	15% a 20%	0,85
Muito Desfavorável	> 20%	0,80

Fonte: O autor (2022).

- Avaliação dos aparelhos de apoio e das juntas de dilatação (F6)

Além dos critérios destacados anteriormente, também foram relacionadas deficiências funcionais nos aparelhos de apoio que, mesmo não tendo sido consideradas neste estudo e devido à sua importância, deverão ser avaliados, caso seja investigada a mesoestrutura. Para a presente pesquisa, apenas foram efetivamente ponderados os danos nas juntas de dilatação (Quadro 44).

Quadro 44 – Peso para avaliação do Fator F (F6 - Aparelho de apoio e junta de dilatação)

Deficiências funcionais	Peso
Aparelho de apoio (danificado, deslocado da posição, com distorção exagerada)	0,80
Junta de dilatação danificada, inexistente ou expelida	0,80

Fonte: O autor (2022).

O peso final do Fator F foi obtido por meio da média aritmética simples entre os subfatores (F1 a F6).

5.3.3.7 Fator G

Considerando as dificuldades referentes à disponibilidade de recursos para execução de manutenções regulares, foi atribuído o peso 0,80 para o Fator G, visto que tal situação se apresenta como mais desfavorável para a estrutura.

5.3.4 Determinação da vida útil estimada da amostra analisada através do Método dos Fatores

A partir da observação dos danos nos elementos, das deficiências funcionais e das insuficiências estruturais nas OAEs, anteriormente evidenciadas nos Quadros 26 a 31 e adotando-se os critérios considerados para cada fator no subitem 5.3.3, utilizou-se o conceito de vida útil prescrito pelas normas ISO 15686 (2011), ABNT NBR 15575-1 (2021) e 15575-2 (2013).

Para aplicação do Método dos Fatores às 98 OAEs, selecionou-se como parâmetro a Vida Útil de Projeto (VUP) de 50, 63 e 75 anos prescrita pela Tabela C.6 – Exemplos de vida útil de projeto (VUP) da norma ABNT NBR 15575-1 (2021), uma vez que ainda não há no Brasil normativo ou outra literatura técnica que determine o período de vida para as Obras de Arte Especiais.

Ainda a esse respeito, também foi estimada a vida útil da amostrada analisada para uma VUR de 100 anos, visto que diversas pesquisas internacionais seguem a recomendação de alguns normativos, tais como, o Eurocódigo 0 (EN/1990) e a Norma Britânica BS 7543 (2003) os quais preveem o indicativo do tempo de vida útil de projeto de 100 e 120 anos, respectivamente, para esta tipologia construtiva.

Dessa forma, os resultados decorrentes da atribuição dos pesos para cada fator serão devidamente apresentados por tipo de material e rodovia. A esse respeito, como exemplo, o Apêndices A1.1 e B1.1 destacam as informações relativas aos sintomas, às falhas estruturais e ao peso imputado a cada fator das pontes das rodovias BR-408/PE (Concreto protendido) e BR-423/PE (Concreto armado).

É importante frisar que o ano de referência para avaliação da amostra considerada foi 2019 para ambos os materiais da estrutura.

Para apresentar os resultados obtidos por tipo de material e por rodovia, foram elaborados os Quadro 45 a Quadro 60 os quais contemplam as seguintes informações:

- OAE – Superestrutura considerada na pesquisa;
- Ano de construção;

- Fator total – Fator decorrente da multiplicação entre os pesos atribuídos aos setes fatores;
- VUR – Vida útil de referência (50, 63, 75 e 100 anos);
- VUE – Vida útil estimada obtida através da multiplicação do Fator Total pela VUR;
- Redução da VUR (%) – Verificação da VUE em relação à VUR;
- Vida útil residual – Resultado oriundo do ano de construção e do valor da VUE;
- Saldo Ano Avaliação – Decorrente da comparação entre o valor da vida útil residual e o ano de referência de avaliação (2019);
- Situação atual – Situação em que se encontra a superestrutura;
- Decisão a adotar – Indicação da decisão a adotar de acordo com a situação atual.

5.3.4.1 Concreto pretendido

Serão apresentadas adiante as informações resultantes da determinação da vida útil estimada e residual da superestrutura das OAEs construídas em concreto pretendido.

- BR-101/PE

Do total de 11 OAEs analisadas, apenas a OAE 6 (km 185,48) encontra-se no período de sobrevida ao serem adotados 50, 63 e 75 anos de VUR. Por se tratar da estrutura construída em 1957 (trem tipo 24 tf) dentre as consideradas e pelo tráfego pesado de veículos (8850), justifica-se a situação em que se encontra. Dessa forma, a adoção de uma intervenção a curto prazo se faz necessária.

As OAEs 7, 9 e 11 estão localizadas no trecho antigo da BR-101/PE se encontram no período de sobrevida ao ser adotada a VUR de 50 anos. Além disso, foram registrados elevados VMDs de 11247 (OAE 7), 11593 (OAEs 9 e 11) e estão localizadas na RMR, fatores esses que podem ter contribuído para a ocorrência dos danos, das deficiências funcionais e insuficiências estruturais nessas estruturas, recomendando-se, também, uma intervenção imediata.

Já a OAE 10, também situada no trecho antigo da BR-101/PE, destacou-se por estar no período de sobrevida para 50 e 63 anos de VUR. Todavia, a referida OAE apresentou a maior redução da vida útil de referência (46,96%) em comparação as demais estruturas analisadas, mesmo apresentando um trem tipo de 45 tf e ano de construção 1985. Entretanto, o VMD (11247) e a localização na RMR (Município do Cabo de Santo Agostinho) podem ter colaborado para a referida redução.

Outro aspecto importante se refere à OAE 8 (km 13,31), pois o ano de construção informado no sistema não condiz com a estrutura in loco, a qual foi executada a partir da instalação de uma fábrica de automóveis no Estado de Pernambuco.

Sendo assim, a data da construção considerada foi 2014. Ao realizar a estimativa de vida útil com essa informação, verificou-se que a OAE 8 apresentou elevada redução de VUR. Tal fato pode ser oriundo da inconsistência das informações inseridas no banco de dados do DNIT ou subjetividade do inspetor no momento da vistoria. Ressalta-se ainda que trafegaram por esse viaduto 8850 veículos em 2019.

Os valores médios da VUE para 50, 63, 75 e 100 anos e de redução da VUR para as 11 OAEs foram: 31,51 anos, 39,71 anos, 47,27 anos, 63,03 anos e 36,97% respectivamente.

O Quadro 45 detalha os valores da VUE e de redução da VUR de cada OAE em protendido da BR-101/PE.

Quadro 45 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-101/PE – Concreto protendido)

OAE	Ano de construção	Fator Total	VUR (anos)	VUE (anos)	Redução da VUR (%)	VU Residual	Saldo Ano Avaliação	Situação Atual	Decisão a Adotar
1	1985	0,725	50	36,23	27,54%	2021	2	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
1	1985	0,725	63	45,65	27,54%	2031	12	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
1	1985	0,725	75	54,34	27,54%	2039	20	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
1	1985	0,725	100	72,46	27,54%	2057	38	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
2	1985	0,685	50	34,27	31,46%	2019	0	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
2	1985	0,685	63	43,18	31,46%	2028	9	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
2	1985	0,685	75	51,41	31,46%	2036	17	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
2	1985	0,685	100	68,54	31,46%	2054	35	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
3	2015	0,678	50	33,92	32,16%	2049	30	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
3	2015	0,678	63	42,74	32,16%	2058	39	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
3	2015	0,678	75	50,88	32,16%	2066	47	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
3	2015	0,678	100	67,84	32,16%	2083	64	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
4	1985	0,675	50	33,75	32,51%	2019	0	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
4	1985	0,675	63	42,52	32,51%	2028	9	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
4	1985	0,675	75	50,62	32,51%	2036	17	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
4	1985	0,675	100	67,49	32,51%	2052	33	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
5	1985	0,687	50	34,33	31,35%	2019	0	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
5	1985	0,687	63	43,25	31,35%	2028	9	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
5	1985	0,687	75	51,49	31,35%	2036	17	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva

5	1985	0,687	100	68,65	31,35%	2054	35	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
6	1957	0,689	50	34,46	31,07%	1991	-28	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
6	1957	0,689	63	43,43	31,07%	2000	-19	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
6	1957	0,689	75	51,70	31,07%	2009	-10	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
6	1957	0,689	100	68,93	31,07%	2026	7	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
7	1985	0,554	50	27,69	44,62%	2013	-6	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
7	1985	0,554	63	34,89	44,62%	2020	1	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
7	1985	0,554	75	41,54	44,62%	2027	8	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
7	1985	0,554	100	55,38	44,62%	2040	21	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
8	2014	0,559	50	27,93	44,15%	2042	23	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
8	2014	0,559	63	35,19	44,15%	2049	30	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
8	2014	0,559	75	41,89	44,15%	2056	37	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
8	2014	0,559	100	55,85	44,15%	2070	51	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
9	1985	0,554	50	27,69	44,62%	2013	-6	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
9	1985	0,554	63	34,89	44,62%	2020	1	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
9	1985	0,554	75	41,54	44,62%	2027	8	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
9	1985	0,554	100	55,38	44,62%	2040	21	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
10	1985	0,530	50	26,52	46,96%	2012	-7	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
10	1985	0,530	63	33,42	46,96%	2018	-1	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
10	1985	0,530	75	39,78	46,96%	2025	6	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
10	1985	0,530	100	53,04	46,96%	2038	19	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
11	1985	0,597	50	29,86	40,28%	2015	-4	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
11	1985	0,597	63	37,62	40,28%	2023	4	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
11	1985	0,597	75	44,79	40,28%	2030	11	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
11	1985	0,597	100	59,72	40,28%	2045	26	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva

Fonte: O autor (2022).

- BR-104/PE

As OAEs 12 (km 93,77) e 13 (km 139,11) foram selecionadas desta rodovia e se encontram no período de sobrevida para 50, 63 e 75 anos de VUR. As estruturas apresentaram reduções de VUR de 30,10% e 32,15%, respectivamente.

Vale destacar que a OAE 13 alcançou a vida útil residual em 1999. Adotar uma intervenção imediata é imprescindível.

Os valores médios da VUE para 50, 63, 75 e 100 anos e de redução da VUR para as duas OAEs foram: 34,43 anos, 43,39 anos, 51,66 anos, 68,87 anos e 31,13% respectivamente.

Uma vez que tais OAEs não estão situadas na RMR e foram construídas em 1965 (trem tipo 36 tf), 11785 veículos transitaram em 2019 pelas duas OAEs. Este fato pode ter propiciado o aparecimento de danos, deficiências funcionais e insuficiências estruturais, justificando assim o nível de degradação dessas estruturas.

O Quadro 46 detalha os valores da VUE e de redução da VUR de cada OAE em protendido da BR-104/PE.

Quadro 46 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-104/PE – Concreto protendido)

OAE	Ano de construção	Fator Total	VUR (anos)	VUE (anos)	Redução da VUR (%)	VU Residual	Saldo Ano Avaliação	Situação Atual	Decisão a Adotar
12	1965	0,699	50	34,95	30,10%	2000	-19	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
12	1965	0,699	63	44,04	30,10%	2009	-10	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
12	1965	0,699	75	52,43	30,10%	2017	-2	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
12	1965	0,699	100	69,90	30,10%	2035	16	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
13	1965	0,678	50	33,92	32,15%	1999	-20	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
13	1965	0,678	63	42,74	32,15%	2008	-11	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
13	1965	0,678	75	50,89	32,15%	2016	-3	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
13	1965	0,678	100	67,85	32,15%	2033	14	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva

Fonte: O autor (2022).

- BR-116/PE

Na rodovia BR-116, apenas a OAE 14 (km 20,83) foi selecionada para avaliação da VUE a qual apresentou vidas úteis estimadas para 50, 63, 75 e 100 anos de VUR: 34,08 anos, 42,93 anos, 51,11 anos e 68,15 anos, e redução da VUR de 31,85%, respectivamente.

É importante salientar que a referida OAE está em conformidade com a VUR, não se encontrando no período de sobrevida, embora o seu VMD (7148) foi pesado em 2019. O trem tipo de 45 tf também contribui para a condição de conformidade acima destacada.

O Quadro 47 exhibe os valores da VUE e de redução da VUR da OAE 14 em concreto protendido da BR-116/PE.

Quadro 47 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-116/PE – Concreto protendido)

OAE	Ano de construção	Fator Total	VUR (anos)	VUE (anos)	Redução da VUR (%)	VU Residual	Saldo Ano Avaliação	Situação Atual	Decisão a Adotar
14	1985	0,682	50	34,08	31,85%	2019	0	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva

14	1985	0,682	63	42,93	31,85%	2028	9	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
14	1985	0,682	75	51,11	31,85%	2036	17	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
14	1985	0,682	100	68,15	31,85%	2053	34	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva

Fonte: O autor (2022).

- BR-232/PE

Das OAEs 15 e 16, as quais estão situadas respectivamente nos municípios de Sertânia (km 312,31) e Salgueiro (km 514,12), somente a OAE 15 apresentou-se no período de sobrevida quando foi utilizada uma VUR de 50 anos. Para 63, 75 e 100 anos, essa OAE encontra-se em conformidade com a vida útil de referência.

A OAE 16 encontra-se em conformidade quando foram adotados os quatro anos de vida útil de referência. A redução da VUR foi de 33,70% (OAE 15) e de 28,37% (OAE 16).

Uma vez que tais OAEs não estão situadas na RMR e foram construídas em 1985 (trem tipo 45 tf), o número de veículos que trafegaram em 2019 pela OAE 15 (12720) e OAE 16 (34909) pode ter favorecido o surgimento dos danos, das deficiências funcionais e insuficiências estruturais, justificando, dessa forma, o grau de deterioração dessas estruturas.

Os valores médios da VUE para 50, 63, 75 e 100 anos e de redução da VUR para as duas OAEs foram: 34,48 anos, 43,45 anos, 51,72 anos, 68,97 anos e 31,04% respectivamente.

O Quadro 48 exhibe os valores da VUE e de redução da VUR das OAEs em concreto protendido da BR-232/PE.

Quadro 48 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-232/PE – Concreto protendido)

OAE	Ano de construção	Fator Total	VUR (anos)	VUE (anos)	Redução da VUR (%)	VU Residual	Saldo Ano Avaliação	Situação Atual	Decisão a Adotar
15	1985	0,663	50	33,15	33,70%	2018	-1	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
15	1985	0,663	63	41,77	33,70%	2027	8	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
15	1985	0,663	75	49,73	33,70%	2035	16	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
15	1985	0,663	100	66,30	33,70%	2051	32	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
16	1985	0,716	50	35,82	28,37%	2021	2	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
16	1985	0,716	63	45,13	28,37%	2030	11	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva

16	1985	0,716	75	53,72	28,37%	2039	20	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
16	1985	0,716	100	71,63	28,37%	2057	38	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva

Fonte: O autor (2022).

- BR-407/PE

As OAEs 17 (km 128,57), 18 (km 128,88) e 19 (km 128,87), foram selecionadas para estimativa de vida útil da BR-407/PE. Nas três OAEs, foi atingido o período de sobrevida ao se adotar 50 anos de VUR. Para os demais anos de vida útil de referência, as OAEs se encontram em conformidade com a VUR.

Alguns aspectos podem ter contribuído para a presença dos danos, das deficiências funcionais e insuficiências estruturais, como por exemplo, a localização das supracitadas OAEs (Petrolina), visto que essas OAEs estão localizadas bem próximas ao Rio São Francisco, o qual serve de rota de passagem para a cidade de Juazeiro/BA, fato que proporciona grandes viagens de veículos leves e de caminhões, caracterizando-se como um dos tráfegos mais pesados da região.

Sendo assim, o ano de construção (1980), trem tipo (36 tf), largura de pista inferior a 7,20m, além da quantidade de veículos que circulou em 2019 pelas OAEs 17 e 19 (19015) e 18 (14460), podem ter influenciado negativamente os resultados obtidos para estimativa da vida útil dessas estruturas.

Os valores médios da VUE para 50, 63, 75 e 100 anos e de redução da VUR para as duas OAEs foram: 34,04 anos, 42,89 anos, 51,05 anos, 68,07 anos e 31,93% respectivamente.

O Quadro 49 apresenta os valores da VUE e de redução da VUR das três OAEs em concreto pretendido da BR-407/PE.

Quadro 49 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-407/PE – Concreto pretendido)

OAE	Ano de construção	Fator Total	VUR (anos)	VUE (anos)	Redução da VUR (%)	VU Residual	Saldo Ano Avaliação	Situação Atual	Decisão a Adotar
17	1980	0,682	50	34,08	31,84%	2014	-5	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
17	1980	0,682	63	42,94	31,84%	2023	4	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
17	1980	0,682	75	51,12	31,84%	2031	12	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
17	1980	0,682	100	68,16	31,84%	2048	29	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
18	1980	0,674	50	33,69	32,61%	2014	-5	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata

18	1980	0,674	63	42,45	32,61%	2022	3	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
18	1980	0,674	75	50,54	32,61%	2031	12	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
18	1980	0,674	100	67,39	32,61%	2047	28	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
19	1980	0,687	50	34,34	31,33%	2014	-5	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
19	1980	0,687	63	43,26	31,33%	2023	4	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
19	1980	0,687	75	51,50	31,33%	2032	13	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
19	1980	0,687	100	68,67	31,33%	2049	30	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva

Fonte: O autor (2022).

- BR-408/PE

Das duas OAEs avaliadas dessa rodovia, apenas a OAE 21 (Km 105,03), a qual apresenta ano de construção de 1975 e trem tipo 36 tf, encontra-se no período de sobrevida quando foram adotados 50, 63 e 75 anos de VUR. A OAE 20, localizada no km 93,43, encontra-se em conformidade com a VUR.

Embora a OAE 20 tenha sido projetada para o trem tipo de 45 tf e possua 22 anos a mais de construção do que a OAE 21, essas estruturas apresentaram reduções de VUR bem próximas: 46,96% (OAE 20) e 44,86% (OAE 21).

Os valores médios da VUE para 50, 63, 75 e 100 anos e de redução da VUR para as OAEs analisadas foram: 27,05 anos, 34,08 anos, 40,57 anos, 54,09 anos e 45,91% respectivamente. As reduções obtidas nessas estimativas podem estar relacionadas com o elevadíssimo VMD (32735) trafegado em 2019 por ambas as OAES.

O Quadro 50 apresenta os valores da VUE e de redução da VUR das duas OAEs em concreto protendido da BR-408/PE.

Quadro 50 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-408/PE – Concreto protendido)

OAE	Ano de construção	Fator Total	VUR (anos)	VUE (anos)	Redução da VUR (%)	VU Residual	Saldo Ano Avaliação	Situação Atual	Decisão a Adotar
20	1997	0,530	50	26,52	46,96%	2024	5	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
20	1997	0,530	63	33,42	46,96%	2030	11	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
20	1997	0,530	75	39,78	46,96%	2037	18	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva

20	1997	0,530	100	53,04	46,96%	2050	31	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
21	1975	0,551	50	27,57	44,86%	2003	-16	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
21	1975	0,551	63	34,74	44,86%	2010	-9	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
21	1975	0,551	75	41,36	44,86%	2016	-3	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
21	1975	0,551	100	55,14	44,86%	2030	11	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva

Fonte: O autor (2022).

