

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Programa de Pós-graduação em Modelagem Matemática e Computacional

SOBRE GERENCIAMENTO DE PONTES: MODELO PARA PRIORIZAÇÃO DE MANUTENÇÃO DE PONTES FERROVIÁRIAS COM O USO DE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO E CLUSTERIZAÇÃO

João Francisco de Carvalho Neto

Orientador: Flávio Vinícius Cruzeiro Martins
CEFET-MG

Coorientador: Tulio Nogueira Bittencourt
USP

Belo Horizonte
Fevereiro de 2025

JOÃO FRANCISCO DE CARVALHO NETO

SOBRE GERENCIAMENTO DE PONTES: MODELO PARA PRIORIZAÇÃO DE MANUTENÇÃO DE PONTES FERROVIÁRIAS COM O USO DE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO E CLUSTERIZAÇÃO

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Matemática e Computacional do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Modelagem Matemática e Computacional.

Área de concentração: Modelagem Matemática e Computacional.

Linha de pesquisa: Sistemas Inteligentes.

Orientador: Flávio Vinícius Cruzeiro Martins
CEFET-MG

Coorientador: Tulio Nogueira Bittencourt
USP

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL
BELO HORIZONTE
FEVEREIRO DE 2025

Carvalho Neto, João Francisco de
C331s Sobre gerenciamento de pontes: modelo para priorização de manutenção de pontes ferroviárias com o uso de técnicas de otimização e clusterização / João Francisco de Carvalho Neto. – 2025.
178 f.

Tese (doutorado) apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional.
Orientador: Flávio Vinícius Cruzeiro Martins.
Coorientador: Tulio Nogueira Bittencourt.
Tese (doutorado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

1. Pontes ferroviárias – Teses. 2. Análise por agrupamento – Teses. 3. Sistemas de gestão de pontes – Teses. 4. Ferrovias – Teses. I. Martins, Flávio Vinícius Cruzeiro. II. Bittencourt, Tulio Nogueira. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título.

CDD 519.53

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Jane Marangon Duarte, CRB 6ª 1592 / Cefet/MG

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL

"SOBRE GERENCIAMENTO DE PONTES - MODELO PARA PRIORIZAÇÃO DE MANUTENÇÃO DE PONTES FERROVIÁRIAS COM O USO DE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO E CLUSTERIZAÇÃO".

Tese de Doutorado apresentada por **João Francisco de Carvalho Neto,** em 27 de fevereiro de 2025, ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional do CEFET-MG, e aprovada pela banca examinadora constituída pelos professores:

Documento assinado digitalmente
gov.br FLAVIO VINICIUS CRUZEIRO MARTINS
Data: 27/05/2025 17:48:08-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Flávio Vinícius Cruzeiro Martins (Orientador)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Documento assinado digitalmente
gov.br TULIO NOGUEIRA BITTENCOURT
Data: 27/05/2025 18:28:38-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Tulio Nogueira Bittencourt (Coorientador)
Universidade de São Paulo

Documento assinado digitalmente
gov.br Caroline Buratto de Lima e Oliveira
Data: 28/05/2025 10:28:22-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profª. Drª. Caroline Buratto de Lima e Oliveira
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

Documento assinado digitalmente
gov.br TIAGO SIMAO FERREIRA
Data: 28/05/2025 10:34:48-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Tiago Simão Ferreira
Instituto Federal de Minas Gerais

Documento assinado digitalmente
gov.br ALISSON MARQUES DA SILVA
Data: 29/05/2025 11:50:49-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Alisson Marques da Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Documento assinado digitalmente
gov.br ELIZABETH FIALHO WANNER
Data: 29/05/2025 04:59:45-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profª. Drª. Elizabeth Fialho Wanner
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Visto e permitida à impressão,

Prof. Dr. Alisson Marques da Silva
Coordenador do Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Modelagem Matemática e Computacional

Este trabalho é dedicado a Ícaro Carvalho Moreira (*in memoriam*), pelo exemplo de nobreza e intelectualidade.

Agradecimentos

Especial agradecimento à minha família pelo apoio diário.

IFMG pelo incentivo e disponibilidade para qualificação.

ABECE pelo contato e apoio institucional.