- BR-423/PE

Não foi realizada a estimativa de vida útil para essa rodovia, visto que não foi possível selecionar alguma OAE construída em concreto protendido.

- BR-424/PE

De maneira semelhante à BR-423, não foi realizada a estimativa de vida útil para essa rodovia, visto que não foi possível selecionar alguma OAE construída em concreto protendido.

- BR-428/PE

A OAE 22, situada no km 28,62 dessa rodovia, encontra-se em conformidade com a VUR para 50, 63, 75 e 100 anos, tendo apresentado os seguintes valores para a VUE e redução da vida útil de referência: 36,12 anos, 45,51 anos, 54,18 anos, 72,24 anos e 27,76%, respectivamente.

Mesmo tendo recebido a quantidade de 3596 veículos por dia em 2019, o que é considerado moderadamente pesado, acredita-se que este critério não tenha favorecido a degradação da estrutura. Entretanto, existe uma inconsistência no que se refere ao ano de construção informado no SGO/DNIT, visto que a referida estrutura não foi construída em 1985, pois há registros na Unidade Local Petrolina da sua construção entre 2012 e 2015. Embora haja essa divergência, o trem tipo dessa OAE é 45 tf, o que pode ter minimizado o impacto do referido critério.

O Quadro 51 apresenta os valores da VUE e de redução da VUR da OAE 22 em concreto protendido da BR-428/PE.

Quadro 51 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-428/PE – Concreto protendido)

OAE	Ano de construção	Fator Total	VUR (anos)	VUE (anos)	Redução da VUR (%)	VU Residual	Saldo Ano Avaliação	Situação Atual	Decisão a Adotar
22	1985	0,722	50	36,12	27,76%	2021	2	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
22	1985	0,722	63	45,51	27,76%	2031	12	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
22	1985	0,722	75	54,18	27,76%	2039	20	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
22	1985	0,722	100	72,24	27,76%	2057	38	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva

Fonte: O autor (2022).

5.3.4.2 Concreto armado

Serão apresentadas adiante as informações resultantes da determinação da vida útil estimada e residual da superestrutura das OAEs construídas em concreto armado. É importante destacar que as estimativas foram realizadas adotando-se o ano de 2019 como referência.

- BR-101/PE

Foram selecionadas 16 OAEs para avaliação da VUE. Desse total, 10 estruturas apresentaram elevadas reduções de VUR: OAE 36 (48,51%), OAE 37 (48,46%), OAE 38 (46,27%), OAE 33 (46,48%), OAE 35 (46,69%), OAE 32 (46,56%), OAE 31 (46,11%), OAE 30 (44,57%), OAE 34 (44,55%), OAE 29 (43,08%) e OAE 28 (38,64%). As outras OAEs apresentaram reduções de VUR inferiores a 33,15%.

Tendo em vista que as OAEs supracitadas se encontram na RMR (alta corrosividade e umidade relativa do ar), bem como receberam diariamente em 2019 um VMD entre 17885 e 41051 (tráfego muito pesado), o nível de degradação observado é perfeitamente aceitável. Além disso, oito das 10 OAEs foram construídas em 1979 (trem tipo 36 tf) e estão inseridas no segmento que se inicia no km 51,4 e vai até o km 82,3 - denominado contorno do Recife - no qual trafegaram 67.236 veículos conforme estudo de tráfego apresentado no relatório de projeto executivo do DER/PE (2018).

Mister ressaltar que as 10 OAEs supracitadas se encontram no período de sobrevida em pelo menos um dos períodos de VUR adotados, requerendo, dessa forma, intervenção imediata.

As OAEs 36 e 37, construídas em 1960 (trem tipo 36 tf) e 1986 (24 tf), respectivamente, situam-se no município de Abreu e Lima, com tráfego médio diário de veículos em 2019 de 29405 (muito pesado) e 2343 (fluxo moderadamente pesado devido à sua destinação ser apenas ao tráfego do sistema transporte público), respectivamente. Essas OAEs apresentaram as

menores vidas úteis estimadas para 50, 63, 75 e 100 anos de VUR. Também necessitam de intervenções imediatas.

Ainda que as OAEs 23 e 24 não estejam localizadas na RMR (ambas as OAEs estão situadas no km 213,83), tenham sido projetadas para o trem tipo 45 tf e apresentem VMD de 8850 (tráfego pesado) e 11508 (tráfego muito pesado), respectivamente, apenas essas estruturas encontraram-se em conformidade com a VUR para 50, 63, 75 e 100 anos de VUR.

Os valores médios da VUE e de redução da vida útil de referência das 16 OAEs ao se adotarem 50, 63, 75 e 100 anos foram: 29,70 anos, 37,43 anos, 44,55 anos, 59,41 anos e 40,59%, respectivamente.

O Quadro 52 detalha os valores da VUE e de redução da VUR de cada OAE em concreto armado da BR-101/PE.

Quadro 52 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-101/PE – Concreto armado)

OAE	Ano de construção	Fator Total	VUR (anos)	VUE (anos)	Redução da VUR (%)	VU Residual	Saldo Ano Avaliação	Situação Atual	Decisão a Adotar
23	1985	0,713	50	35,64	28,72%	2021	2	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
23	1985	0,713	63	44,91	28,72%	2030	11	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
23	1985	0,713	75	53,46	28,72%	2038	19	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
23	1985	0,713	100	71,28	28,72%	2056	37	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
24	1985	0,692	50	34,61	30,78%	2020	1	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
24	1985	0,692	63	43,61	30,78%	2029	10	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
24	1985	0,692	75	51,92	30,78%	2037	18	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
24	1985	0,692	100	69,23	30,78%	2054	35	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
25	1960	0,696	50	34,80	30,40%	1995	-24	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
25	1960	0,696	63	43,85	30,40%	2004	-15	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
25	1960	0,696	75	52,20	30,40%	2012	-7	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
25	1960	0,696	100	69,60	30,40%	2030	11	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
26	1958	0,734	50	36,72	26,56%	1995	-24	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
26	1958	0,734	63	46,27	26,56%	2004	-15	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
26	1958	0,734	75	55,08	26,56%	2013	-6	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata

26	1958	0,734	100	73,44	26,56%	2031	12	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
27	1958	0,668	50	33,42	33,15%	1991	-28	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
27	1958	0,668	63	42,11	33,15%	2000	-19	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
27	1958	0,668	75	50,13	33,15%	2008	-11	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
27	1958	0,668	100	66,85	33,15%	2025	6	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
28	1980	0,614	50	30,68	38,64%	2011	-8	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
28	1980	0,614	63	38,65	38,64%	2019	0	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
28	1980	0,614	75	46,02	38,64%	2026	7	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
28	1980	0,614	100	61,36	38,64%	2041	22	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
29	1979	0,569	50	28,46	43,08%	2007	-12	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
29	1979	0,569	63	35,86	43,08%	2015	-4	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
29	1979	0,569	75	42,69	43,08%	2022	3	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
29	1979	0,569	100	56,92	43,08%	2036	17	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
30	1979	0,554	50	27,72	44,57%	2007	-12	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
30	1979	0,554	63	34,92	44,57%	2014	-5	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
30	1979	0,554	75	41,58	44,57%	2021	2	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
30	1979	0,554	100	55,43	44,57%	2034	15	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
31	1979	0,539	50	26,95	46,11%	2006	-13	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
31	1979	0,539	63	33,95	46,11%	2013	-6	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
31	1979	0,539	75	40,42	46,11%	2019	0	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
31	1979	0,539	100	53,89	46,11%	2033	14	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
32	1979	0,534	50	26,72	46,56%	2006	-13	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
32	1979	0,534	63	33,67	46,56%	2013	-6	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
32	1979	0,534	75	40,08	46,56%	2019	0	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
32	1979	0,534	100	53,44	46,56%	2032	13	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
33	1979	0,535	50	26,76	46,48%	2006	-13	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
33	1979	0,535	63	33,72	46,48%	2013	-6	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
33	1979	0,535	75	40,14	46,48%	2019	0	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva

33	1979	0,535	100	53,52	46,48%	2033	14	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
34	1979	0,555	50	27,73	44,55%	2007	-12	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
34	1979	0,555	63	34,93	44,55%	2014	-5	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
34	1979	0,555	75	41,59	44,55%	2021	2	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
34	1979	0,555	100	55,45	44,55%	2034	15	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
35	1979	0,533	50	26,66	46,69%	2006	-13	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
35	1979	0,533	63	33,59	46,69%	2013	-6	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
35	1979	0,533	75	39,99	46,69%	2019	0	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
35	1979	0,533	100	53,31	46,69%	2032	13	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
36	1960	0,515	50	25,75	48,51%	1986	-33	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
36	1960	0,515	63	32,44	48,51%	1992	-27	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
36	1960	0,515	75	38,62	48,51%	1999	-20	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
36	1960	0,515	100	51,49	48,51%	2011	-8	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
37	1986	0,515	50	25,77	48,46%	2012	-7	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
37	1986	0,515	63	32,47	48,46%	2018	-1	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
37	1986	0,515	75	38,66	48,46%	2025	6	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
37	1986	0,515	100	51,54	48,46%	2038	19	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
38	1987	0,537	50	26,86	46,27%	2014	-5	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
38	1987	0,537	63	33,85	46,27%	2021	2	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
38	1987	0,537	75	40,30	46,27%	2027	8	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
38	1987	0,537	100	53,73	46,27%	2041	22	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva

Fonte: O autor (2022).

- BR-104/PE

Com exceção da OAE 39, as demais pontes se encontram no período de sobrevida quando calculadas para 50, 63 e 75 anos de VUR. A esse respeito, verificou-se que a OAE 39 foi construída em 1982 (trem tipo 36 tf) e recebeu um VMD em 2019 de 6052 (tráfego pesado). Entretanto, as OAES restantes foram construídas em 1965 (trem tipo 36 tf) e receberam em 2019 o fluxo de 11785 veículos. Certamente, esses parâmetros interferiram nos resultados da

estimativa de vida útil obtida para as OAEs dessa rodovia. Vale destacar que todas as OAEs estão em conformidade para uma VUR de 100 anos.

Os valores médios da VUE para 50, 63, 75 e 100 anos e de redução da VUR para as 11 OAEs foram: 32,92 anos, 41,48 anos, 49,38 anos, 65,84 anos e 34,16%, respectivamente.

O Quadro 53 apresenta os valores da VUE e de redução da VUR das OAEs em concreto armado da BR-104/PE.

Quadro 53 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-104/PE – Concreto armado)

OAE	Ano de construção	Fator Total	VUR (anos)	VUE (anos)	Redução da VUR (%)	VU Residual	Saldo Ano Avaliação	Situação Atual	Decisão a Adotar
39	1982	0,623	50	31,16	37,69%	2013	-6	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
39	1982	0,623	63	39,26	37,69%	2021	2	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
39	1982	0,623	75	46,73	37,69%	2029	10	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
39	1982	0,623	100	62,31	37,69%	2044	25	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
40	1965	0,687	50	34,34	31,32%	1999	-20	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
40	1965	0,687	63	43,27	31,32%	2008	-11	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
40	1965	0,687	75	51,51	31,32%	2017	-2	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
40	1965	0,687	100	68,68	31,32%	2034	15	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
41	1965	0,635	50	31,77	36,46%	1997	-22	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
41	1965	0,635	63	40,03	36,46%	2005	-14	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
41	1965	0,635	75	47,66	36,46%	2013	-6	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
41	1965	0,635	100	63,54	36,46%	2029	10	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
42	1965	0,627	50	31,36	37,28%	1996	-23	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
42	1965	0,627	63	39,51	37,28%	2005	-14	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
42	1965	0,627	75	47,04	37,28%	2012	-7	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
42	1965	0,627	100	62,72	37,28%	2028	9	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
43	1965	0,644	50	32,18	35,63%	1997	-22	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
43	1965	0,644	63	40,55	35,63%	2006	-13	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
43	1965	0,644	75	48,27	35,63%	2013	-6	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
43	1965	0,644	100	64,37	35,63%	2029	10	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
44	1965	0,694	50	34,72	30,55%	2000	-19	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
44	1965	0,694	63	43,75	30,55%	2009	-10	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata

44	1965	0,694	75	52,09	30,55%	2017	-2	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
44	1965	0,694	100	69,45	30,55%	2034	15	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
45	1965	0,668	50	33,41	33,17%	1998	-21	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
45	1965	0,668	63	42,10	33,17%	2007	-12	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
45	1965	0,668	75	50,12	33,17%	2015	-4	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
45	1965	0,668	100	66,83	33,17%	2032	13	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
46	1965	0,693	50	34,63	30,74%	2000	-19	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
46	1965	0,693	63	43,64	30,74%	2009	-10	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
46	1965	0,693	75	51,95	30,74%	2017	-2	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
46	1965	0,693	100	69,26	30,74%	2034	15	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
47	1965	0,657	50	32,86	34,28%	1998	-21	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
47	1965	0,657	63	41,41	34,28%	2006	-13	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
47	1965	0,657	75	49,29	34,28%	2014	-5	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
47	1965	0,657	100	65,72	34,28%	2031	12	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
48	1965	0,644	50	32,18	35,64%	1997	-22	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
48	1965	0,644	63	40,55	35,64%	2006	-13	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
48	1965	0,644	75	48,27	35,64%	2013	-6	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
48	1965	0,644	100	64,36	35,64%	2029	10	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
49	1965	0,670	50	33,50	33,00%	1999	-20	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
49	1965	0,670	63	42,21	33,00%	2007	-12	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
49	1965	0,670	75	50,25	33,00%	2015	-4	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
49	1965	0,670	100	67,00	33,00%	2032	13	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva

Fonte: O autor (2022).

- BR-116/PE

Não foi realizada a estimativa de vida útil para essa rodovia, visto que não foi selecionada alguma OAE construída com este tipo de material.

- BR-232/PE

De um total de 22 OAEs, sete foram construídas em 1950 (trem tipo 24 tf), receberam entre 7250 e 14206 veículos em 2019 e se encontram no período de sobrevida para os três anos

de VUR (50, 63 e 75), sendo necessária uma intervenção imediata em cada uma dessas estruturas.

As OAEs 59 (km 254,15), 61 (km 283,88) e 66 (km 444,67) foram construídas em 1960 (trem tipo 36 tf), tendo transitado pelas OAEs acima mencionadas entre 7250 e 12720 veículos. Essas estruturas também se encontram no período de sobrevida aos serem adotados 50, 63 e 75 anos de VUR. Também se faz necessária a adoção de intervenção imediata.

As OAEs 51 (km 168,84), 52 (km 139,44), 53 (km 177,91) e 57 (km 200,77) foram executadas em 1965 (trem tipo 36 tf). Entre 7571 e 22730 veículos trafegaram por essas estruturas que também se enquadram no período de sobrevida quando foram adotados 50, 63 e 75 anos de VUR. Essas OAEs deverão sofrer algum tipo de intervenção a curto prazo.

As seis estruturas construídas em 1972 (trem tipo 36 tf) apresentaram-se no período de sobrevida apenas para a VUR de 75 anos, mesmo tendo circulado um fluxo de veículos entre 7250 e 12720.

Embora um número elevado de veículos (entre 34909 e 56824) tenha percorrido os segmentos onde as OAEs 50 (km 129,86) e 67 (km 539,41) estão localizadas, essas estruturas foram construídas em 1989 e 1975, respectivamente, e apenas indicaram o alcance do período de sobrevida para 75 anos de VUR.

Os valores médios da VUE para 50, 63, 75 e 100 anos e de redução da VUR para as 22 OAEs foram: 32,53 anos, 40,98 anos, 48,79 anos, 65,05 anos e 34,95%, respectivamente.

O Quadro 54 apresenta os valores da VUE e de redução da VUR das 22 OAEs em concreto armado da BR-232/PE.

Quadro 54 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-232/PE – Concreto armado)

OAE	Ano de construção	Fator Total	VUR (anos)	VUE (anos)	Redução da VUR (%)	VU Residual	Saldo Ano Avaliação	Situação Atual	Decisão a Adotar
50	1989	0,646	50	32,32	35,36%	2021	2	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
50	1989	0,646	63	40,72	35,36%	2030	11	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
50	1989	0,646	75	48,48	35,36%	2037	18	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
50	1989	0,646	100	64,64	35,36%	2054	35	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
51	1965	0,628	50	31,39	37,22%	1996	-23	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
51	1965	0,628	63	39,55	37,22%	2005	-14	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
51	1965	0,628	75	47,08	37,22%	2012	-7	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata

51	1965	0,628	100	62,78	37,22%	2028	9	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
52	1965	0,699	50	34,95	30,10%	2000	-19	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
52	1965	0,699	63	44,04	30,10%	2009	-10	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
52	1965	0,699	75	52,43	30,10%	2017	-2	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
52	1965	0,699	100	69,90	30,10%	2035	16	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
53	1965	0,644	50	32,18	35,63%	1997	-22	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
53	1965	0,644	63	40,55	35,63%	2006	-13	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
53	1965	0,644	75	48,27	35,63%	2013	-6	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
53	1965	0,644	100	64,37	35,63%	2029	10	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
54	1950	0,654	50	32,70	34,60%	1983	-36	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
54	1950	0,654	63	41,20	34,60%	1991	-28	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
54	1950	0,654	75	49,05	34,60%	1999	-20	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
54	1950	0,654	100	65,40	34,60%	2015	-4	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
55	1950	0,623	50	31,16	37,69%	1981	-38	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
55	1950	0,623	63	39,26	37,69%	1989	-30	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
55	1950	0,623	75	46,73	37,69%	1997	-22	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
55	1950	0,623	100	62,31	37,69%	2012	-7	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
56	1950	0,662	50	33,12	33,76%	1983	-36	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
56	1950	0,662	63	41,73	33,76%	1992	-27	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
56	1950	0,662	75	49,68	33,76%	2000	-19	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
56	1950	0,662	100	66,24	33,76%	2016	-3	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
57	1965	0,650	50	32,49	35,03%	1997	-22	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
57	1965	0,650	63	40,93	35,03%	2006	-13	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
57	1965	0,650	75	48,73	35,03%	2014	-5	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
57	1965	0,650	100	64,97	35,03%	2030	11	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
58	1950	0,630	50	31,52	36,95%	1982	-37	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
58	1950	0,630	63	39,72	36,95%	1990	-29	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
58	1950	0,630	75	47,29	36,95%	1997	-22	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
58	1950	0,630	100	63,05	36,95%	2013	-6	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
59	1960	0,660	50	33,01	33,98%	1993	-26	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
59	1960	0,660	63	41,59	33,98%	2002	-17	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
59	1960	0,660	75	49,51	33,98%	2010	-9	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata

59	1960	0,660	100	66,02	33,98%	2026	7	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
60	1972	0,638	50	31,91	36,18%	2004	-15	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
60	1972	0,638	63	40,20	36,18%	2012	-7	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
60	1972	0,638	75	47,86	36,18%	2020	1	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
60	1972	0,638	100	63,82	36,18%	2036	17	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
61	1960	0,652	50	32,60	34,81%	1993	-26	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
61	1960	0,652	63	41,07	34,81%	2001	-18	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
61	1960	0,652	75	48,90	34,81%	2009	-10	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
61	1960	0,652	100	65,20	34,81%	2025	6	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
62	1950	0,660	50	33,01	33,98%	1983	-36	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
62	1950	0,660	63	41,59	33,98%	1992	-27	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
62	1950	0,660	75	49,51	33,98%	2000	-19	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
62	1950	0,660	100	66,02	33,98%	2016	-3	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
63	1972	0,650	50	32,49	35,03%	2004	-15	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
63	1972	0,650	63	40,93	35,03%	2013	-6	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
63	1972	0,650	75	48,73	35,03%	2021	2	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
63	1972	0,650	100	64,97	35,03%	2037	18	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
64	1972	0,642	50	32,11	35,77%	2004	-15	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
64	1972	0,642	63	40,46	35,77%	2012	-7	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
64	1972	0,642	75	48,17	35,77%	2020	1	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
64	1972	0,642	100	64,23	35,77%	2036	17	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
65	1972	0,650	50	32,49	35,03%	2004	-15	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
65	1972	0,650	63	40,93	35,03%	2013	-6	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
65	1972	0,650	75	48,73	35,03%	2021	2	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
65	1972	0,650	100	64,97	35,03%	2037	18	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
66	1960	0,660	50	33,01	33,98%	1993	-26	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
66	1960	0,660	63	41,59	33,98%	2002	-17	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
66	1960	0,660	75	49,51	33,98%	2010	-9	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
66	1960	0,660	100	66,02	33,98%	2026	7	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva

67	1975	0,644	50	32,18	35,64%	2007	-12	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
67	1975	0,644	63	40,55	35,64%	2016	-3	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
67	1975	0,644	75	48,27	35,64%	2023	4	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
67	1975	0,644	100	64,36	35,64%	2039	20	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
68	1950	0,640	50	31,98	36,05%	1982	-37	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
68	1950	0,640	63	40,29	36,05%	1990	-29	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
68	1950	0,640	75	47,96	36,05%	1998	-21	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
68	1950	0,640	100	63,95	36,05%	2014	-5	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
69	1950	0,653	50	32,63	34,74%	1983	-36	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
69	1950	0,653	63	41,12	34,74%	1991	-28	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
69	1950	0,653	75	48,95	34,74%	1999	-20	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
69	1950	0,653	100	65,26	34,74%	2015	-4	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
70	1972	0,663	50	33,16	33,68%	2005	-14	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
70	1972	0,663	63	41,78	33,68%	2014	-5	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
70	1972	0,663	75	49,74	33,68%	2022	3	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
70	1972	0,663	100	66,32	33,68%	2038	19	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
71	1972	0,663	50	33,17	33,66%	2005	-14	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
71	1972	0,663	63	41,79	33,66%	2014	-5	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
71	1972	0,663	75	49,76	33,66%	2022	3	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
71	1972	0,663	100	66,34	33,66%	2038	19	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva

Fonte: O autor (2022).

- BR-407/PE

As OAEs 72 (km 74,64), 73 (km 90,86) e 74 (km 100,01), foram construídas em 1970 (trem tipo 36 tf). Essas três estruturas se encontram no período de sobrevida quando estimadas para 50 e 63 anos de VUR, o que requer intervenção imediata. Ao se adotar uma vida útil de referência de 75 e 100 anos, essas estruturas se apresentaram em conformidade com a VUR.

Os valores médios da VUE para 50, 63, 75 e 100 anos e de redução da VUR para as três OAEs foram: 33,00 anos, 41,58 anos, 49,49 anos, 65,99 anos e 34,01%, respectivamente.

O Quadro 55 mostra os valores da VUE e de redução da VUR da OAE 75 em concreto armado da BR-407/PE.

Quadro 55 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-407/PE – Concreto armado)

OAE	Ano de construção	Fator Total	VUR (anos)	VUE (anos)	Redução da VUR (%)	VU Residual	Saldo Ano Avaliação	Situação Atual	Decisão a Adotar
72	1970	0,656	50	32,78	34,44%	2003	-16	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
72	1970	0,656	63	41,30	34,44%	2011	-8	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
72	1970	0,656	75	49,17	34,44%	2019	0	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
72	1970	0,656	100	65,56	34,44%	2036	17	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
73	1970	0,667	50	33,36	33,29%	2003	-16	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
73	1970	0,667	63	42,03	33,29%	2012	-7	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
73	1970	0,667	75	50,04	33,29%	2020	1	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
73	1970	0,667	100	66,71	33,29%	2037	18	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
74	1970	0,657	50	32,85	34,30%	2003	-16	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
74	1970	0,657	63	41,39	34,30%	2011	-8	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
74	1970	0,657	75	49,27	34,30%	2019	0	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
74	1970	0,657	100	65,70	34,30%	2036	17	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva

Fonte: O autor (2022).

- BR-408/PE

A OAE 75, localizada no km 93,43, apresentou os seguintes valores da VUE para 50, 63, 75 e 100 anos e de redução da VUR: 27,23 anos, 34,31 anos, 40,85 anos, 54,47 anos e 45,53%.

Não obstante a data da sua construção (1997) e trem tipo 45 tf, o valor de redução da VUR alcançou quase 50%. O fluxo de 32735 veículos por dia e a localização da OAE (RMR) pode explicar tal redução e conseqüentemente o nível de degradação dessa OAE.

O Quadro 56 mostra os valores da VUE e de redução da VUR da OAE 75 em concreto armado da BR-408/PE.

Quadro 56 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-408/PE – Concreto armado)

OAE	Ano de construção	Fator Total	VUR (anos)	VUE (anos)	Redução da VUR (%)	VU Residual	Saldo Ano Avaliação	Situação Atual	Decisão a Adotar
75	1997	0,545	50	27,23	45,53%	2024	5	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva

75	1997	0,545	63	34,31	45,53%	2031	12	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
75	1997	0,545	75	40,85	45,53%	2038	19	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
75	1997	0,545	100	54,47	45,53%	2051	32	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva

Fonte: O autor (2022).

- BR-423/PE

As OAEs 76 e 77, construídas em 1985 (trem tipo 45) e 1975 (trem tipo 36 tf), estão situadas no km 186,97 e km 196,19, respectivamente. O VMD aferido para esse segmento no ano de 2019 foi considerado como pesado (9044).

Os valores médios da VUE para 50, 63, 75 e 100 anos e de redução da VUR para as OAEs 76 e 77 foram: 33,10 anos, 41,71 anos, 49,65 anos, 66,20 anos e 33,80%, respectivamente.

O Quadro 57 destaca os valores da VUE e de redução da VUR de cada OAE em concreto armado da BR-423/PE.

Quadro 57 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-423/PE – Concreto armado)

OAE	Ano de construção	Fator Total	VUR (anos)	VUE (anos)	Redução da VUR (%)	VU Residual	Saldo Ano Avaliação	Situação Atual	Decisão a Adotar
76	1985	0,674	50	33,70	32,60%	2019	0	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
76	1985	0,674	63	42,46	32,60%	2027	8	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
76	1985	0,674	75	50,55	32,60%	2036	17	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
76	1985	0,674	100	67,40	32,60%	2052	33	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
77	1975	0,650	50	32,50	34,99%	2008	-11	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
77	1975	0,650	63	40,95	34,99%	2016	-3	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
77	1975	0,650	75	48,76	34,99%	2024	5	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
77	1975	0,650	100	65,01	34,99%	2040	21	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva

Fonte: O autor (2022).

- BR-424/PE

Das 21 OAEs selecionadas da BR-424, verificou-se que a OAE 98 não atingiu o período de sobrevida para a VUR de 75 e 100 anos. Essa OAE foi construída em 1975 e recebeu 844

veículos no ano de 2019, o que pode justificar o grau de degradação não muito elevado em relação ao subconjunto de pontes da supracitada rodovia.

A OAE 97, a qual foi construída em 1965 e apresentou VMD de 8440, encontra-se em conformidade com a VUR apenas para uma VUR de 100 anos. 19 OAEs possuem trem tipo 24 tf e 1950 como ano de construção as quais receberam 6050 veículos em 2019, fato que também corrobora com o percentual médio de redução da VUR (34,48%).

As demais estruturas encontram-se no período de sobrevida ao serem adotados 50, 63, 75 e 100 anos de vida útil de referência.

Os valores médios da VUE para 50, 63, 75 e 100 anos para as 21 OAEs foram: 32,76 anos, 41,28 anos, 49,14 e 65,52 anos, respectivamente.

O Quadro 58 destaca os valores da VUE e de redução da VUR de cada OAE em concreto armado da BR-424/PE.

Quadro 58 – Síntese dos valores da VUE e vida útil residual das OAEs (BR-424/PE – Concreto armado)

OAE	Ano de construção	Fator Total	VUR (anos)	VUE (anos)	Redução da VUR (%)	VU Residual	Saldo Ano Avaliação	Situação Atual	Decisão a Adotar
78	1950	0,646	50	32,32	35,36%	1982	-37	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
78	1950	0,646	63	40,72	35,36%	1991	-28	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
78	1950	0,646	75	48,48	35,36%	1998	-21	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
78	1950	0,646	100	64,64	35,36%	2015	-4	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
79	1950	0,644	50	32,18	35,63%	1982	-37	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
79	1950	0,644	63	40,55	35,63%	1991	-28	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
79	1950	0,644	75	48,27	35,63%	1998	-21	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
79	1950	0,644	100	64,37	35,63%	2014	-5	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
80	1950	0,654	50	32,68	34,64%	1983	-36	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
80	1950	0,654	63	41,17	34,64%	1991	-28	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
80	1950	0,654	75	49,02	34,64%	1999	-20	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
80	1950	0,654	100	65,36	34,64%	2015	-4	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
81	1950	0,655	50	32,76	34,49%	1983	-36	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
81	1950	0,655	63	41,27	34,49%	1991	-28	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
81	1950	0,655	75	49,13	34,49%	1999	-20	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
81	1950	0,655	100	65,51	34,49%	2016	-3	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
82	1950	0,650	50	32,49	35,02%	1982	-37	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
82	1950	0,650	63	40,94	35,02%	1991	-28	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
82	1950	0,650	75	48,74	35,02%	1999	-20	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata

82	1950	0,650	100	64,98	35,02%	2015	-4	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
83	1950	0,647	50	32,35	35,30%	1982	-37	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
83	1950	0,647	63	40,76	35,30%	1991	-28	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
83	1950	0,647	75	48,52	35,30%	1999	-20	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
83	1950	0,647	100	64,70	35,30%	2015	-4	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
84	1950	0,648	50	32,42	35,17%	1982	-37	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
84	1950	0,648	63	40,85	35,17%	1991	-28	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
84	1950	0,648	75	48,63	35,17%	1999	-20	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
84	1950	0,648	100	64,83	35,17%	2015	-4	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
85	1950	0,651	50	32,54	34,93%	1983	-36	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
85	1950	0,651	63	41,00	34,93%	1991	-28	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
85	1950	0,651	75	48,81	34,93%	1999	-20	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
85	1950	0,651	100	65,07	34,93%	2015	-4	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
86	1950	0,651	50	32,54	34,93%	1983	-36	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
86	1950	0,651	63	41,00	34,93%	1991	-28	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
86	1950	0,651	75	48,81	34,93%	1999	-20	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
86	1950	0,651	100	65,07	34,93%	2015	-4	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
87	1950	0,639	50	31,97	36,06%	1982	-37	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
87	1950	0,639	63	40,28	36,06%	1990	-29	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
87	1950	0,639	75	47,95	36,06%	1998	-21	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
87	1950	0,639	100	63,94	36,06%	2014	-5	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
88	1950	0,651	50	32,54	34,93%	1983	-36	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
88	1950	0,651	63	41,00	34,93%	1991	-28	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
88	1950	0,651	75	48,81	34,93%	1999	-20	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
88	1950	0,651	100	65,07	34,93%	2015	-4	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
89	1950	0,646	50	32,30	35,41%	1982	-37	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
89	1950	0,646	63	40,69	35,41%	1991	-28	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
89	1950	0,646	75	48,45	35,41%	1998	-21	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
89	1950	0,646	100	64,59	35,41%	2015	-4	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
90	1950	0,662	50	33,11	33,79%	1983	-36	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
90	1950	0,662	63	41,71	33,79%	1992	-27	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
90	1950	0,662	75	49,66	33,79%	2000	-19	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
90	1950	0,662	100	66,21	33,79%	2016	-3	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
91	1950	0,648	50	32,42	35,17%	1982	-37	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata

91	1950	0,648	63	40,85	35,17%	1991	-28	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
91	1950	0,648	75	48,63	35,17%	1999	-20	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
91	1950	0,648	100	64,83	35,17%	2015	-4	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
92	1950	0,674	50	33,70	32,59%	1984	-35	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
92	1950	0,674	63	42,47	32,59%	1992	-27	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
92	1950	0,674	75	50,56	32,59%	2001	-18	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
92	1950	0,674	100	67,41	32,59%	2017	-2	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
93	1950	0,652	50	32,60	34,81%	1983	-36	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
93	1950	0,652	63	41,07	34,81%	1991	-28	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
93	1950	0,652	75	48,89	34,81%	1999	-20	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
93	1950	0,652	100	65,19	34,81%	2015	-4	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
94	1950	0,664	50	33,21	33,57%	1983	-36	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
94	1950	0,664	63	41,85	33,57%	1992	-27	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
94	1950	0,664	75	49,82	33,57%	2000	-19	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
94	1950	0,664	100	66,43	33,57%	2016	-3	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
95	1950	0,678	50	33,92	32,15%	1984	-35	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
95	1950	0,678	63	42,74	32,15%	1993	-26	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
95	1950	0,678	75	50,89	32,15%	2001	-18	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
95	1950	0,678	100	67,85	32,15%	2018	-1	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
96	1950	0,675	50	33,76	32,48%	1984	-35	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
96	1950	0,675	63	42,53	32,48%	1993	-26	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
96	1950	0,675	75	50,64	32,48%	2001	-18	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
96	1950	0,675	100	67,52	32,48%	2018	-1	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
97	1965	0,663	50	33,15	33,70%	1998	-21	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
97	1965	0,663	63	41,77	33,70%	2007	-12	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
97	1965	0,663	75	49,73	33,70%	2015	-4	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
97	1965	0,663	100	66,30	33,70%	2031	12	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
98	1975	0,661	50	33,06	33,88%	2008	-11	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
98	1975	0,661	63	41,66	33,88%	2017	-2	Período de Sobrevida	Intervenção Imediata
98	1975	0,661	75	49,59	33,88%	2025	6	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva
98	1975	0,661	100	66,12	33,88%	2041	22	Em conformidade com a VUR	Manutenção preventiva

Fonte: O autor (2022).

- BR-428/PE

Não foi realizada a estimativa de vida útil para essa rodovia, visto que não foi selecionada alguma OAE construída com este tipo de material.

5.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.4.1 Análise de sobrevivência

As técnicas de análise de sobrevivência permitem obter informações estatísticas relativas à sobrevivência (confiabilidade) e à função de risco (taxa de falha) acumulado (a) para diversas idades de uma OAE.

Nessa pesquisa, de um total de 618 OAEs, foram selecionadas 98 pontes e viadutos rodoviários, constituídos pelo tipo de material (76 em concreto armado e 22 em concreto protendido).

A nota técnica da superestrutura 1 foi considerada como indicativo do fim da vida útil, muito embora a condição de estabilidade mínima aceitável fosse a nota 2. Para justificar a determinação desse parâmetro, verificou-se o percentual das pontes contendo nota 1 em relação à amostra estudada (2,04%), assim como a subjetividade no momento da inspeção, o que pode ter ocasionado uma classificação equivocada dessas estruturas no momento da vistoria.

Em virtude da pandemia de Covid-19, foram adotados apenas os dados relativos ao ano de 2019. As variáveis independentes consideradas foram o VMD, o comprimento da OAE e o tipo de material da estrutura. A idade das pontes em anos se caracterizou como a variável resposta (dependente) do modelo.

A partir da inserção das supracitadas variáveis no Excel, foram obtidas as estatísticas descritivas da idade, comprimento e VMD, tendo sido verificado que:

- As OAEs construídas em concreto armado apresentaram maiores tempos de construção em relação às construídas em concreto protendido;
- O comprimento e o VMD das estruturas em concreto protendido foram, em média, maiores do que aquelas projetadas em concreto armado.

Após o fornecimento das informações referentes às variáveis nos pacotes do Software R por meio de um arquivo .txt adotado, foram obtidas as curvas de confiabilidade e da taxa de falha acumulada por meio do estimador de Kaplan-Meier (Figura 16 a Figura 19) apresentadas anteriormente), tendo sido possível afirmar que:

- No que tange ao conjunto das 98 OAEs consideradas nessa pesquisa, a partir dos 35 anos de construção, as superestruturas de todas as OAEs apresentaram confiabilidade reduzida e a taxa de falha acumulada ampliada, o que possibilita um risco elevado de desenvolver precocemente problemas estruturais;
- No que se refere à análise por tipo de material, as superestruturas das pontes em concreto protendido apresentaram uma maior confiabilidade do que aquelas construídas em concreto armado. Esse fato pode ser decorrente de algumas razões intrínsecas ao concreto protendido, tais como, eliminação dos efeitos de tração, controle da corrosão por não existir fissuração e aplicação de cargas referentes aos maiores esforços que podem surgir, constituindo assim uma prova de carga;
- As superestruturas das OAEs em concreto armado apresentaram uma maior taxa de falha acumulada do que aquelas executadas em concreto protendido.

Entre os modelos de distribuição de probabilidade previamente escolhidos para aplicação à amostra estudada, o modelo Weibull apresentou o menor valor do critério (Akaike) utilizado nesta pesquisa, além de um melhor comportamento na análise de resíduos em comparação ao modelo Lognormal. Dessa forma, após aplicação do modelo Weibull foi possível constatar, através das Figura 23 e Figura 24, que:

- As superestruturas das pontes em concreto armado e concreto protendido não apresentaram a mesma confiabilidade e taxa de falha acumulada;
- Aos 50 anos, a confiabilidade da superestrutura das pontes em concreto protendido foi maior do que aquelas construídas em concreto armado;
- Considerando os valores médios das variáveis independentes, aos 50 anos de idade, a confiabilidade das 98 OAEs, dos subconjuntos em concreto armado (76 OAEs) e em concreto protendido (22 OAEs) foi de 0,52, 0,12 e 0,69, respectivamente;
- Aos 50 anos, a taxa de falha acumulada das superestruturas das 98 OAEs e daquelas construídas em concreto protendido foi aproximadamente de 0,05. Já as executadas em concreto armado apresentaram aproximadamente uma taxa de falha acumulada de 0,16, ou seja, apresentou uma probabilidade menor de sobrevivência;
- A taxa de falha acumulada das 98 OAEs, daquelas construídas em concreto armado e protendido permanecem constantes até aproximadamente os 10 anos de construção. A partir dos 20 anos, a taxa de falha acumulada desses subgrupos cresce rapidamente. O

crescimento da taxa de falha acumulada das 98 OAEs e em concreto protendido ocorre de maneira semelhante próximo aos 75 anos;

- A curva de confiabilidade de todo o conjunto analisado permanecerá maior do que as estruturas em concreto armado e protendido até os 70 anos;
- A partir dos 60 anos, a confiabilidade da superestrutura das OAEs em concreto armado será praticamente nula;
- A confiabilidade das superestruturas em concreto protendido é considerada como nula após 80 anos.