GMEC pela amizade e capacitação profissional.

RUMO S.A e Vale S.A pela colaboração e disponibilidade.

Programa de pós-gradução em Modelagem Matemática e Computacional do CEFET-MG.

Aos meus alunos por serem o motor de motivação dos meus estudos.

Aos orientadores pela oportunidade e paciência.

Dinael Corrêa Campos pela amizade e incentivo.

Por fim e acima de tudo, a Deus e à Sagrada Família que me protegem e abençoam com a luz da vida.

“Do céu veio uma voz dizendo: ’Este é meu Filho amado, que muito me agrada’ ” (Mateus 3,17)

Resumo

Estruturas vitais ao modal ferroviário, as pontes são constituídas por diferentes sistemas estruturais, tipologias e materiais. Apresentam distintos níveis de solicitações de trabalho e degradação pela exposição a classes de agressividade ambiental específicas de onde estão domiciliadas. Sendo, portanto, elementos de infraestrutura com constante redução de desempenho e/ou performance pelo desencadeamento de quadros patológicos típicos ao longo de sua vida útil. Nesse contexto, surge a necessidade de se realizar, por meio de inspeções técnicas, a identificação do estado real das pontes para se fundamentar a tomada de decisão de intervenções para reparo, recuperação e/ou reforço estrutural a fim de se alcançar níveis aceitáveis de trabalho que garantam a integridade material e a segurança dos usuários. Por meio da classificação normativa ou particular do índice de condição (IC), a definição das pontes a serem priorizados em períodos orçamentários representa um desafio aos gestores e ao corpo técnico responsável por esses ativos. Nessa conjuntura, o conteúdo desta tese tem como objeto de estudo o gerenciamento de pontes ferroviárias. Especificamente, a parcela desse gerenciamento que trata do planejamento de manutenções e/ou inspeções técnicas para conjuntos heterogêneos desses ativos perante as condições usuais da realidade brasileira. O cerne deste estudo é composto pela aplicação de formulações matemáticas de otimização linear inteira para seleção de ativos com base nas demandas de recursos, nas limitações financeiras e no uso de ferramenta de agrupamento de dados para classificação de pontes por meio de similaridade (clusterização). Foram analisados dois bancos de dados com atributos dissemelhantes de duas concessionárias relevantes da malha e indústria ferroviária nacional. Inicialmente procurou-se investigar a disponibilidade dos registros e campos dos dados de cadastro presentes, definindo os que fossem iguais ou equivalentes aos indicados na norma brasileira para inspeção de ponte, NBR 9452/2023, e passíveis de tratamento para utilização do algoritmo *k-means*. Em virtude do nível de integralidade dos dados disponibilizados, optou-se pelo uso dos dados de cadastro na clusterização por seu caráter estático e maior confiabilidade ao estado real das pontes. A partir disso, fundamentado na otimização do problema da mochila (*knapsack problem*), obteve-se resultados de subconjuntos de pontes a serem atendidos de acordo com as restrições financeiras e as priorizações internas das companhias. O modelo gerado pode auxiliar gestores na tomada de decisão, pois permite analisar os conjuntos selecionados resultantes ponderando-se aspectos físicos das estruturas associados às demandas financeiras individuais para manutenção das pontes. Assim como sua condição de deterioração definida pelo corpo técnico de engenharia. Em síntese, busca-se contribuir com o desenvolvimento do estado da arte da área de gerenciamento de pontes ferroviárias.

Palavras-chave: Pontes ferroviárias. Clusterização. Sistemas de gerenciamento de pontes. Ferrovia.