5.4.2 Método dos fatores

O cálculo da vida útil estimada pode ser obtido através do método dos fatores, o qual foi preconizado pela ISO 15686 (2011). Para isso, considera-se uma vida útil de referência a qual é multiplicada por sete fatores cujos atributos podem variar de 0,80 a 1,20, de acordo com cada situação da obra ou do seu componente estrutural.

No presente estudo, o conceito de vida útil foi aplicado à superestrutura das 98 OAEs da amostra estudada. A referida análise foi realizada em dois subconjuntos, observando o tipo de material da estrutura (concreto armado e protendido).

Em relação às superestruturas das OAEs em concreto protendido, pode-se afirmar que:

- Das 22 OAEs em concreto protendido, apenas seis se encontram em conformidade ao serem adotados 50, 63, 75 e 100 anos de referência;
- Com exceção da BR-408/PE e BR-101/PE, as quais se destacaram por elevadas reduções médias de VUR (45,91% e 36,97%, respectivamente), as demais rodovias apresentaram valores médios de redução de VUR em torno de 32%;
- A OAE localizada na BR-428/PE apresentou a menor redução de VUR (27,76%) do subconjunto analisado, ou seja, maior vida útil residual.

O Quadro 59 apresenta uma síntese das informações elencadas anteriormente por rodovia e material da estrutura das OAEs concebidas em concreto protendido.

Quadro 59 – Síntese dos valores médios da VUE e redução de VUR por rodovia e material da estrutura (Concreto protendido)

Material da estrutura	Rodovia	Total de OAEs	VUE (valores médios em anos)				Redução da VUR (valor médio em %)
			50	63	75	100	
Concreto protendido	BR-101/PE	11	31,51	39,71	47,27	63,03	36,97
	BR-104/PE	02	34,44	43,39	51,66	68,87	31,13
	BR-116/PE	01	34,08	42,93	51,11	68,15	31,85

	BR-232/PE	02	34,44	43,45	51,72	68,97	31,04
	BR-407/PE	03	34,04	42,89	51,05	68,07	31,93
	BR-408/PE	02	27,05	34,08	40,57	54,09	45,91
	BR-423/PE	---	---	---	---	---	---
	BR-424/PE	---	---	---	---	---	---
	BR-428/PE	01	36,12	45,51	54,18	72,24	27,76

Fonte: O autor (2022).

No que concerne às superestruturas das OAEs construídas em concreto armado, foi constatado que:

- Das 76 OAEs em concreto armado, apenas cinco se encontram em conformidade ao serem adotados 50, 63, 75 e 100 anos de referência.
- Exceto as rodovias BR-408/PE e BR-101/PE, as quais se distinguiram por grandes reduções de VUR (45,53% e 40,59%, respectivamente), as outras rodovias apresentaram valores médios de redução de VUR em torno de 34%.
- A BR-104/PE apresentou a menor redução de VUR (34,16%) do subconjunto analisado, ou seja, maior vida útil residual.

O Quadro 60 apresenta um resumo das informações listadas anteriormente por rodovia e material da estrutura das OAEs construídas em concreto armado.

Quadro 60 – Síntese dos valores médios da VUE e redução de VUR por rodovia e material da estrutura (Concreto armado)

Material da estrutura	Rodovia	Total de OAEs	VUE (valores médios em anos)				Redução da VUR (valor médio em %)
			50	63	75	100	
Concreto armado	BR-101/PE	16	29,70	37,43	44,55	59,41	40,59
	BR-104/PE	11	32,92	41,48	49,38	65,84	34,16
	BR-116/PE	---	---	---	---	---	---
	BR-232/PE	22	32,53	40,98	48,79	65,05	34,95
	BR-407/PE	03	33,00	41,58	49,49	65,99	34,01
	BR-408/PE	01	27,23	34,31	40,85	54,47	45,53
	BR-423/PE	02	33,10	41,71	49,65	66,20	33,80
	BR-424/PE	21	32,76	41,28	49,14	65,52	34,48
	BR-428/PE	---	---	---	---	---	---

Fonte: O autor (2022).

5.4.3 Análise comparativa entre Norma DNIT, Análise de Sobrevivência e Método dos Fatores

A fim de contribuir com o presente estudo, foi realizada uma análise comparativa entre os dados obtidos no SGO relativos à classificação das OAEs através da norma DNIT (2004a) e

os resultados oriundos da aplicação do Método dos Fatores (Vida útil estimada) e das técnicas de Análise de Sobrevivência (Idade estimada até o final da vida útil) de cada superestrutura.

Dessa forma, os Quadro 61 e Quadro 62 apresentam uma comparação dos resultados obtidos por cada metodologia e as orientações que deverão ser adotadas relativas às OAEs construídas em concreto protendido e concreto armado, respectivamente.

Quadro 61 – Comparativo dos resultados obtidos pelo Método dos Fatores, DNIT e Análise de Sobrevivência (Concreto protendido)

OAE	Rodovia	Classe (Trem tipo - tf)	Material	Ano de construção	Método DNIT	Método dos Fatores	Análise de sobrevivência
1	BR-101	45	Concreto Protendido	1985	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	36,23 Manutenção preventiva	46,42 Manutenção preventiva
2	BR-101	45	Concreto Protendido	1985	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	34,27 Manutenção preventiva	46,43 Manutenção preventiva
3	BR-101	45	Concreto Protendido	2015	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	33,92 Manutenção preventiva	8,77 Manutenção preventiva
4	BR-101	45	Concreto Protendido	1985	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	33,75 Manutenção preventiva	45,15 Manutenção preventiva
5	BR-101	45	Concreto Protendido	1985	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	34,33 Manutenção preventiva	46,7 Manutenção preventiva
6	BR-101	24	Concreto Protendido	1957	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	34,46 Manutenção preventiva	43,4 Manutenção preventiva
7	BR-101	45	Concreto Protendido	1985	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	27,69 Manutenção preventiva	44,95 Manutenção preventiva
8	BR-101	45	Concreto Protendido	2014	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	27,93 Manutenção preventiva	9,98 Manutenção preventiva
9	BR-101	45	Concreto Protendido	1985	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	27,69 Manutenção preventiva	44,74 Manutenção preventiva
10	BR-101	45	Concreto Protendido	1985	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	26,52 Manutenção preventiva	44,95 Manutenção preventiva

11	BR-101	45	Concreto Protendido	1985	1 Executar a recuperação ou substituição da obra imediatamente	29,86 Manutenção preventiva	44,74 Manutenção preventiva
12	BR-104	36	Concreto Protendido	1965	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	34,95 Manutenção preventiva	43,62 Manutenção preventiva
13	BR-104	36	Concreto Protendido	1965	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	33,92 Manutenção preventiva	44,36 Manutenção preventiva
14	BR-116	45	Concreto Protendido	1985	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	34,08 Manutenção preventiva	47,46 Manutenção preventiva
15	BR-232	45	Concreto Protendido	1985	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	33,15 Manutenção preventiva	44,26 Manutenção preventiva
16	BR-232	45	Concreto Protendido	1985	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	35,82 Manutenção preventiva	32,6 Manutenção preventiva
17	BR-407	36	Concreto Protendido	1980	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	34,08 Manutenção preventiva	38,24 Manutenção preventiva
18	BR-407	36	Concreto Protendido	1980	2 Recuperação da OAE a curto prazo	33,69 Manutenção preventiva	40,82 Manutenção preventiva
19	BR-407	36	Concreto Protendido	1980	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	34,34 Manutenção preventiva	38,37 Manutenção preventiva
20	BR-408	45	Concreto Protendido	1997	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	26,52 Manutenção preventiva	33,78 Manutenção preventiva
21	BR-408	36	Concreto Protendido	1975	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	27,57 Manutenção preventiva	33,82 Manutenção preventiva
22	BR-428	45	Concreto Protendido	1985	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	36,12 Manutenção preventiva	50 Intervenção imediata

Fonte: O autor (2022).

Quadro 62 – Comparativo dos resultados obtidos pelo Método dos Fatores, DNIT e Análise de sobrevivência (Concreto armado)

Item	Rodovia	Classe (Trem tipo - tf)	Material	Ano de construção	Método DNIT	Método dos Fatores	Análise de sobrevivência
23	BR-101	45	Concreto Armado	1985	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	35,64 Manutenção preventiva	58,74 Intervenção imediata
24	BR-101	45	Concreto Armado	1985	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	34,61 Manutenção preventiva	56,65 Intervenção imediata
25	BR-101	36	Concreto Armado	1960	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	34,8 Manutenção preventiva	57,79 Intervenção imediata
26	BR-101	24	Concreto Armado	1958	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	36,72 Manutenção preventiva	60,72 Intervenção imediata
27	BR-101	24	Concreto Armado	1958	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	33,42 Manutenção preventiva	59,03 Intervenção imediata
28	BR-101	36	Concreto Armado	1980	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	30,68 Manutenção preventiva	53,22 Intervenção imediata
29	BR-101	36	Concreto Armado	1979	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	28,46 Manutenção preventiva	41,73 Manutenção preventiva
30	BR-101	36	Concreto Armado	1979	2 Recuperação da OAE a curto prazo	27,72 Manutenção preventiva	42,51 Manutenção preventiva
31	BR-101	36	Concreto Armado	1979	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	26,95 Manutenção preventiva	46,98 Manutenção preventiva
32	BR-101	36	Concreto Armado	1979	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	26,72 Manutenção preventiva	38,39 Manutenção preventiva
33	BR-101	36	Concreto Armado	1979	2 Recuperação da OAE a curto prazo	26,76 Manutenção preventiva	42,96 Manutenção preventiva

34	BR-101	36	Concreto Armado	1979	2 Recuperação da OAE a curto prazo	27,73 Manutenção preventiva	43,69 Manutenção preventiva
35	BR-101	36	Concreto Armado	1979	2 Recuperação da OAE a curto prazo	26,66 Manutenção preventiva	45,63 Manutenção preventiva
36	BR-101	36	Concreto Armado	1960	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	25,75 Manutenção preventiva	45,93 Manutenção preventiva
37	BR-101	24	Concreto Armado	1986	1 Executar a recuperação ou substituição da obra imediatamente	25,77 Manutenção preventiva	66,67 Intervenção imediata
38	BR-101	36	Concreto Armado	1987	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	26,86 Manutenção preventiva	40,23 Manutenção preventiva
39	BR-104	36	Concreto Armado	1982	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	31,16 Manutenção preventiva	58,07 Intervenção imediata
40	BR-104	36	Concreto Armado	1965	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	34,34 Manutenção preventiva	57,9 Intervenção imediata
41	BR-104	36	Concreto Armado	1965	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	31,77 Manutenção preventiva	55,66 Intervenção imediata
42	BR-104	36	Concreto Armado	1965	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	31,36 Manutenção preventiva	58,56 Intervenção imediata
43	BR-104	36	Concreto Armado	1965	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	32,18 Manutenção preventiva	57,42 Intervenção imediata
44	BR-104	36	Concreto Armado	1965	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	34,72 Manutenção preventiva	57,45 Intervenção imediata

45	BR-104	36	Concreto Armado	1965	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	33,41 Manutenção preventiva	57,37 Intervenção imediata
46	BR-104	36	Concreto Armado	1965	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	34,63 Manutenção preventiva	57,38 Intervenção imediata
47	BR-104	36	Concreto Armado	1965	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	32,86 Manutenção preventiva	57,34 Intervenção imediata
48	BR-104	36	Concreto Armado	1965	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	32,18 Manutenção preventiva	58,07 Intervenção imediata
49	BR-104	36	Concreto Armado	1965	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	33,5 Manutenção preventiva	62,84 Intervenção imediata
50	BR-232	45	Concreto Armado	1989	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	32,32 Manutenção preventiva	31,12 Manutenção preventiva
51	BR-232	24	Concreto Armado	1965	2 Recuperação da OAE a curto prazo	31,39 Manutenção preventiva	56,48 Intervenção imediata
52	BR-232	36	Concreto Armado	1965	5 Nada a fazer	34,95 Manutenção preventiva	50,52 Intervenção imediata
53	BR-232	36	Concreto Armado	1965	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	32,18 Manutenção preventiva	56,7 Intervenção imediata
54	BR-232	24	Concreto Armado	1950	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	32,7 Manutenção preventiva	56,69 Intervenção imediata
55	BR-232	24	Concreto Armado	1950	2 Recuperação da OAE a curto prazo	31,16 Manutenção preventiva	60,33 Intervenção imediata
56	BR-232	24	Concreto Armado	1950	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	33,12 Manutenção preventiva	59,31 Intervenção imediata

57	BR-232	36	Concreto Armado	1965	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	32,49 Manutenção preventiva	62,08 Intervenção imediata
58	BR-232	24	Concreto Armado	1950	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	31,52 Manutenção preventiva	62,01 Intervenção imediata
59	BR-232	36	Concreto Armado	1960	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	33,01 Manutenção preventiva	57,62 Intervenção imediata
60	BR-232	36	Concreto Armado	1972	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	31,91 Manutenção preventiva	56,62 Intervenção imediata
61	BR-232	36	Concreto Armado	1960	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	32,6 Manutenção preventiva	62,06 Intervenção imediata
62	BR-232	24	Concreto Armado	1950	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	33,01 Manutenção preventiva	62,41 Intervenção imediata
63	BR-232	36	Concreto Armado	1972	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	32,49 Manutenção preventiva	62,28 Intervenção imediata
64	BR-232	36	Concreto Armado	1972	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	32,11 Manutenção preventiva	62,29 Intervenção imediata
65	BR-232	36	Concreto Armado	1972	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	32,49 Manutenção preventiva	62,29 Intervenção imediata
66	BR-232	36	Concreto Armado	1960	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	33,01 Manutenção preventiva	59,06 Intervenção imediata
67	BR-232	36	Concreto Armado	1975	3 A recuperação pode ser postergada. OAE	32,18 Manutenção preventiva	41,03 Manutenção preventiva

					em observação sistemática		
68	BR-232	24	Concreto Armado	1950	2 Recuperação da OAE a curto prazo	31,98 Manutenção preventiva	59,31 Intervenção imediata
69	BR-232	24	Concreto Armado	1950	2 Recuperação da OAE a curto prazo	32,63 Manutenção preventiva	59,64 Intervenção imediata
70	BR-232	36	Concreto Armado	1972	2 Recuperação da OAE a curto prazo	33,16 Manutenção preventiva	60,99 Intervenção imediata
71	BR-232	36	Concreto Armado	1972	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	33,17 Manutenção preventiva	54,49 Intervenção imediata
72	BR-407	36	Concreto Armado	1970	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	32,78 Manutenção preventiva	62,98 Intervenção imediata
73	BR-407	36	Concreto Armado	1970	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	33,36 Manutenção preventiva	63,04 Intervenção imediata
74	BR-407	36	Concreto Armado	1970	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	32,85 Manutenção preventiva	59,7 Intervenção imediata
75	BR-408	45	Concreto Armado	1997	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	27,23 Manutenção preventiva	43,63 Manutenção preventiva
76	BR-423	45	Concreto Armado	1985	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	33,7 Manutenção preventiva	57,44 Intervenção imediata
77	BR-423	36	Concreto Armado	1975	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	32,5 Manutenção preventiva	59,58 Intervenção imediata
78	BR-424	24	Concreto Armado	1950	2 Recuperação da OAE a curto prazo	32,32 Manutenção preventiva	63,4 Intervenção imediata
79	BR-424	24	Concreto Armado	1950	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	32,18 Manutenção preventiva	63,4 Intervenção imediata

80	BR-424	24	Concreto Armado	1950	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	32,68 Manutenção preventiva	63,42 Intervenção imediata
81	BR-424	24	Concreto Armado	1950	2 Recuperação da OAE a curto prazo	32,76 Manutenção preventiva	63,1 Intervenção imediata
82	BR-424	24	Concreto Armado	1950	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	32,49 Manutenção preventiva	63,15 Intervenção imediata
83	BR-424	24	Concreto Armado	1950	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	32,35 Manutenção preventiva	63,31 Intervenção imediata
84	BR-424	24	Concreto Armado	1950	2 Recuperação da OAE a curto prazo	32,42 Manutenção preventiva	63,23 Intervenção imediata
85	BR-424	24	Concreto Armado	1950	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	32,54 Manutenção preventiva	62,23 Intervenção imediata
86	BR-424	24	Concreto Armado	1950	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	32,54 Manutenção preventiva	63,41 Intervenção imediata
87	BR-424	24	Concreto Armado	1950	2 Recuperação da OAE a curto prazo	31,97 Manutenção preventiva	62,86 Intervenção imediata
88	BR-424	24	Concreto Armado	1950	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	32,54 Manutenção preventiva	63,26 Intervenção imediata
89	BR-424	24	Concreto Armado	1950	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	32,3 Manutenção preventiva	63,41 Intervenção imediata
90	BR-424	24	Concreto Armado	1950	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	33,11 Manutenção preventiva	63,12 Intervenção imediata

91	BR-424	24	Concreto Armado	1950	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	32,42 Manutenção preventiva	63,23 Intervenção imediata
92	BR-424	24	Concreto Armado	1950	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	33,7 Manutenção preventiva	63,2 Intervenção imediata
93	BR-424	24	Concreto Armado	1950	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	32,6 Manutenção preventiva	63,45 Intervenção imediata
94	BR-424	24	Concreto Armado	1950	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	33,21 Manutenção preventiva	62,25 Intervenção imediata
95	BR-424	24	Concreto Armado	1950	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	33,92 Manutenção preventiva	62,93 Intervenção imediata
96	BR-424	24	Concreto Armado	1950	4 Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	33,76 Manutenção preventiva	63,3 Intervenção imediata
97	BR-424	36	Concreto Armado	1965	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	33,15 Manutenção preventiva	61,28 Intervenção imediata
98	BR-424	36	Concreto Armado	1975	3 A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	33,06 Manutenção preventiva	66,3 Intervenção imediata

Fonte: O autor (2022).

Para um melhor entendimento dos dados contidos nos Quadro 61 e Quadro 62, foram elaborados os Quadro 63 e Quadro 64 por tipo de material os quais apresentam as seguintes informações:

- Número de OAEs – Quantidade de OAEs consideradas por tipo de material;
- Nota técnica – Nota técnica atribuída à superestrutura de cada OAE;
- Ação a adotar – Ação a adotar de cada metodologia empregada na pesquisa;

- Resultado – Destaca o método menos rigoroso, rigoroso ou que possui resultado equivalente a outras metodologias empregadas.

Em relação às 22 OAEs construídas em concreto protendido (Quadro 63), verificou-se que 20 superestruturas do total de OAEs construídas em concreto protendido foram classificadas com Nota 4 (DNIT) e apresentaram resultados equivalentes pelas três metodologias consideradas nesta pesquisa no que tange à ação a adotar.

Quadro 63 – Síntese da comparação entre metodologias (DNIT, Método dos Fatores e Análise de sobrevivência) – Concreto protendido

Número de OAES	Nota técnica (DNIT)	Ação a adotar		
		DNIT	Método dos Fatores	Análise de sobrevivência
20	4	Nada a fazer; apenas serviços de manutenção	Manutenção preventiva	Manutenção preventiva
1	2	Recuperação da OAE a curto prazo	Manutenção preventiva	Manutenção preventiva
1	1	Executar a recuperação ou substituição da obra imediatamente	Manutenção preventiva	Manutenção preventiva

Fonte: O autor (2022).