Abstract

Essentials structures for the railway system, bridges are made up of different structural systems, types and materials. They present different levels of work demands and degradation due to exposure to specific environmental aggressions in the area where they are located. Therefore, they are infrastructure elements with a constant reduction in performance and/or performance due to the triggering of typical pathological conditions throughout their useful life. In this context, there is a need to carry out, through technical inspections, the identification of the real condition of bridges to support decision-making regarding interventions for repair, recovery, and/or structural reinforcement to achieve acceptable levels of work that guarantee the material integrity and safety of users. Through the normative or specific classification of the index condition (IC), the definition of bridges to be prioritized in budgetary periods represents a challenge for managers and the technical staff responsible for these assets. In this context, the content of this thesis has as its object of study the management of railway bridges. Specifically, the portion of this management deals with the planning of maintenance and/or technical inspections for heterogeneous sets of these assets under the usual conditions of the Brazilian reality. The core of this study consists of the application of mathematical formulations of integer linear optimization for the selection of assets based on resource demands, financial limitations and the use of a data grouping tool for classifying bridges through similarity (clustering). Two databases with dissimilar attributes from two relevant concessionaires of the national railway network and industry were analyzed. Initially, we sought to investigate the availability of records and fields of the registration data present, defining those that were equal or equivalent to those indicated in the Brazilian standard for bridge inspection, NBR 9452/2023, and capable of being processed for use of the k-means algorithm. Due to the level of completeness of the data made available, it was decided to use the registration data in the clustering due to its static nature and greater reliability in the real state of the bridges. Based on this, based on the optimization of the knapsack problem, results were obtained for subsets of bridges to be serviced according to the financial restrictions and internal priorities of the companies. The model generated can assist managers in decision-making, as it allows the analysis of the resulting selected sets by considering the physical aspects of the structures associated with the individual financial demands for maintenance of the bridges, as well as their deterioration condition defined by the engineering technical team. In short, the aim is to contribute to the development of the state of the art of railway bridge management.

Keywords: Railway bridges. Clustering. Bridges Management System. Railway.

Lista de Figuras

Figura 1 – Mapa Ferroviário do Brasil.(ANTF, 2022) 2
Figura 2 – Mapa de novas ferrovias. (BRASIL, 2021) 7
Figura 3 – Comportamento gradual de deterioração de performance estrutural. . . . 11
Figura 4 – Probabilidade de transição para um modelo de 5 estados. 11
Figura 5 – Representação simplificada da análise de segurança pelo método probabilista. Modificado de (Couto et al., 2015) 15
Figura 6 – Atualização do índice β de confiabilidade. (Frangopol; Sabatino; Dong, 2017) 18
Figura 7 – Exemplos de anomalias em estruturas de concreto 21
Figura 8 – Exemplos de anomalias em estruturas metálicas e mistas 22
Figura 9 – Exemplos de anomalias gerais e funcionais 23
Figura 10 – Composição dos dados básicos do Anexo A da NBR 9452 25
Figura 11 – Comparativo entre as diferentes naturezas dos dados obtidos por meio de inspeções técnicas. 26
Figura 12 – Periodicidade de Inspeções. Fonte:(ABNT, 2023a) 27
Figura 13 – Conhecimento dos profissionais sobre cursos de capacitação 29
Figura 14 – Esquema semiótico peirceano. Modificado de (Almeida et al., 2011) . . . 33
Figura 15 – Esquema de desvio da qualidade da informação pela degeneração significativa 34
Figura 16 – Espiral do Conhecimento. Modificado de Takeuchi e Nonaka (1997, p. 80) 37
Figura 17 – Principais regiões dos componentes das pontes. Fonte: Vitório (2002) . . 38
Figura 18 – Dinâmica prevista das classificações 39
Figura 19 – Nomenclatura de longarinas (perfis simples) no eixo da rodovia ou ferrovia. ABNT (2023b) 40
Figura 20 – Histórico de Atualização da NBR 9452 40
Figura 21 – Matriz de Risco. Fonte: (SOUZA et al., 2021) 42
Figura 22 – Modelo de Gestão de Pontes. Fonte: modificado de (Mendes, 2009) 43
Figura 23 – Estrutura Básica de BMS. Fonte: modificado de (Oliveira, 2019) 44
Figura 24 – Processo de planejamento de inspeções 45
Figura 25 – Concepção do comportamento gradual de deterioração de performance estrutural associado aos custos de manutenção. 46
Figura 26 – Amostra de dados. 54
Figura 27 – Amostra de dados agrupados. Fonte: autor 55
Figura 28 – Deficiências em pontes dos EUA.(Poças, 2009) 55
Figura 29 – Natureza de Anomalias em pontes dos EUA.(Poças, 2009) 56
Figura 30 – Número ótimo de *clusters* com o uso dos métodos 61