No que tange às 76 OAEs construídas em concreto armado (Quadro 64), observou-se que:

- Apenas a superestrutura de uma OAE foi classificada com Nota 5. Os outros métodos apresentaram resultados divergentes da metodologia do DNIT;
- 17 OAEs que foram classificadas com a Nota 4 indicaram como ação a adotar manutenção preventiva (Método dos Fatores e DNIT). Entretanto, através da aplicação das técnicas de Análise de sobrevivência, observou-se o indicativo de intervenção imediata;
- Das 20 superestruturas classificadas com Nota 4, 17 delas indicaram a necessidade de manutenção preventiva por duas metodologias (Método dos Fatores e DNIT), divergindo assim do resultado exibido pela Análise de Sobrevivência. As três demais OAEs com mesma atribuição de nota técnica apresentaram classificação equivalente;

- 41 superestruturas foram classificadas com Nota 3. Em 36 desse total, não houve equivalência no resultado exposto pelas três metodologias. As cinco demais superestruturas destacaram a necessidade de realização de manutenção preventiva em duas metodologias, visto que o Método do DNIT indicou que tais superestruturas permaneçam em observação sistemática;
- No que concerne às 13 superestruturas imputadas com a Nota 2, nove delas destacaram-se por possuírem uma avaliação equivalente (Método do DNIT e Análise de Sobrevivência). Nas quatro superestruturas restantes, os resultados do Método dos Fatores e da Análise de sobrevivência conduziram às mesmas ações, distintas do Método do DNIT;
- No que se refere à superestrutura da OAE classificada com a Nota 1, as metodologias do DNIT e as técnicas de Análise de Sobrevivência apresentaram resultados equivalentes (intervenção imediata na estrutura).

Quadro 64 – Síntese da comparação entre metodologias (DNIT, Método dos Fatores e Análise de sobrevivência) – Concreto armado

Número de OAES	Nota técnica	Ação a adotar		
		DNIT	Método dos Fatores	Análise de sobrevivência
1	5	Nada a fazer	Manutenção preventiva	Intervenção imediata
17	4	Nada a fazer; apenas serviços de manutenção.	Manutenção preventiva	Intervenção imediata
3	4	Nada a fazer; apenas serviços de manutenção	Manutenção preventiva	Manutenção preventiva
36	3	A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	Manutenção preventiva	Intervenção imediata
5	3	A recuperação pode ser postergada. OAE em observação sistemática	Manutenção preventiva	Manutenção preventiva
9	2	Recuperação da OAE a curto prazo	Manutenção preventiva	Intervenção imediata

4	2	Recuperação da OAE a curto prazo	Manutenção preventiva	Manutenção preventiva
1	1	Executar a recuperação ou substituição da obra imediatamente	Manutenção preventiva	Intervenção imediata

Fonte: O autor (2022).

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

6.1 ANÁLISE DE SOBREVIVÊNCIA

Embora as técnicas de Análise de Sobrevivência apresentem características peculiares na exposição dos resultados (indicação do tempo até a ocorrência de um evento em específico), essa metodologia forneceu uma visão completa do que pode acontecer com o conjunto das OAEs analisadas, caracterizando-se assim como uma opção adequada para verificação da vida útil dessa tipologia construtiva.

Em virtude da não disponibilidade dos parâmetros-chave (idade e VMD) e da subjetividade na classificação da condição da ponte pelo inspetor, não foi possível levar em consideração um maior número de estruturas na presente pesquisa.

De qualquer maneira, esse fato não inviabilizou a realização da análise a qual forneceu bons indicativos do comportamento da superestrutura das 98 OAEs, visto que essa quantidade de pontes e viadutos constituiu uma amostra de tamanho significativo.

De acordo com os resultados obtidos, as variáveis independentes VMD e material da estrutura se caracterizaram como estatisticamente significativas em ambos os modelos estudados. Já o comprimento total do tabuleiro, não se apresentou estatisticamente significativo em nenhum dos modelos analisados. A adoção do comprimento do maior vão de cada OAE como uma variável poderia ter fornecido resultados significativos, em decorrência da influência direta nos esforços seccionais.

As idades médias estimadas das superestruturas em concreto armado e protendido ao se adotar uma confiabilidade de 0,5 foram, em média, de 34 anos e 55 anos, respectivamente para a vida útil de referência de 50 anos. Os resultados obtidos demonstraram que as superestruturas das OAEs construídas em concreto armado apresentam alto grau de deterioração quando comparadas àquelas construídas em concreto protendido, encontrando-se assim no período de sobrevida, o que requer assim intervenção imediata.

6.2 MÉTODO DOS FATORES

No que se refere à aplicação do Método dos Fatores, verificou-se que a referida metodologia proporcionou uma estimativa bastante adequada das condições de estabilidade e conservação das OAEs estudadas.

Assim como constatado pelo uso das técnicas de Análise de Sobrevivência, os resultados oriundos da aplicação do Método dos Fatores também destacaram que as

superestruturas em concreto armado apresentam condições de estabilidade e funcionalidade em condições piores quando comparadas com aquelas executadas em concreto protendido.

A esse respeito, atenção especial deverá ser dada às superestruturas das OAEs em concreto armado e protendido localizadas nas rodovias BR-101/PE e BR-408/PE, visto que apresentaram as maiores reduções de vida útil de referência, VMD elevado e zona de agressividade ambiental muito forte.

Além das rodovias acima mencionadas, as rodovias BR-232/PE, BR-423/PE e BR-424/PE destacaram-se por possuírem pontes mais antigas e VMDs muito elevados em comparação ao conjunto de pontes considerado nesta pesquisa.

Convém destacar que o Método dos Fatores poderá ser estendido a outras OAEs da malha viária brasileira (passarelas de pedestres, passagem inferior / superior), tendo em vista que apresenta maior variabilidade dos parâmetros empregados, fato que permite a obtenção da vida útil estimada, além da investigação da redução da vida útil de referência e, conseqüentemente, da vida útil residual de cada OAE.

6.3 CONCLUSÕES GERAIS

As informações obtidas nesta pesquisa demonstraram que as metodologias aplicadas foram capazes de produzir resultados apropriados por utilizarem conceitos adequados ao fim a que se destinam, usando-se os conceitos de confiabilidade e de vida útil.

Dessa forma, tais metodologias podem ser principalmente utilizadas para aquelas situações em que há limitações nas informações registradas em um banco de dados e inexistência de um planejamento de inspeções regulares, contribuindo assim para auxiliar a tomada de decisão por parte dos órgãos responsáveis pela gestão das OAEs brasileiras.

6.4 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A presente pesquisa teve como foco principal analisar o nível de degradação de superestruturas de pontes em concreto armado e protendido, especialmente no que se refere à vida útil, a fim de possibilitar uma tomada de decisão para efetuar o planejamento eficaz de manutenções regulares.

Essa área de pesquisa vem se destacando como de grande interesse dos pesquisadores e ainda há muito a ser investigado através de futuros trabalhos os quais proporcionarão a obtenção de resultados que poderão aprimorar aqueles obtidos neste estudo.

Dessa forma, as seguintes sugestões são propostas para o aperfeiçoamento de futuras pesquisas sobre a temática aqui abordada:

- Aprimorar a presente pesquisa através da consideração de algumas variáveis quando da utilização das técnicas de Análise de Sobrevivência, tais como, número de vãos, comprimento do maior vão, faixa de extensão, número de juntas de dilatação, percentual de caminhões que trafegam pelo segmento onde a OAE está situada, zona climática, precipitação pluviométrica, tipo de estrutura (laje, viga perfil “I”, viga caixão), registro de manutenções, superfície do pavimento, frequência de inspeções, esconsidade, natureza da transposição (viaduto de transposição de rodovia, viaduto sobre ferrovia, viaduto sobre rodovia / rua, passagem inferior / superior, cursos d’água), a fim de verificar a influência de cada uma delas na degradação da superestrutura da amostra estudada;
- Aplicar o Método dos Fatores considerando também as demais partes constituintes (mesoestrutura e infraestrutura) e, por conseguinte, proceder à estimativa da vida útil de cada ponte;
- Reaplicar a metodologia da pesquisa a níveis estadual, regional ou nacional, considerando inclusive outras variáveis, com o objetivo de facilitar a adequada disponibilização de recursos para realização de manutenções periódicas ou de intervenções necessárias;
- Executar um estudo aprofundado particularmente para as superestruturas que apresentaram um grau elevado de deterioração, com o intuito de avaliar a viabilidade técnica e econômica (recuperação x demolição);
- Utilizar técnicas não destrutivas, tais como, drones, termografia, laser scanner, tecnologia Digital Twin e monitoramento estrutural, objetivando o fornecimento de dados mais precisos sobre deformações, deslocamentos, vibrações, dentre outros, para aplicação das metodologias do presente estudo;
- Implantação de sistemas de gestão a nível estadual, municipal, assim como nas rodovias concessionadas.

REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, A. M.; ATADERO, R. A.; OZBEK, M. E. A Comprehensive Uncertainty-Based Framework for Inspection Planning of Highway Bridges. **Infrastructures**, v. 6, n. 2, p. 27, 2021.
- ABU DABOUS, S.; AL-KHAYYAT, G. A flexible bridge rating method based on analytical evidential reasoning and Monte Carlo simulation. **Advances in Civil Engineering**, vol. 2018, Article ID 1290632, 13 pages, 2018.
- ABU-TAIR, A. I.; MCPARLAND, C.; LYNESS, J. F.; NADJAI, A. Predictive models of deterioration rates of concrete bridges using the factor method based on historic inspection data. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS*, 9., 2002, Brisbane, Australia. **Proceedings** [...]. Brisbane, Australia, 2002. 9p.
- ADRIANO, L. R.; CHUA, S. S. Developing a deterioration model for manila bridges. **TNI Journal of Engineering and Technology**, v. 5, n. 1, p. 21-24, 2017.
- AGÊNCIA REGULADORA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DELEGADOS DE TRANSPORTE DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Controle das Obras de Arte Especiais**. ARTESP, ET00.000.000-0-C21/002R0. São Paulo, 2007.
- AGRAWAL, A. K.; KAWAGUCHI, A.; CHEN, Z. **Bridge element deterioration rates**. New York (State). Dept. of Transportation, 2008.
- AGRAWAL, A. K.; KAWAGUCHI, A.; CHEN, Z. Deterioration rates of typical bridge elements in New York. **Journal of Bridge Engineering**, v. 15, n. 4, p. 419-429, 2010.
- AHMAD, Anwar S. **Bridge preservation guide: maintaining a state of good repair using cost effective investment strategies**. United States. Federal Highway Administration, 2011.
- AKAIKE, Hirotugu. A new look at the statistical model identification. **IEEE transactions on automatic control**, v. 19, n. 6, p. 716-723, 1974.
- AKTAS, C. B.; BILEC, M. M. Service life prediction of residential interior finishes for life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 3, p. 362-371, 2011.
- AMAYA, A.; SIERRA-PÉREZ, J. Toward a structural health monitoring methodology for concrete structures under dynamic loads using Embedded FBG Sensors and strain mapping techniques. **Sensors**, v. 22, n. 12, p. 4569, 2022.
- ANDERSON, J. C.; UNNIKRISSHANNAN, A.; SCHUMACHER, T. Heterogeneity-based survival analysis of NBI condition ratings for concrete highway bridge decks in Oregon by condition group. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 27, n. 4, p. 04021029, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: projeto de estruturas de concreto - procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7187**: projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9452**: inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-1**: edificações habitacionais — desempenho. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-2**: edificações habitacionais — desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G166** - Standard guide for statistical analysis of service life data. West Conshohocken, PA, 2005.

AUSTRALASIAN ROAD TRANSPORT AND TRAFFIC AGENCIES - ASTROADS. **Improved bridge deterioration models, predictive tools and costs**. Research Report No. AP-R487-15, Sydney, Australia, 2015.

BALAKUMARAN, S.; WEYERS, R. E. Service life performance of preventive and rehabilitative overlays on virginia bridge decks: an observational study. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 34, n. 5, p. 04020080, 2020.

BECK, André Teófilo. **Confiabilidade e segurança das estruturas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019. 416p. ISBN 978-85-352-8688-5.

BELL, E.; KWIATKOWSKI, K. **Using Data Analytics in Forecasting Bridge Condition**. New Hampshire. Dept. of Transportation. Bureau of Materials and Research, 2021.

BOLDO, Plínio. **Avaliação quantitativa de estruturas de concreto armado de edificações no âmbito do Exército Brasileiro**. 2002. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2002.

BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. **Patologia de estruturas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 320p. ISBN 978-85-7975-339-8.

BORGES, Alexandra Isabel Monteiro. **Análise de Sobrevivência com o R**. 2014. Dissertação (Mestrado em Matemática) – Universidade da Madeira, Madeira, 2014.

BRESLOW, Norman. Covariance analysis of censored survival data. **Biometrics**, v. 30, n. 1, p. 89-99, 1974.

BRITISH STANDARD. **BS 7543**: guide to durability of buildings elements, products and components. Londres, 2003.

BUGGE, Georg Alexander. **Structural reliability analysis of the Hardanger Bridge using an enhanced Monte Carlo Method**. 2014. 135p. Dissertation (Master of Science in Civil Engineering) - Norwegian University of Science and Technology, Norway, 2014.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA STANDARD S6-00**, Canadian highway bridge design code, Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, Canadá, 2000.

CASTRO, Eliane Kraus de. **Desenvolvimento de metodologia para manutenção de estruturas de concreto armado**. 1994. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Universidade de Brasília, Brasília, 1994.

CHAI, C.; DE BRITO, J.; GASPAR, P. L.; SILVA, A. Statistical modelling of the service life prediction of painted surfaces. **International Journal of Strategic Property Management**, v. 19, n. 2, p. 173-185, 2015.

CHEN, C.; JUAN, Y.; HSU, Y. Developing a systematic approach to evaluate and predict building service life. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 23, n. 7, p. 890-901, 2017.

COPE, Amanda Rae. **Multiple-criteria life-cycle evaluation of alternative bridge deck reinforcement materials using rank matrix analysis**. Dissertation (Master of Science in Civil Engineering) - Purdue University, West Lafayette. 2009.

CNT. Pesquisa rodoviária - **Relatório Gerencial**. Brasília: Confederação Nacional do Transporte, 2019. Disponível em: <http://https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/gerencial.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2021.

COX, D. R. 1972. **Journal of the Royal Statistical Society: series B (Methodological)**, v. 34, n. 2, p. 187-202, 1972.

CRUZ, R. B. C da.; SILVA, F. A. da.; CAVALCANTE, P. L.; PACHECO, R. R. M.; SANTOS, R. R. dos. Contribuições sobre Inspeções em Pontes e Viadutos Conforme NBR 9452:2016 – Vistoria de Pontes, Viadutos e Passarelas de Concreto. **Engenharia, Estudo e Pesquisa, ABPE**, v. 17, n. 1, p. 18-29, jan. / jun. 2017.

CHYAD, A. M.; ABUDAYYEH, O. Deterioration prediction modelling and inspection schedule estimation for concrete bridge decks. **Journal of Civil Engineering and Construction**, v. 9, n. 2, p. 63-73, 2020.

DAS, J.; SIL, A. Condition assessment of superstructure component of reinforced concrete bridges through visual inspection in the Assam, India. **Bridge Structures**, v. 16, n. 1, p. 39-57, 2020.

DA SILVA, L. S.; GERVÁSIO, H.; KUHLMANN, U.; MAIER, P.; ORCESI, A. D.; ROBERT, N. Design guidance for improved life cycle performance of highway bridges. In: **Maintenance, Monitoring, Safety, Risk and Resilience of Bridges and Bridge Networks**. CRC Press, 2016. p. 502-502.

DE LIMA, C. B.; GRECO, M.; PEREIRA, S. S. R. Modelos de deterioração e sua importância para a gestão de pontes rodoviárias In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS – CBPE, 10., 2018, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro, 2018. 10p.

DE LIMA, C. B.; GRECO, M.; BITTENCOURT, T. N. Analysis of the brazilian federal bridge inventory. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 1, 2019.

DEY, T.; MUKHERJEE, A.; CHAKRABORTY, S. A practical overview and reporting strategies for statistical analysis of survival studies. **Chest**, v. 158, n. 1, p. S39-S48, 2020.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE PERNAMBUCO. **Elaboração do projeto executivo de engenharia e execução das obras e demais operações necessárias e suficientes para as obras de melhoramentos, adequação de capacidade e segurança e reabilitação do pavimento**. Relatório técnico, Recife, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Sistema de gerenciamento de obras de arte especiais - SGO**. Inspeção rotineira e dados cadastrais. Brasília, 2018a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Execução de serviços necessários ao controle viário nas rodovias federais, mediante a disponibilização, operação e manutenção de equipamentos eletrônicos, com coleta, armazenamento e processamento de dados estatísticos e dados e imagens de infrações – LT-10**. Brasília, 2018b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Contratação emergencial para execução dos serviços de disponibilização, operação e manutenção de equipamentos eletrônicos de controle de velocidade nas rodovias federais sob circunscrição do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT**. Brasília, 2018c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de recuperação de pontes e viadutos rodoviários**. 1.ed. Rio de Janeiro, 2010. 161p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Estimativa do volume médio diário anual - VMD - 2009**. Brasília, 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 010/2004 – PRO: inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido – procedimento**. 1.ed. Rio de Janeiro, 2004a. 18p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de inspeção de pontes rodoviárias**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2004b. 253p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). **DIN 1076: Highway Structures – Testing and Inspection**. Berlim, 1999.

DOMINICINI, W. K.; CALMON, J. L. Computational modeling for predicting corrosion initiation in reinforced concrete structures. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 6, p. 1205-1244, 2017.

DONG, Y.; FRANGOPOL, D, M. Lyfe-cycle multi-hazard risk assessment of highway bridges. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BRIDGE MAINTENANCE, SAFETY AND MANAGEMENT (IABMAS)*, 8., 2016. Foz do Iguaçu, Paraná. **Proceedings [...]**. Foz do Iguaçu, Paraná, 2016. 5p.

DROMEY, L.; RUANE, K.; MURPHY, J. J.; O'ROURKE, B.; LACEY, S. A bridge-rehabilitation strategy based on the analysis of a bridge-inspection data set. **Infrastructure Asset Management**, v. 7, n. 1, p. 25-35, 2020.

DUNN, O. J.; CLARK, V. A. **Basic statistics: a primer for the biomedical sciences**. John Wiley & Sons, 2009, 253p. ISBN 978-0-470-24879-9.

DUNN, P. K.; SMYTH, G. K. Randomized quantile residuals. **Journal of Computational and Graphical Statistics**, v. 5, n. 3, p. 236-244, 1996.

EBRAHIM, Z. A.; ABDEL-JAWAD, Y. A. A modified semi-probabilistic approach for the assessment of the residual service life of reinforced concrete structures subjected to carbonation. **Procedia Manufacturing**, v. 44, p. 148-155, 2020.

EDIRISINGHE, R.; SETUNGE, S.; ZHANG, G. Markov model-based building deterioration prediction and ISO factor analysis for building management. **Journal of Management in Engineering**, v. 31, n. 6, p. 04015009, 2015.

EL DEBS, Mounir Khalil. **Pontes de concreto: com ênfase na aplicação de elementos pré-moldados**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021. 479 p. ISBN 978-65-86235-31-9.

EMÍDIO, F.; DE BRITO, J.; GASPAR, P. L.; SILVA, A. Application of the factor method to the estimation of the service life of natural stone cladding. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 484-493, 2014.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1990: Basis of structural design**. CEN, Bruxelas, 2001.

ENRIGHT, M. P.; FRANGOPOL, D. M. Condition prediction of deteriorating concrete bridges using bayesian updating. **Journal of Structural Engineering**, v. 125, n. 10, p. 1118-1125, 1999.

ESTES, A. C.; FRANGOPOL, D. M. Repair optimization of highway bridges using system reliability approach. **Journal of Structural Engineering**, v. 125, n. 7, p. 766-775, 1999.

EUQUERES, Priscilla. **Metodologia de inspeção de pontes de concreto armado**. 2011. 168 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

FANG, J.; ISHIDA, T.; YAMAZAKI, T. Quantitative evaluation of risk factors affecting the deterioration of RC deck slab components in East Japan and Tokyo regions using survival analysis. **Applied Sciences**, v. 8, n. 9, p. 1470, 2018.

FATHALLA, E.; TANAKA, Y.; MAEKAWA, K. Remaining fatigue life assessment of in-service road bridge decks based upon artificial neural networks. **Engineering Structures**. Elsevier. 2018, v. 171, p. 602 – 616, 2018.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). **Durability assessment of a bridge substructure**. The second Strategic Highway Research Program (SHRP2). 2015. 44p. Disponível em:

<http://shrp2.transportation.org/documents/renewal/DurabilityAssessmentR19A.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2018.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). **Recording and coding guide for the structure inventory and appraisal of the nation's bridges**. Report No. FHWA-PD-96-001, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Engineering Bridge Division, Washington, DC, 1995. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/mtguide.pdf>. Acesso em: 24 jan.2022.

FILGUEIRA FILHO, A. D. C.; DA SILVA, C. J. G.; JÚNIOR, F. Z.; OLIVEIRA, R. A. Analysis of the service life of reinforced concrete bridges structures under the action of chloride ions using computational software. In: **Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations**. CRC Press, 2021. p. 1900-1905.

FONSECA, Régis Pamponet da. **A estrutura do Instituto Central de Ciências: Aspectos históricos, científicos e tecnológicos de projeto, execução, intervenções e propostas de manutenção**. 2007. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

FORD, K.M.; ARMAN, M.; LABI, S., SINHA, K. C., SHIROLE, A.; THOMPSON, P.; LI, Z. 2011. Methodology for estimating life expectancies of highway assets. **Washington, DC: National Cooperative Highway Research Program**, 2011.

FRANGOPOL, D. M.; DONG, Y.; SABATINO, S. Bridge life-cycle performance and cost: analysis, prediction, optimisation and decision-making. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BRIDGE MAINTENANCE, SAFETY AND MANAGEMENT (IABMAS), 8., 2016, Foz do Iguazu, Paraná. **Proceedings** [...]. Foz, do Iguazu, Paraná, 2016.19p.

FREGONARA, E.; FERRANDO, D. G. How to model uncertain service life and durability of components in life cycle cost analysis applications? The stochastic approach to the factor method. **Sustainability**, v. 10, n. 10, p. 3642, 2018.

FREGONARA, E.; PATTONO, S. A sustainability indicator for building projects in presence of risk/uncertainty over time: a research experience. **Aestimum**, p. 173-205, 2018.

GALBUSERA, M. M.; DE BRITO, J.; SILVA, A. Application of the factor method to the prediction of the service life of ceramic external wall cladding. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 29, n. 3, p. 04014086, 2015.

GALVÃO, N.; MATOS, J.; OLIVEIRA, D. V. Human Errors induced risk in reinforced concrete bridge engineering. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 35, n. 4, 2021.

GERVÁSIO, H. M. dos S. **Análise de ciclo de vida de infraestruturas**. Guimarães / Portugal: Universidade do Minho, 2011. 38 slides, color. Disponível em: http://www.centrohabitat.net/sites/default/files/eventos-pdf/apresentacao_helena_gervasio.pdf. Acesso em: 08 nov. 2016.

GION, L. C.; GOUGH, J.; VITALE, J. D.; SINHA, K. C.; WOODS, R. E. **Implementation of the Indiana Bridge Management System, User's Manual**. FHWA/IN/JHRP-92/21. Purdue University, West Lafayette. 1992.

GODE, Kristaps. Predicting the service life of concrete bridges based on quantitative research. **Construction Science**, v. 15, n. 1, p. 11-18, 2014.

GOMES, C.; VITÓRIO, A.; CARNEIRO, A.; OLIVEIRA, R. Assessment of the remaining service life of Curado walkway and the bridge over the River Tanque, Pernambuco, Brazil. In: **Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations**. CRC Press, 2021. p. 3237-3243.

GOULOUTI, K.; PADEY, P.; GALIMSHINA, A.; HABERT, G.; LASVAUX, S. Uncertainty of building elements' service lives in building LCA & LCC: What matters? **Building and Environment**, v. 183, p. 106904, 2020.

GOYAL, Raka. **Development of a survival-based framework for bridge deterioration modeling with large-scale application to the North Carolina bridge management system**. 2015. Thesis (Doctor of Philosophy in Infrastructure and Environmental Systems) - University of North Carolina, Charlotte. 2015.

GOYAL, R.; WHELAN, M. J.; CAVALLINE, T. L. Multivariable proportional hazards-based probabilistic model for bridge deterioration forecasting. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 26, n. 2, p. 04020007, 2020.

GHODOOSI, F.; BAGCHI, A.; ZAYED, T.; HOSSEINI, M. R. Method for developing and updating deterioration models for concrete bridge decks using GPR data. **Automation in Construction**, v. 91, p. 133-141, 2018.

GHONIMA, Omar. **Statistical modeling of United States highway concrete bridge decks**. 2017. Thesis (Doctor of Philosophy in Civil Engineering) - University of Delaware, Delaware, 2017.

GULER, S. I.; RADLINSKA, A.; LU, M.; HYDOCK, J. **Time-Based Modeling of Concrete Bridge Deck Deterioration Using Probabilistic Models**. Report CIAM-UTC-REG10. Center for Integrated Asset Management for Multimodal Transportation Infrastructure Systems (CIAMTIS), 2021. Disponível em: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/56909>. Acesso em: 07 abr. 2022.

HAARDT, Peter. **The German approach to bridge management: from reactive to predictive management procedures**. In: INTERNATIONAL ECCE CONFERENCE EUROINFRA 2009, p. 1-12. Disponível em: <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB17704.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2018.

HAJDIN, R.; CASAS, J. R.; MATOS, J. C. Inspection of existing bridges: moving on from condition rating. In: IABSE SYMPOSIUM GUIMARÃES 2019 - towards a resilient built environment-risk and asset management, 2019, Guimarães, Portugal. **Proceedings** [...]. Guimarães, Portugal, 2019. p. 940-947.

HALLBERG, Daniel. **Development and adaptation of a life cycle management system for constructed work**. 2005. Thesis (Building Materials Technology) - KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2005.

HASAN, S.; ELWAKIL, E. Knowledge-driven stochastic reliable modeling for steel bridge deck condition rating prediction. **Journal of Structural Integrity and Maintenance**, v. 6, n. 2, p. 91-98, 2021.

HASAN, S.; ELWAKIL, E. National bridge inventory data-based stochastic modeling for deck condition rating of prestressed concrete bridges. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, v. 25, n. 3, p. 04020022, 2020.

HASAN, S.; ELWAKIL, E. Deterioration models for superstructure of prestressed concrete bridges in California. *In: CSCE ANNUAL CONFERENCE, 2019*. Laval, Montreal. **Proceedings** [...]. Montreal, 2019a. p. 304.

HASAN, S.; ELWAKIL, E. Stochastic regression deterioration models for superstructure of prestressed concrete bridges in California. **Journal of Structural Integrity and Maintenance**, v. 4, n. 2, p. 97-108, 2019b.

HASSAN, R.; LIN, O.; THANANJEYAN, A. A comparison between three approaches for modelling deterioration of five pavement surfaces. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 18, n. 1, p. 26-35, 2017.

HE, X.; WANG, W.; HU, W.; ZHANG, H. Bridge deterioration analysis based on censored data: a case study in Yunnan province. *In: IOP CONFERENCE SERIES: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020. **Proceedings** [...]. 2020. p. 012035.

HEARN, G.; XI, Y. **Service life and cost comparisons for four types of CDOT bridge decks**. Report No. CDOT-2007-2. Colorado Department of Transportation, Denver. 2007. Disponível em: <http://worldcat.org/digitalarchive/content/cdm266301.cdmhost.com/CBT/p266401coll4/0000080579/tra210072internet.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2022.

HENRIQUES, A. A.; FERNANDES, J.; SANTAMARIA, M.; MATOS, J. C.; OLIVEIRA, D. V.; COSTA, L. An infrastructure management system for railway bridges: overview and application to a case study. *In: IABSE SYMPOSIUM GUIMARÃES 2019 - risk and asset management*. 2019. Guimarães, Portugal. **Proceedings** [...]. Guimarães, Portugal, 2019.

HERNÁNDEZ MORENO, S.; TORRES QUINTANA, J. L. The role of service life planning in construction industry; an exploratory review. **Journal of Xi'an University of Architecture & Technology**, v. 12, n. 6, p. 334-345, 2020.

HESSE, A. A.; ATADERO, R. A.; OZBEK, M. E. Using expert opinion to quantify uncertainty in and cost of using nondestructive evaluation on bridges. **Advances in Civil Engineering**, v. 2017, 2017.

HOLST, Ralph. **The German BMS as a decision tool for sustainable maintenance strategies**. p. 1-10, 2012. Disponível em: <http://www.h-a-d.hr/pubfile.php?id=711>. Acesso em: 01 jan. 2018.

HORTA, C. S.; FREIRE, L. SGOA-Sistema de gestão de conservação de obras de arte da Ep: balanço de uma implementação consolidada. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, p. 1–12, 2012. Disponível em: http://www.crp.pt/docs/A45S144-143_Art_T6a_7CRP_2013.pdf. Acesso em: 21 mar. 2018.

HOVDE, P. J. The Factor Method: a simple tool to service life estimation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS & COMPONENTS (DBMC), 10., 2005, Lyon. **Proceedings** [...]. Lyon, 2005. 8p.

HU, W. H.; TANG, D. H.; TENG, J.; SAID, S.; ROHRMANN, R. Structural health monitoring of a prestressed concrete bridge based on statistical pattern recognition of continuous dynamic measurements over 14 years. **Sensors**, v. 18, n. 12, p. 4117, 2018.

HUANG, S.; YANG, S.; ZENG, Y. A new system for durability assessment of existing concrete bridges. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPORTATION ENGINEERING, 3., 2011. **Proceedings** [...]. China, 2011, p. 1726-1731.

INKOOM, S.; SOBANJO, J. O. Reliability importance as a measure of bridge element condition index for deteriorating bridges. **Transportation Research Record**, v. 2673, n. 12, p. 327-338, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15.686-1: Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 1: General principles and framework**. Genebra, 2011.

JACINTO, L.; NEVES, L. C.; SANTOS, L. O. Bayesian assessment of an existing bridge: a case study. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 12, n. 1, p. 61-77, 2015.

JANJUA, S.; SARKER, P.; BISWAS, W. A review of residential buildings' sustainability performance using a life cycle assessment approach. **Journal of Sustainability Research**, v. 1, n. 1, p. 1-29, 2019.

JI, T.; LIU, J.; LI, Q. Safety Risk Evaluation of Large and Complex Bridges during Construction Based on the Delphi-Improved FAHP-Factor Analysis Method. **Advances in Civil Engineering**, v. 2022, 2022.

JIANG, Y.; SINHA, K. C. Bridge service life prediction model using the Markov chain. **Transportation Research Record**, v. 1223, p. 24-30, 1989.

JEONG, Y.; KIM, W.; LEE, I.; LEE, J. Bridge service life estimation considering inspection reliability. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 21, n. 5, p. 1882-1893, 2017.

JOINT COMMITTEE ON STRUCTURAL SAFETY, JCSS: **Probabilistic Model Code**, 2001.

JOHNSON, J.; BOYLE, Z. Implementation of AASHTOWare Bridge Management 5.2.3 to meet agency policies and objectives for Bridge Management and Address FHWA Requirements. In: INTERNATIONAL BRIDGE MANAGEMENT AND STRUCTURE CONFERENCE, 11., 2017, Mesa, Arizona. **Proceedings** [...]. Arizona. 2017, p. 188-212. Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec224.pdf>. Acesso em: 02 jan 2018.

KALE, A.; RICKS, B.; GANDHI, R. New measure to understand and compare bridge conditions based on inspections time-series data. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 27, n. 4, p. 04021037, 2021.

KALOOP, M. R.; HU, J. W. Dynamic performance analysis of the towers of a long-span bridge based on GPS monitoring technique. **Journal of Sensors**, v. 2016, p.1-14, 2016. Disponível: <https://www.hindawi.com/journals/js/2016/7494817/>. Acesso em: 27 fev. 2022.

KAPLAN, E. L.; MEIER, P. Nonparametric estimation from incomplete observations. **Journal of the American Statistical Association**, v. 53, n. 282, p. 457-481, 1958.

KHATAMI, D.; SHAFEI, B. Impact of Climate Conditions on Deteriorating Reinforced Concrete Bridges in the US Midwest Region. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 35, n. 1, p. 04020129, 2021.

KIM, C.; CHOE, D. E.; CASTRO-BORGES, P.; CASTANEDA, H. Probabilistic Corrosion Initiation Model for Coastal Concrete Structures. **Corrosion and Materials Degradation**, v. 1, n. 3, p. 328-344, 2020.

KIM, K. H.; NAM, M. S.; HWANG, H. H.; ANN, K. Y. Prediction of remaining life for bridge decks considering deterioration factors and propose of prioritization process for bridge deck maintenance. **Sustainability**, v. 12, n. 24, p. 10625, 2020.

KIM, H.; TAE, S.; AHN, Y.; YANG, J. Scenarios for life cycle studies of bridge concrete structure maintenance. **Sustainability**, v. 12, n. 22, p. 9557, 2020.

KLEIN, D. L.; GASTAL, F. P. S. L.; CAMPAGNOLO, J. L.; SILVA FILHO, L. C. P. Critérios adotados na vistoria e avaliação de obras de arte. *In: JORNADA SULAMERICANA DE ENGENHARIA ESTRUTURAL*, 25., 1991, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: UFRGS, 1991. p. 185-197.

KRAKHMAL'NY, T.A.; EVTUSHENKO, S.I.; KRAKHMAL'NAYA, M.P. Improvement of a method of calculation of a residual resource of small reinforced concrete bridge constructions. **Procedia Engineering**, Russia, v. 150, p.1797-1803, 2016.

KOTEŠ, P.; VIČAN, J. Reliability Levels for Existing Bridges Evaluation According to Eurocodes. **Procedia Engineering**, v. 40, p.211-216, 2012. Elsevier.

LEE, E. T.; GO, O. T. Survival analysis in public health research. **Annual review of public health**, v. 18, n. 1, p. 105-134, 1997.

LI, Z.; LI, Z.; ZHAO, W.; Wang, Y. Probability modeling of precipitation extremes over two river basins in northwest of China. **Advances in Meteorology**, v. 2015, 2015.

LI, M.; JIA, G. Bayesian updating of bridge condition deterioration models using complete and incomplete inspection data. **Journal of Bridge Engineering**, v. 25, n. 3, p. 04020007, 2020.

LOLI, A.; BERTOLIN, C.; KOTOVA, L. Service life prediction of building components in the times of climate change. *In: IOP CONFERENCE SERIES: materials science and engineering. Proceedings [...]*. IOP Publishing. v. 949, n. 1, 2020. p. 012048.

LOPES, Benedito Arruda Ribeiro. **Sistema de manutenção predial para grandes estoques de edifícios**: estudo para inclusão do componente “Estrutura de Concreto”. 1998. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 1998.

LU, P.; WANG, H.; TOLLIVER, D. Prediction of bridge component ratings using ordinal logistic regression model. **Mathematical problems in engineering**, v. 2019, 2019.

MADANAT, S.; MISHALANI, R. G.; IBRAHIM, W. H. W. Estimation of Infrastructure Transition Probabilities from Condition Data. **Journal of Infrastructure Systems**, v.1, p. 120-125,1995.

MADRIGAL, L. O.; LANZAROTE, B. S.; BRETONES, J. M. F. Proposed method of estimating the service life of building envelope. Revista de la Construcción. **Journal of Construction**, v. 14, n. 1, p. 60-68, 2015.

MAGOS, M.; DE BRITO, J.; GASPARGAS, P. L.; SILVA, A. Application of the factor method to the prediction of the service life of external paint finishes on façades. **Materials and Structures**, v. 49, n. 12, p. 5209-5225, 2016.

MAHDI, I. M.; EBID, A. M.; KHALLAF, R. Decision support system for optimum soft clay improvement technique for highway construction projects. **Ain Shams Engineering Journal**, 2019.

MAKI, Y.; HA, T. M.; FUKADA, S.; TORII, K.; ONO, R. Current status of degraded road bridge slab located in mountainous area. *In*: MATEC WEB OF CONFERENCES. EDP Sciences, 2018. **Proceedings** [...]. 2018. p. 01019.

MANAFPOUR, A.; GULER, I.; RADLIŃSKA, A.; RAJABIPOUR, F.; WARN, G. Stochastic analysis and time-based modeling of concrete bridge deck deterioration. **Journal of Bridge Engineering**, v. 23, n. 9, p. 04018066, 2018.

MANGALATHU, S.; HEO, G.; JEON, J. Artificial neural network based multi-dimensional fragility development of skewed concrete bridge classes. **Engineering Structures**, v. 162, p.166-176, 2018.

MANKAR, A.; BAYANE, I.; SØRENSEN, J. D.; BRÜHWILER, E. Probabilistic reliability framework for assessment of concrete fatigue of existing RC bridge deck slabs using data from monitoring. **Engineering Structures**, v. 201, p. 109788, 2019.

MANTEL, N.; HAENSZEL, W. Statistical aspects of the analysis of data from retrospective studies of disease. **Journal of the National Cancer Institute**, v. 22, n. 4, p. 719-748, 1959.

MARQUES, C.; DE BRITO, J.; SILVA, A. Application of the factor method to the service life prediction of ETICS. **International Journal of Strategic Property Management**, Portugal, v. 22, n. 3, p. 204-222, 2018.

MARTINS, G. A.; DOMINGUES, O. **Estatística Geral e Aplicada**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2005.

MAŠOVIĆ, S.; HAJDIN, R. Modelling of bridge elements deterioration for Serbian bridge inventory. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 10, n. 8, p. 976-987, 2014.

MASSACHUSETTS INFRASTRUCTURE INVESTMENT COALITION. **Infrastructure Status Report: Massachusetts Bridges**. Massachusetts Infrastructure Investment Coalition, Boston, 2005.

MATOS, Maria José da Silva. **Durabilidade como critério de projecto: o Método Factorial no contexto português**. 2007. Dissertação (Mestrado em Reabilitação do Patrimônio Edificado), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2007.