Figura 31 – Amostra de dados agrupados de 100 pontes. Fonte: autor 61
Figura 32 – Distribuição de pontes por ano de implantação. 68
Figura 33 – Distribuição de pontes por material da superestrutura. 68
Figura 34 – Quantidade de pontes por número de vãos e extensão total das pontes. . 69
Figura 35 – Distribuição dos valores de maiores vãos em função da idade. 69
Figura 36 – Quantidade de pontes por classificação de criticidade e distribuição em função do ano de implantação. 70
Figura 37 – Dados Faltantes 70
Figura 38 – Distribuição de pontes por ano de implantação 72
Figura 39 – Distribuição dos valores de extensão em função do ano de implantação . 73
Figura 40 – Distribuição de Vãos 73
Figura 41 – Anomalias classificadas como nota 1 e 2 para o ano de 2021 74
Figura 42 – Dados Faltantes 75
Figura 43 – Fluxograma de Metodologia Proposta. 77
Figura 44 – Resultados dos métodos para determinação de *k clusters* 82
Figura 45 – Clusterização com dados faltantes 83
Figura 46 – Resultado da clusterização para k = 2. 83
Figura 47 – Resultado da clusterização para k = 3. 84
Figura 48 – Resultado da clusterização para k = 4. 84
Figura 49 – Resultado da clusterização para k = 5. 85
Figura 50 – Número ótimo de *clusters* com dados tratados. 86
Figura 51 – Clusterização para k = 2, 3, 4, 5 86
Figura 52 – Resultado da clusterização para k = 2. 87
Figura 53 – Resultado da clusterização para k = 3. 87
Figura 54 – Resultado da clusterização para k = 4. 88
Figura 55 – Resultado da clusterização para k = 5. 88
Figura 56 – Resultado da clusterização para k = 9. 89
Figura 57 – Resultado da clusterização para k = 10. 89
Figura 58 – Resultado da clusterização para k = 6,7,8,9. 90
Figura 59 – Comportamento do agrupamento (*cluster 1*) com o aumento do valor de *k* 91
Figura 60 – Comportamento do agrupamento (*cluster 2*) com o aumento do valor de *k* 91
Figura 61 – Comparativo dos agrupamentos (*clusters 1 e 2*) com o aumento do valor de *k* 92
Figura 62 – Gráficos dos índices de validação interna (função *[clValid]*). 92
Figura 63 – Resultado da validação de *cluster* para *k* = 10. 93
Figura 64 – Número ótimo de *clusters* 94
Figura 65 – Resultado da clusterização para k=2 94
Figura 66 – Resultado da clusterização para k=3 95
Figura 67 – Resultado da clusterização para k=4 95

Figura 68 – Resultado da clusterização para k=5 96
Figura 69 – Clusterização para k = 2,3,4,5. 96
Figura 70 – Resultado da clusterização para k=6 97
Figura 71 – Resultado da clusterização para k=7 97
Figura 72 – Resultado da clusterização para k=8 98
Figura 73 – Resultado da clusterização para k=9 98
Figura 74 – Resultado da clusterização para k=10 99
Figura 75 – Resultado da clusterização para k = 6,7,8,9. 99
Figura 76 – Resultado da clusterização para k = 6,7,8,9. 100
Figura 77 – Comportamento do agrupamento (*cluster*) 1 com o aumento do valor de k 101
Figura 78 – Comportamento do agrupamento (*cluster*) 2 com o aumento do valor de k 101
Figura 79 – Comparativo dos agrupamentos 1 e 2 com o aumento do valor de k 102
Figura 80 – Número de *clusters*. 102
Figura 81 – Resultado da clusterização para k=2 103
Figura 82 – Resultado da clusterização para k=3 103
Figura 83 – Resultado da clusterização para k=4 104
Figura 84 – Resultado da clusterização para k=5 104
Figura 85 – Clusterização para k = 2, 3, 4, 5. 105
Figura 86 – Resultado da clusterização para k=6 105
Figura 87 – Resultado da clusterização para k=7 106
Figura 88 – Resultado da clusterização para k=8 106
Figura 89 – Resultado da clusterização para k=9 107
Figura 90 – Clusterização para k= 6, 7, 8, 9. 107
Figura 91 – Clusterização para k= 6, 7, 8, 9. 108
Figura 92 – Resultado da clusterização para k=10 108
Figura 93 – Gráficos dos índices de validação interna. 109
Figura 94 – Enter Caption 109
Figura 95 – Instância da Formulação I (80% de P1, 50% de P2 e 33% de P3). 112
Figura 96 – Instância da Formulação I (90% de P1, 60% de P2 e 33% de P3). 112
Figura 97 – Instância da formulação I (100% de P1, 50% de P2 e 33% de P3). 113
Figura 98 – Montante de recurso orçamentário destinado a cada nível de prioridade em cada simulação. 113
Figura 99 – Seleção de pontes para $\lambda = 1$ 115
Figura 100–Seleção de pontes em função do IC ($\lambda = 1$). 115
Figura 101–Pontes selecionadas por cluster 116
Figura 102–Seleção de pontes para $\lambda = 2$ 116
Figura 104–Pontes selecionadas por cluster ($\lambda = 2$) 117
Figura 103–Seleção de pontes em função do IC ($\lambda = 2$). 117
Figura 105–Seleção de pontes para $\lambda = 3$ 118