MATOS, J.; CASAS, J. R. COST Action TU1406 and main results on bridge lifecycle management. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIFE-CYCLE CIVIL ENGINEERING (IALCCE)*, 6., 2018. Ghent. Belgium. **Proceedings** [...]. Belgium, 2018. CRC Press, p. 1-8.

MATOS J. C.; AMADO, J.; FERNANDES, S.; GALVÃO, N. An overview of COST Action TU 1406, Quality Specifications for Roadway Bridges (BridgeSpec). **Life-Cycle of Engineering Systems**, p. 1511-1517, 2016a.

MATOS, J. C.; CASAS, J. R.; FERNANDES, S. 2016. COST Action TU1406 Quality Specifications for Roadway Bridges (BridgeSpec). *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BRIDGE MAINTENANCE, SAFETY AND MANAGEMENT (IABMAS)*, 8., 2016. Foz do Iguaçu. **Proceedings** [...]. Foz do Iguaçu, 2016b. 8p.

MENDEZ-GALINDO, C.; MENG, N.; O'SUILLEABHAIN, C. Testing of key bridge components to ensure good life-cycle performance. *In: IABSE SYMPOSIUM GUIMARÃES 2019 - towards a resilient built environment - risk and asset management*. 2019. Guimarães, Portugal. **Proceedings** [...]. Guimarães, Portugal, 2019, p.1628-1635.

MEYER, T.; VON DER GRACHT, H. A.; HARTMANN, E. Technology foresight for sustainable road freight transportation: Insights from a global real-time Delphi study. **Futures & Foresight Science**, v. 4, n. 1, p. e101, 2022.

MIAO, Pengyong. Prediction-based maintenance of existing bridges using neural network and sensitivity analysis. **Advances in Civil Engineering**, v. 2021, 2021.

MIRZA, Saeed. Design of durable and sustainable concrete bridges. *In: CBM-CI INTERNATIONAL WORKSHOP*, 2015, Karachi, Pakistan. **Proceedings** [...]. Pakistan, 2015. p. 1-12. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/242603587_DESIGN_OF_DURABLE_AND_SUSTAINABLE_CONCRETE_BRIDGES. Acesso em: 29 ago. 2018.

MIRZAEI, Z.; ADEY, B. T.; KLATTER, L.; THOMPSON, P. D. **Overview of existing bridges management systems**. The IABMAS Bridge Management Committee. IABMAS, 2014, 179p.

MOHAMAD, M.; TRAN, D. Q. Risk-based prioritization approach to construction inspections for transportation projects. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 147, n. 1, p. 04020150, 2021.

MOORE, Dirk F. (2016). Applied survival analysis using R. New York, NY: Springer, 2016. 234p. ISBN 978-3-319-31243-9.

MORCOUS, George. Performance prediction of bridge deck systems using Markov chains. **Journal of performance of Constructed Facilities**, v. 20, n. 2, p. 146-155, 2006.

MOREIRA, Vicente Novo. **Avaliação de Segurança de Pontes Existentes**: aplicação ao Viaduto Ferroviário de Durrães. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Minho, Minho, 2014.

MOSCOSO, Yina Fernanda Muñoz. **Modelos de degradação para aplicação em sistemas de gerenciamento de obras de arte especiais – OAEs**. 2017. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

NABIZADEH, A.; TABATABAI, H.; TABATABAI, M. A. Conditional survival analysis for concrete bridge decks. **Life Cycle Reliability and Safety Engineering**, v. 9, n. 1, p. 63-75, 2019.

NABIZADEH, A.; TABATABAI, H.; TABATABAI, M. A. Survival analysis of bridge superstructures in Wisconsin. **Applied Sciences**, v. 8, n. 11, p. 2079, 2018.

NABIZADEH, A.; TABATABAI, H. Development of nonlinear probabilistic SN curves using survival analysis techniques with application to steel bridges. **International Journal of Fatigue**, v. 141, p. 105892, 2020.

NABIZADEH, A.; AL-BARQAWI, M. O.; TABATABAI, H. Probabilistic models for fatigue resistance of seven-wire prestressing strands and stay cables. **Journal of Bridge Engineering**, v. 26, n. 10, p. 04021070, 2021.

NABIZADEHDARABI, A. **Reliability of bridge superstructures in Wisconsin**. 2015. Dissertation (Science of Engineering). University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, 2015.

NABIZADEHDARABI, A. **Application of survival analysis techniques to probabilistic assessment of fatigue in steel bridges**. 2019. Thesis (Doctor of Philosophy in Engineering). The University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, 2019.

NADERPOUR, H.; KHEYRODDIN, A.; MORTAZAVI, S. Risk assessment in bridge construction projects in Iran using Monte Carlo simulation technique. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, v. 24, n. 4, p. 04019026, 2019.

NAVARRO LÓPEZ, César Eduardo. **Desenvolvimento de metodologia sistemática para a avaliação do estado das pontes existentes no Brasil**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.

New York State Department of Transportation (NYSDOT). 2017. **Bridge Inspection Manual**. New York State Department of Transportation, Albany, NY.

NGUYEN, Q. H.; LY, H. B.; NGUYEN, T. A.; PHAN, V. H.; NGUYEN, L. K.; TRAN, V. Q. Investigation of ANN architecture for predicting shear strength of fiber reinforcement bars concrete beams. **Plos one**, v. 16, n. 4, p. e0247391, 2021.

NOVAK, L.; NOVAK, D. Semi-probabilistic Assessment of Prestressed Concrete Bridge. *In: INTERNATIONAL PHD SYMPOSIUM IN CIVIL ENGINEERING*, 13., 2020, Marne-la-Vallée, Paris, France. **Proceedings** [...]. Marne-la-Vallée, Paris, France, 2020. p. 45.

OLIVEIRA, C. B. L.; GRECO, M.; LIMA, J. V. S.; NETO, J. F. C. Desenvolvimento de metodologia para a proposta de modelos de deterioração de pontes rodoviárias brasileiras. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC*, 59., 2017, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul. **Anais** [...]. Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, 2017. 16p.

OLIVEIRA, H. M. de.; NETO, L. B.; TAVARES, M. E. da N. Redes neurais artificiais na obtenção do traço e na definição da resistência à compressão de concretos de alta resistência. *In: SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL DA MARINHA – SPOLM (2007)*. Centro de Análises de Sistemas Navais, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro, 2007, 12p.

OSORIO-LIRD, A.; CHAMORRO, A.; VIDELA, C.; TIGHE, S.; TORRES-MACHI, C. Application of Markov chains and Monte Carlo simulations for developing pavement performance models for urban network management. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 14, n. 9, p.1169-1181, 2017.

PENG, Keke. Risk Evaluation for Bridge Engineering Based on Cloud-Clustering Group Decision Method. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 33, n. 1, p. 04018105, 2019.

POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C.; ANDRADE, J. J. O. A conceptual framework for service life prediction of reinforced concrete structures. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 3, n. 1, p. 1-11, 2018.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO (PMSP) – **IP 02/2004**. Instrução de Projeto – Classificação das Vias. São Paulo, 2004.

PUKL, R.; SAJDLOVA, T.; ROUTIL, L.; NOVAK, D.; SEDA, P. Case study: nonlinear reliability analysis of a concrete bridge. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BRIDGE MAINTENANCE, SAFETY AND MANAGEMENT (IABMAS)*, 8., 2016. Foz do Iguaçu, Paraná. **Proceedings** [...]. Foz do Iguaçu, Paraná, 2016. 5p.

QIAO, Y.; LABI, S.; FRICKER, J. D. Hazard-based duration models for predicting actual duration of highway projects using nonparametric and parametric survival analysis. **Journal of Management in Engineering**, v. 35, n. 6, p. 04019024, 2019.

RAQAB, M. Z.; AL-AWADHI, S. A.; KUNDU, D. Discriminating among Weibull, log-normal, and log-logistic distributions. **Communications in Statistics-Simulation and Computation**, v. 47, n. 5, p. 1397-1419, 2018.

RINCÓN, S. T.; SILVA, M. S.; VILLARRAGA, D. F. Incorporating Flexibility in Life-cycle Analysis of Infrastructure. *In: IABSE SYMPOSIUM GUIMARÃES 2019: Towards a Resilient*

Built Environment - Risk and Asset Management. 2019. Guimarães. Portugal. **Proceedings** [...]. Guimarães, Portugal, 2019, p. 841-848.

SABATINO, S.; FRANGOPOL, D. M. Life-cycle sustainability of highway bridges. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BRIDGE MAINTENANCE, SAFETY AND MANAGEMENT (IABMAS)*, 8., 2016. Foz do Iguacu, Paraná. **Proceedings** [...]. Foz do Iguacu, Paraná, 2016. 7p.

SAEED, T. U.; QIAO, Y.; CHEN, S.; GKRTZA, K.; LABI, S. Methodology for probabilistic modeling of highway bridge infrastructure condition: accounting for improvement effectiveness and incorporating random effects. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 23, n. 4, p. 04017030, 2017a.

SAEED, T. U.; MOOMEN, M.; AHMED, A.; MURILLO-HOYOS, J.; VOLOVSKI, M.; LABI, S. Performance evaluation and life prediction of highway concrete bridge superstructure across design types. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 31, n. 5, p. 04017052, 2017b.

SABLATZKY, Tenley. The Delphi Method. **Hypothesis: Research Journal for Health Information Professionals**, v. 34, n. 1, 2022.

SANTARSIERO, G.; MASI, A.; PICCIANO, V. Durability of Gerber Saddles in RC Bridges: Analyses and Applications (Musmeci Bridge, Italy). **Infrastructures**, v. 6, n. 2, p. 25, 2021.

SANTO JUNIOR, Celso Martinho do Espírito. **Método de determinação da vida útil estimada de pontes, viadutos e passarelas de concreto**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2020.

SANTOS, A. F.; BONATTE, M. S.; SOUSA, H. S.; BITTENCOURT, T. N.; MATOS, J. C. Improvement of the Inspection Interval of Highway Bridges through Predictive Models of Deterioration. **Buildings**, v. 12, n. 2, p. 124, 2022.

SCHUMACHER, T.; GHONIMA, O.; FLEISCHHACKER, A.; UNNIKRISSHANN, A. **Performance of concrete highway bridge decks using nationwide condition data [techbrief]**. United States. Federal Highway Administration. Office of Bridge Technology, 2018.

SERRALHEIRO, M. I.; DE BRITO, J.; SILVA, A. Methodology for service life prediction of architectural concrete facades. **Construction and Building Materials**, v. 133, p. 261-274, 2017.

SIFRE, S. P.; LENNER, R. Partial factors and reliability verification for the site load factor approach for the assessment of existing bridges. *In: Structures*. Elsevier, p. 307-317. 2021.

SILVA, A.; DE BRITO, J.; GASPAR, P. L. Stochastic approach to the factor method: durability of rendered façades. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 2, p. 04015130, 2016a.

SILVA, A.; DE BRITO, J.; GASPAR, P. L. Comparative analysis of service life prediction methods applied to rendered façades. **Materials and Structures**, v. 49, n. 11, p. 4893-4910, 2016b.

SILVA, A.; DE BRITO, J.; GASPAR, P. L. Deterministic versus probabilistic approach of the factor method for the service life prediction of ceramic claddings. In: **Life-Cycle of Engineering Systems**: CRC Press, 2016c. p. 1277-1284.

SILVA, A.; PRIETO, A. J. Modelling the service life of timber claddings using the factor method. **Journal of Building Engineering**, v. 37, p. 102137, 2021.

SILVA, C. J. G.; VITÓRIO, J. A. P.; de MORAIS, M. H. M. F.; CARNEIRO, A. M. P.; de OLIVEIRA, R. A. Estudo sobre a vida útil residual de duas passarelas de pedestres localizadas na rodovia BR-101/PE. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, p. e559101220781-e559101220781, 2021.

SILVA, C. J. G.; VITORIO, J. A. P.; CARNEIRO, A. M. P.; OLIVEIRA, R. A. Análise da vida útil residual de duas passarelas de concreto localizadas sobre a BR-101/PE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 60., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu. p. 1-14.

SINHA, K.; LABI, S.; RODRIQUEZ, M.; TINE, G.; DUTTA, R. **Procedures for the Estimation of Pavement and Bridge Preservation Costs for Fiscal Planning and Programming**. FHWA/IN/JTRP-2005/17. Purdue University, West Lafayette. 2005.

SINHA, K. C.; LABI, S. A.; MCCULLOUGH, B. G.; BARGHAVA, A.; BAI, Q. **Updating and Enhancing the Indiana Bridge Management System (IBMS)**. FHWA/IN/JTRP-2008/30. Purdue University, West Lafayette. 2009.

SOUZA, J.; SILVA, A.; DE BRITO, J.; BAUER, E. Service life prediction of ceramic tiling systems in Brasília-Brazil using the factor method. **Construction and Building Materials**, v. 192, p. 38-49, 2018.

SRIKANTH, I.; AROCKIASAMY, M. Remaining service life prediction of aging concrete bridges based on multiple relevant explanatory variables. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, v. 26, n. 4, p. 04021036, 2021.

SRIKANTH, I.; AROCKIASAMY, M. Deterioration models for prediction of remaining useful life of timber and concrete bridges: A review. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English edition)**, v. 7, n. 2, p. 152-173, 2020.

STEVENS, N. A.; LYDON, M.; MARSHALL, A. H.; TAYLOR, S. Identification of bridge key performance indicators using survival analysis for future network-wide structural health monitoring. **Sensors**, v. 20, n. 23, p. 6894, 2020.

STEVENS, N. A.; LYDON, M.; MARSHALL, A. H.; TAYLOR, S. E. Application of survival techniques to establish environmental and operational controls on road bridge deterioration. In: EUROPEAN YOUNG STATISTICIANS MEETING (EYSM), 22., 2021, Athens (online), Greece. **Proceedings [...]**. Greece, 2021. p. 128.

STRAUB, Ad. Estimating the Service Lives of Building Products in Use. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 9, n. 3, p.1-10, 2015.

TABATABAI, H.; NABIZADEH, A.; TABATABAI, M. Overview of survival analysis techniques for probabilistic assessment of bridge service life. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION, 17., 2018. Proceedings [...]. 2018. p. 1-19.*

TABATABAI, H.; LEE, C.; TABATABAI, M. A. **Survival analyses for bridge decks in Northern United States**. Civil and Environmental Engineering Faculty Articles. 7. 2016. Disponível em: https://dc.uwm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1006&context=cee_facart. Acesso em: 15 mar. 2022.

TABATABAI, H.; LEE, C.; TABATABAI, M. A. Reliability of bridge decks in the United States. **Bridge Structures**, v. 11, n. 3, p. 75-85, 2015.

TABATABAI, H.; TABATABAI, M.; LEE, C. L. Reliability of bridge decks in Wisconsin. **Journal of Bridge Engineering**, v. 16, n. 1, p. 53-62, 2011.

TARONE, R. E.; WARE, J. On distribution-free tests for equality of survival distributions. **Biometrika**, v. 64, n. 1, p. 156-160, 1977.

TRAN, H. D.; SETUNGE, S.; KOAY, Y. C.; LUCZAK, H. A simulated maintenance costing using a Markov deterioration model for bridge components. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BRIDGE MAINTENANCE, SAFETY AND MANAGEMENT (IABMAS), 9., 2018, Melbourne, Australia. Proceedings [...]. Melbourne, Australia, 2018. p. 187.*

TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA. (2013). **Pavement asset design and management guide**. Disponível em: http://www.tac-atc.ca/sites/tac-atc.ca/files/site/doc/resources/padmng_primer_for_publishing.pdf. Acesso em: 06 jul. 2018.

TENŽERA, D.; PUŽ, G.; RADIĆ, J. **Visual inspection in evaluation of bridge condition**. GRADEVINAR, 2012, p. 717 – 726. Disponível em: http://casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE_64_2012_9_1_1033_EN.pdf. Acesso em: 23 fev. 2022.

THOMPSON, Paul D. Risk Assessment for Bridge Management Systems. *In: INTERNATIONAL BRIDGE MANAGEMENT AND STRUCTURE CONFERENCE, 11., 2017. Mesa, Arizona. Proceedings [...]. Arizona. 2017, p. 49-64.* Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec224.pdf>. Acesso em: 02 jan. 2018.

THOMPSON, P. D.; SOBANJO, J. O. Estimation of enhanced Pontis deterioration models in Florida. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BRIDGE MAINTENANCE, SAFETY AND MANAGEMENT (IABMAS), 5., 2010. Philadelphia. Proceedings [...]. Philadelphia, 2010. p. 238.*

VAN NOORTWIJK, J. M.; KLATTER, H. E. The use of lifetime distributions in bridge maintenance and replacement modelling. **Computers & Structures**, v. 82, n. 13-14, p. 1091-1099, 2004.

VAUPEL, J. W.; MANTON, K. G.; STALLARD, E. The impact of heterogeneity in individual frailty on the dynamics of mortality. **Demography**, v. 16, n. 3, p. 439-454, 1979.

VERLY, Rogério Calazans. **Avaliação de metodologias de inspeção como instrumento de priorização de intervenções em obras de arte especiais**. 2015. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2015.

VITÓRIO, José Afonso Pereira. **Conservação, Segurança Estrutural e Reforço de Pontes Rodoviárias de Concreto**. São Paulo: Associação Brasileira de Pontes e Estruturas (ABPE), 2015a. 36 slides, color.

VITÓRIO, José Afonso Pereira. Uma Contribuição ao Estudo da Avaliação da Segurança de Pontes Existentes. **Engenharia Estudo e Pesquisa**. ABPE, v. 15 - n. 2 - p. 03-13. jul.- dez. 2015b. Disponível em: <http://www.revistaep.com/imagens/volume15_02/cap01.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2018.

VITÓRIO, José Afonso Pereira. **Um estudo comparativo sobre métodos de alargamento de pontes rodoviárias de concreto armado, com a utilização das normas brasileiras e Eurocódigos**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – especialização em estruturas) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, 2013.

VITÓRIO, José Afonso Pereira. Avaliação do grau de risco estrutural de pontes rodoviárias de concreto. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 50., Salvador. 2008. **Anais [...]**. Salvador, 2008. 16p.

VOLLAND, B.; FARSI, M.; LASVAUX, S.; PADEY, P. **Service life of building elements: an empirical investigation**. IRENE Working Paper, 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10419/213486>. Acesso em: 25 fev. 2022.

WAH, W. S. L.; CHEN, Y.; OWEN, J. S. A regression-based damage detection method for structures subjected to changing environmental and operational conditions. **Engineering Structures**, v. 228, p. 111462, 2021.

WAH, W. S. L.; OWEN, J. S.; CHEN, Y. T.; ELAMIN, A.; ROBERTS, G. W. Removal of masking effect for damage detection of structures. **Engineering Structures**, v. 183, p. 646-661, 2019.

WANG, P.; LI, Y.; REDDY, C. K. Machine learning for survival analysis: a survey. **ACM Computing Surveys (CSUR)**, v. 51, n. 6, p. 1-36, 2019.

WARMLING, G. M. B.; SANTOS FILHO, M. L.; MACHADO, R. D.; PIERALISI, R. Application of an objective methodology to analyze bridge performance in Brazil. *In*: **Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations**. CRC Press, 2021. p. 3763-3768.

WOODWARD, R.; CULLINGTON, D. W.; DALY, A. F.; VASSIE, P.; HAARDT, P.; KASHNER, R.; ... PERUS, I. **BRIDGE MANAGEMENT IN EUROPE (BRIME)-Deliverable D14-Final Report**. 2001. Disponível em: <http://>

<https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/brimerep.pdf>. Acesso em: 09 mar. 2022.

YAN, A. M.; KERSCHEN, G.; DE BOE, P.; GOLINVAL, J. C. Structural damage diagnosis under varying environmental conditions—part I: a linear analysis. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 19, n. 4, p. 847-864, 2005.

YOUSUF, Muhammad Imran. Using experts opinions through Delphi technique. **Practical Assessment, Research, and Evaluation**, v. 12, n. 1, p. 4, 2007.

ZAMBON, I.; VIDOVIC A.; STRAUSS, A.; MATOS, J.; AMADO, J. Comparison of stochastic prediction models based on visual inspections of bridge decks. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 23, n. 5, p. 553-561, 2017.

ZANINI, M. A.; FALESCHINI, F.; PELLEGRINO, C. Bridge residual service-life prediction through Bayesian visual inspection and data updating. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 13, n. 7, p. 906-917, 2016.

ZARZAR JÚNIOR, F. C. **Metodologia para estimar a vida útil de elementos construtivos, baseada no método dos fatores**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2007.

ZHANG, Y.; NOVICK, D. A.; HADAVI, A.; KRIZEK, R. J. Whole life cycle cost for Chicago type bascule bridges. **Cost Engineering**, v. 50, n. 4, p. 28, 2008.

ZHANG, H.; MARSH, D. W. R. Multi-state deterioration prediction for infrastructure asset: Learning from uncertain data, knowledge and similar groups. **Information Sciences**, v. 529, p. 197-213, 2020.

ZHU, E.; BAI, Z.; ZHU, L.; Li, Y. Research on bridge structure SAM based on real-time monitoring. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 12, n. 3, p. 725-742, 2022.

ZHU, Jing. Research on Project Approval Evaluation Index of Highway Engineering Metering Technical Specification Based on Delphi Method. In: IOP CONFERENCE SERIES: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019. p. 042020.

APÊNDICE A – INFORMAÇÕES E PONDERAÇÕES DOS FATORES DA SUPERESTRUTURA DAS OAES 20 E 21 DA BR-408/PE (CONCRETO PROTENDIDO)

Quadro A1.1 – BR-408/PE (Concreto protendido)

Rodovia	Item	Localização	km	Classe (Trem tipo - tf)	Tipo de estrutura	Ano de construção	VMD	Descrição Elemento	Dano	Operador _Lim_Inf	Limite inferior	Operador _Lim_Sup	Limite superior	Insuficiência estrutural	Deficiência funcional	A	B	C	D	E	F.1	F.2	F.3	F.4	F.5	F.6	G
BR-408	20	RMR	93,43	45	Viga de Concreto protendido	1997	32735	Laje de concreto armado	Infiltração no concreto	>=	0	<	0,20		Calçada para pedestres inexistente	1,000	1,000	0,850	1,000	0,800	0,900	0,950	1,000	1,000	1,000	1,000	0,800
BR-408	20	RMR	93,43	45	Viga de Concreto protendido	1997	32735	Laje de concreto armado	Manchas de umidade	>=	0	<	0,20			1,000	1,000	0,850	1,000	0,800	0,900	0,950	1,000	1,000	1,000	1,000	0,800
BR-408	20	RMR	93,43	45	Viga de Concreto protendido	1997	32735	Viga I ou T de concreto protendido	Concreto desagregado com armadura exposta e oxidada	>=	0	<	0,20			1,000	1,000	0,850	1,000	0,800	0,900	0,950	1,000	1,000	1,000	1,000	0,800
BR-408	20	RMR	93,43	45	Viga de Concreto protendido	1997	32735	Viga I ou T de concreto protendido	Manchas de umidade	>=	0	<	0,20			1,000	1,000	0,850	1,000	0,800	0,900	0,950	1,000	1,000	1,000	1,000	0,800
BR-408	21	RMR	105,03	36	Viga de Concreto protendido	1975	32735	Laje de concreto armado	Infiltração no concreto	>=	0	<	0,20		Calçada para pedestres inexistente	1,000	1,000	0,850	1,000	0,800	0,900	0,925	1,000	1,000	1,000	1,000	0,800
BR-408	21	RMR	105,03	36	Viga de Concreto protendido	1975	32735	Laje de concreto armado	Manchas de umidade	>=	0	<	0,20			1,000	1,000	0,850	1,000	0,800	0,900	0,925	1,000	1,000	1,000	1,000	0,800
BR-408	21	RMR	105,03	36	Viga de Concreto protendido	1975	32735	Viga I ou T de concreto protendido	Manchas de umidade	>=	0	<	0,20			1,000	1,000	0,850	1,000	0,800	0,900	0,925	1,000	1,000	1,000	1,000	0,800
BR-408	21	RMR	105,03	36	Viga de Concreto protendido	1975	32735	Viga I ou T de concreto protendido								1,000	1,000	1,000	1,000	0,800	0,900	0,925	1,000	1,000	1,000	1,000	0,800

Fonte: O autor (2022).

APÊNDICE B – INFORMAÇÕES E PONDERAÇÕES DOS FATORES DA SUPERESTRUTURA DAS OAES 76 E 77 DA BR-423/PE (CONCRETO ARMADO)

Quadro B1. 1 – BR-423/PE (Concreto armado)

Rodovia	Item	Localização	km	Classe (Trem tipo - tf)	Tipo de estrutura	Ano de construção	VMD	Descrição Elemento	Dano	Operador _Lim_Inf	Limite inferior	Operador _Lim_Sup	Limite superior	Insuficiência estrutural	Deficiência funcional	A	B	C	D	E	F.1	F.2	F.3	F.4	F.5	F.6	G	
BR-423	76		186,97	45	Viga de concreto armado	1985	9044	Laje de concreto armado	Lixiviação e mancha de carbonatação	>=	0	<	0,20	Deterioração acentuada dos materiais de construção	Pingadeira inexistente	1,000	0,900	0,850	1,000	1,000	0,925	0,950	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,800
BR-423	76		186,97	45	Viga de concreto armado	1985	9044	Laje de concreto armado	Infiltração no concreto	>=	0	<	0,20			1,000	1,000	0,850	1,000	1,000	0,925	0,950	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,800
BR-423	76		186,97	45	Viga de concreto armado	1985	9044	Laje de concreto armado	Armadura sem cobertura	>=	0	<	0,20			1,000	1,000	0,850	1,000	1,000	0,925	0,950	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,800
BR-423	76		186,97	45	Viga de concreto armado	1985	9044	Laje de concreto armado	Concreto desagregado com armadura exposta e oxidada	>=	0	<	0,20			1,000	1,000	0,850	1,000	1,000	0,925	0,950	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,800
BR-423	76		186,97	45	Viga de concreto armado	1985	9044	Laje de concreto armado	Manchas de umidade	>=	0	<	0,20			1,000	1,000	0,850	1,000	1,000	0,925	0,950	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,800
BR-423	76		186,97	45	Viga de concreto armado	1985	9044	Viga T ou I de concreto armado								1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,925	0,950	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,800
BR-423	77		196,19	36	Viga Caixaão Concreto Armado	1975	9044	Laje de concreto armado	Lixiviação e mancha de carbonatação	>=	0	<	0,20	Deterioração acentuada dos materiais de construção	Calçada para pedestres inexistente	1,000	1,000	0,850	1,000	1,000	0,925	0,925	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,800
BR-423	77		196,19	36	Viga Caixaão Concreto Armado	1975	9044	Laje de concreto armado	Infiltração no concreto	>=	0	<	0,20		Pingadeira inexistente	1,000	0,900	0,850	1,000	1,000	0,925	0,925	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,800
BR-423	77		196,19	36	Viga Caixaão Concreto Armado	1975	9044	Laje de concreto armado	Fissura profunda fina	>=	0	<	0,20		Drenagem de pista insuficiente	1,000	0,900	0,906	1,000	1,000	0,925	0,925	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,800
BR-423	77		196,19	36	Viga Caixaão Concreto Armado	1975	9044	Laje de concreto armado	Manchas de umidade	>=	0	<	0,20		Viga caixaão com interior inacessível	1,000	1,000	0,850	1,000	1,000	0,925	0,925	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,800
BR-423	77		196,19	36	Viga Caixaão Concreto Armado	1975	9044	Viga caixaão de concreto armado	Lixiviação e mancha de carbonatação	>=	0	<	0,20	Deterioração acentuada dos materiais de construção		1,000	1,000	0,850	1,000	1,000	0,925	0,925	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,800
BR-423	77		196,19	36	Viga Caixaão Concreto Armado	1975	9044	Viga caixaão de concreto armado	Armadura sem cobertura	>=	0	<	0,20			1,000	1,000	0,850	1,000	1,000	0,925	0,925	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,800
BR-423	77		196,19	36	Viga Caixaão Concreto Armado	1975	9044	Viga caixaão de concreto armado	Manchas de umidade	>=	0	<	0,20			1,000	1,000	0,850	1,000	1,000	0,925	0,925	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,800

Fonte: O autor (2022).

APÊNDICE C – INFORMAÇÕES DA ESTIMATIVA DE VMD DE ALGUMAS OAES EM CONCRETO ARMADO

- BR-232/PE
 - OAE 040330 (50)

Considerando o comportamento do VMD 2009 de redução de 25% do VMD do km 129,86 para o km 182, foi realizado um cálculo reverso tomando-se como base o valor (14.206) do km 182 (25% -14206 / 100% - x).
 - OAE 040059 (51)

Considerando o comportamento do VMD 2009, foi atribuído o mesmo VMD do km 177,91.
 - OAE 040555 (52)

Baseado no comportamento do VMD 2009, foi considerada uma redução de 40% (22730) no VMD (56.824) do km 129.86.
 - OAE 040591 (61)

Considerando o comportamento do VMD 2009 de redução de 50% do VMD do km 279 em diante, foi realizada uma redução de 43% (7250) do VMD 274,75 (12720).
 - OAE 040598 (62)

Considerando o comportamento do VMD 2009 de redução de 50% do VMD do km 279 em diante, foi realizada uma redução de 43% (7250) do VMD 274,75 (12720).
 - OAE 040066 (63)

Considerando o comportamento do VMD 2009 de redução de 50% do VMD do km 279 em diante, foi realizada uma redução de 43% (7250) do VMD 274,75 (12720).
 - OAE 040067 (64)

Considerando o comportamento do VMD 2009 de redução de 50% do VMD do km 279 em diante, foi realizada uma redução de 43% (7250) do VMD 274,75 (12720).

➤ OAE 040084 (65)

Considerando o comportamento do VMD 2009 de redução de 50% do VMD do km 279 em diante, foi realizada uma redução de 43% (7250) do VMD 274,75 (12720).

• BR-408/PE

➤ OAE 040510 (75)

Considerado o comportamento do VMD 2009, foi atribuído um aumento de 40% do VMD de 2018 do km 63,5 (carpina).

• BR-423/PE

➤ OAE 040486 (76)

Considerado o VMD do km 96,3 (Garanhuns) do contrato 2018, bem como baseado no comportamento do VMD 2009.

➤ OAE 040488 (77)

Considerado o VMD do km 96,3 (Garanhuns) do contrato 2018, bem como baseado no comportamento do VMD 2009.

• BR-424/PE

➤ OAE 040584 (98)

Considerando o comportamento do VMD 2009, foi atribuída a quantidade de 10% dos veículos (844) que trafegam no km 82,93 (8440).

APÊNDICE D – SCRIPT DA ANÁLISE DE SOBREVIVÊNCIA

```
#####  
## Limpar comandos e variáveis definidas  
## anteriormente  
rm(list=ls(all=TRUE))'  
  
## Pacotes úteis  
  
library(ggplot2)  
library(MASS)  
library(car)  
library(statmod)  
library(corrplot)  
library(RColorBrewer)  
library(survival)  
library(flexsurv)  
library(survminer)  
library(ranger)  
library(ggfortify)  
library(ComparisonSurv)  
library(SurvRegCensCov)  
library(Rcpp)  
library(fitdistrplus)  
library(llogistic)  
library(coin)  
  
dados <- read.table("C:\\Backup\\Tese\\Doutorado\\Tese_Defesa\\  
dados6.txt",header=TRUE)  
attach(dados)  
  
# dados  
#x1 -- comprimento  
#x2 -- vmd  
#x3 -- me
```

```
cens <- numeric()
n <- length(y)

for(i in 1:n){

  if(y[i]<60) {cens[i] <- 1}else{cens[i] <- 0}

}

## Gerando a curva de sobrevivência considerando todas as idades
## 1

km_fit <- survfit(Surv(y, cens) ~ 1)
median(km_fit$time)
autoplot(km_fit,xlab = "Idade (em anos)", ylab = "Sobrevivência",main="Função de
sobrevivência")

## Gerando a curva de sobrevivência considerando segundo o material da estrutura
## 2

km_trt_fit <- survfit(Surv(y, cens) ~ x3)
autoplot(km_trt_fit)

## Testes não paramétricos usados na comparação das curvas

data1 <- data.frame(y,

  cens,

  x3 = factor(x3,labels = c("conA", "conP")))

fit_teste1 <- logrank_test(Surv(y, cens) ~ x3, data = data1, type="logrank")
fit_teste1

fit_teste2 <- logrank_test(Surv(y, cens) ~ x3, data = data1, type="Gehan-Breslow")
```

```
fit_teste2
```

```
fit_teste3 <- logrank_test(Surv(y, cens) ~ x3, data = data1, type="Tarone-Ware")
```

```
fit_teste3
```

```
#####
```

```
###
```

```
## Função de sobrevivência e risco acumulado (Obtendo de outra maneira)
```

```
#####
```

```
###
```

```
#####
```

```
# Caso geral
```

```
#####
```

```
plot(survfit(Surv(y, cens) ~ 1), conf.int=FALSE, xlab = "Idade (em anos)",
cex.main=1.1, cex.lab=1.1, cex.axis=1.1, ylab = "Confiabilidade", lwd=2)
```

```
legend(1, 0.8, legend=c("Kaplan-Meier"), col=c(1), lty=1, lwd=2, cex=1.0, bty="n")
```

```
#####
```

```
# Risco acumulado
```

```
#####
```

```
h.sort.of <- km_fit$n.event/km_fit $n.risk
```

```
H.tilde <- cumsum(h.sort.of)
```

```
#H.tilde <- c(H.tilde, tail(H.tilde, 1))
```

```
#length(H.tilde)
```

```
plot(km_fit$time, H.tilde, xlab="Idade (em anos)", type="s", cex.main=1.1,
cex.lab=1.1, cex.axis=1.1, lwd=2, ylab="Taxa de falha (acumulada)")
```

```
legend(5, 0.8, legend=c("Kaplan-Meier"), col=c(1), lty=1, lwd=c(2), cex=1.0, bty="n")
```

```
#####
```

```
# Caso 2 - Considerando material da estrutura
```

```
#####
```

```
# Sobrevivencia
```

```
plot(survfit(Surv(y, cens) ~ x3), conf.int=FALSE, xlab = "Idade (em anos)",
cex.main=1.8, cex.lab=1.5,cex.axis=1.5, ylab = "Confiabilidade",lty=c(1,2),col=c(1,2),lwd=2)
legend(3, 0.8, legend=c("Concreto protendido", "Concreto armado"), col=c(1, 2),
lty=1:2, lwd=c(2,2), cex=1.0,bty="n")
```

```
# Função de risco acumulado
```

```
Cumhazard.plot(y,cens,x3,col=c(1,2),lwd=c(2,2),lty=c(1,2)
```

```
,lab.x="Idade (em anos)",lab.y="Taxa de falha (acumulada)")
```

```
legend(5, 3, legend=c("Concreto protendido", "Concreto armado"), col=c(1,2), lty=1:2,
lwd=c(2,2),cex=1.0,bty="n")
```

```
#####
```

```
### Ajustando o modelo de tempo de falha acelerado Weibull
```

```
#####
```

```
x3 <- as.factor(x3)
```

```
x2 <- x2
```

```
cens1 <- rep(1,98)
```

```
fit1 <- survreg(formula = Surv(y, cens) ~ x1+x2+x3, dist = "weibull")
```

```
summary(fit1)
```

```
AIC <- 2*length(fit1$coefficients)-2*fit1$loglik[2];AIC
```

```
ft_WE <- fitdistr(y,densfun="weibull")
```

```
ft_WE1 <- fitdistr(y[1:76],densfun="weibull")
```

```
ft_WE2 <- fitdistr(y[77:98],densfun="weibull")
```

```

zz <- seq(0.001,70,length.out=76)
fSwe <-
pweibull(zz,shape=ft_WE$estimate[1],scale=ft_WE$estimate[2],lower.tail=FALSE)
fSwe1 <-
pweibull(zz,shape=ft_WE1$estimate[1],scale=ft_WE1$estimate[2],lower.tail=FALSE)
fSwe2 <-
pweibull(zz,shape=ft_WE2$estimate[1],scale=ft_WE2$estimate[2],lower.tail=FALSE)

plot(zz,fSwe, xlab = "Idade (em anos)", cex.main=1.1,
ylim=c(0,1),cex.lab=1.1,cex.axis=1.1, ylab = "Confiabilidade",lwd=2,type="l")
lines(fSwe1,lwd=2,type="l",lty=2,col=2)
lines(fSwe2,lwd=2,type="l",lty=3,col=3)
legend(50, 1.0, legend=c("Todas as pontes","Conc. Protendido","Conc. Armado"),
col=c(1,2,3), lty=c(1,2,3), lwd=c(2,2,2), cex=1.0,bty="n")
dev.off()

#####
## Obtendo o gráfico dos resíduos
#####
envelopeDS <- function(x){

  U <- x
  n <- length(x)
  d2s <- sort(U)
  xq2 <- qnorm(ppoints(n))
  Xsim <- matrix(0, 100, n)
  for(i in 1:100){

    u2 <- rnorm(n)

    Xsim[i,] <- u2

  }
}

```

```

Xsim2 <- apply(Xsim, 1, sort)
d21 <- matrix(0, n, 1)
d22 <- matrix(0, n, 1)
for(i in 1:n){

  d21[i] <- quantile(Xsim2[i,], 0.025)
  d22[i] <- quantile(Xsim2[i,], 0.975)
}
d2med <- apply(Xsim2, 1, mean)
fy <- range(d2s, d21, d22)
plot(xq2, d2s, xlab = quote("Quantis teóricos"),
      ylab = quote("Quantis empíricos"),
      pch = 20, ylim = fy)
par(new = T)
plot(xq2, d21, type = "l", ylim = fy, xlab = "", ylab = "")
par(new = T)
plot(xq2, d2med, type = "l", ylim = fy, xlab = "", ylab = "")
par(new = T)
plot(xq2, d22, type = "l", ylim = fy, xlab = "", ylab = "")
}

Swe <- pweibull(y,shape=ft_WE$estimate[1],scale=ft_WE$estimate[2])
Swe1 <- Swe
Swe <- sort(c(1,Swe),decreasing = TRUE)

DSresidualModel <- qnorm(Swe1)

envelopeDS(DSresidualModel)

cens1 <- rep(1,98)
fit1 <- survreg(formula = Surv(y, cens1) ~ x1+x2+x3, dist = "weibull")
cbind(predict(fit1))

```