Figura 106–Seleção de pontes em função do IC ($\lambda = 3$). 118
Figura 107–Pontes selecionadas por cluster ($\lambda = 3$) 119
Figura 108–Distribuição dos valores percentuais orçamentários e quantitativos por IC e *clusters* ($\lambda = 1$) 119
Figura 109–Distribuição dos valores percentuais orçamentários e quantitativos por IC e *clusters* ($\lambda = 2$) 120
Figura 110–Distribuição dos valores percentuais orçamentários e quantitativos por IC e *clusters* ($\lambda = 3$) 120
Figura 111–Relatório de Pesquisa sobre o estado da arte do gerenciamento de pontes. 123
Figura 112–Gráfico de trabalho publicado na VI Jornada Portuguesa de Engenharia de Estruturas sobre modelos preditivos de deterioração. 124
Figura 113–Gráfico de trabalho publicado na VI Jornada Portuguesa de Engenharia de Estruturas sobre análise de confiabilidade. 124
Figura 114–Trabalho apresentado no XIV Congresso Brasileiro de Pontes. 125
Figura 115–Viaduto do Cabral. 125
Figura 116–Ponte da Represa do Peti. 126
Figura 117–Viaduto MG 436. 126
Figura 118–Ponte sobre o Rio Doce. 127
Figura 119–Ponte sobre o Rio Piracicaba. 127
Figura 120–Ponte sobre o Rio Jacundá 128
Figura 121–Ponte sobre o Rio Cajuapara 128
Figura 122–Lista de danos em elementos de concreto. Fonte: autor 143
Figura 123–Lista de danos em elementos de aço. Fonte: autor 144
Figura 124–Lista de danos em elementos de alvenaria de pedra. Fonte: autor 145
Figura 125–Lista de danos em aparelhos de apoio metálicos. Fonte: autor 145
Figura 126–Lista de danos em aparelhos de apoio de neoprene. Fonte: autor 146
Figura 127–Lista de danos em aparelhos de apoio de elastoméricos. Fonte: autor . . . 146
Figura 128–Lista de danos em aparelhos de apoio de chapa. Fonte: autor 147
Figura 129–Compilação de artigos relacionados ao tema. Fonte: autor 148
Figura 130–Validação de cluster k = 2,3,4,5. 152
Figura 131–Validação de cluster k = 6,7,8,9. 153
Figura 132–Validação de cluster k = 10. 153
Figura 133–Dendograma para k = 10. 154
Figura 134–Validação de cluster k = 2,3,4,5. 154
Figura 135–Validação de cluster k = 6,7,8,9. 155
Figura 136–Validação de cluster k = 10. 156
Figura 137–Dendograma para k = 10. 157
Figura 138–Comparativo das quantidades de pontes selecionadas considerando os *clusters*. 158

Figura 139–Comparativo das quantidades de pontes selecionadas considerando os valores de IC. 158
Figura 140–Fluxograma de Gerenciamento de OAE. (ABNT, 2023a) 160
Figura 141–Dados Faltantes 162
Figura 142–Data de Implantação 163
Figura 143–Extensão x Número de Vãos 163
Figura 144–Área total das Pontes 164
Figura 145–Quantidade de aparelhos de apoio por ponte 164
Figura 146–Quantidade de vãos por ponte 164
Figura 147–Largura por ponte 165
Figura 148–Histograma de trem tipo 165
Figura 149–Histograma do comprimento das vigas 166
Figura 150–Histograma de responsabilidade 166
Figura 151–Histograma do número de vãos 167
Figura 152–Histograma de material da superestrutura 168
Figura 153–Histograma de traçado horizontal 169
Figura 154–Histograma de tipo de infraestrutura 169
Figura 155–Histograma de tipologia da superestrutura 170
Figura 156–Matriz de correlação 170
Figura 157–Dados Faltantes 171
Figura 158–Ano de construção 172
Figura 159–Altura 172
Figura 160–Comprimento 173
Figura 161–Estrado 173
Figura 162–Material da Superestrutura 174
Figura 163–Material dos Pilares 174
Figura 164–Quantidade de Pilares 175
Figura 165–Quantidade de Vãos 175
Figura 166–Trem Tipo 176
Figura 167–Boxplot 177
Figura 168–Matriz de Correlação de Pearson 178

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Conhecimento Explicíto x Conhecimento Tácito 36
Tabela 2 – Dados utilizados do Banco de Dados I 71
Tabela 3 – Valores percentuais de dados faltantes 71
Tabela 4 – Dados utilizados do Banco de Dados II 74
Tabela 5 – Valores percentuais de dados faltantes 76
Tabela 6 – Resultados para o número ótimo de k com dados tratados. 85
Tabela 7 – Resumo da validação interna para k = 10. 93
Tabela 8 – Resumo da validação interna para k = 10. 110
Tabela 9 – Percentagem dos custos individuais para composição do valor total. . . . 114
Tabela 10 – Percentagem dos custos individuais para composição do valor total em função do IC. 121
Tabela 11 – Percentagem dos custos individuais para composição do valor total em função dos *clusters*. 121

Lista de Quadros

Quadro 1 – Exemplos de termos gerais do estudo de patologias das construções . . . 20
Quadro 2 – Requisitos mínimos de escolaridade e experiência profissional conforme NBR 16230 (2013) 28
Quadro 3 – Classificação de OAE segundo os parâmetros estrutural, funcional e de durabilidade pela NBR 9452. 41
Quadro 4 – Programa básico de treinamento para inspetor I conforme NBR 16230 (2013) 161

Lista de Algoritmos

Algoritmo 1 – Algoritmo K-Means 53
Algoritmo 2 – Algoritmo *Elbow Method* 59

Algoritmo 3 – Algoritmo K-Means - Apêndice 149

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABECE	Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural
ABIFER	Associação Brasileira da Indústria Ferroviária
ANTF	Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários
ANTT	Agência Nacional de Transporte Terrestre
AREMA	*American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association*
ARTESP	Agência de Transporte dos Estado de São Paulo
AASHTO	*American Association of State Highway and Transportation Officials*
BMS	*Brigde Management System*
DECOM	Departamento de Computação
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
DS	Degeneração Significativa
EFC	Estrada de Ferro Carajás
EFVM	Estrada de Ferro Vitória-Minas
EP	Emenda provisória
EUA	Estados Unidos da América
FCA	Ferrovia Centro Atlântica
FHWA	*Federal Highway Administration*
FNS	Ferrovia Norte Sul
FORM	Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (*First Order Reliability Method*)
FOSM	Método de Primeira Ordem e Segundo Momento (*First Order Second Moment Method*)
ID	Inspeção Detalhada

IE	Inspeção Especial
IVS	Inspeção Visual Sensitiva
MEC	Ministério da Educação
MP	Manutenção Preventiva
NBI	*National Brigdes Inventory*
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NP	Não Polinomial
OAE	Obra de Arte Especial
OAC	Obra de Arte Corrente
PK	*Knapsack Problem*
PNLT	Plano Nacional de Logística e Transporte
RFFSA	Rede Ferroviária Federal S.A
SHM	*Structural Health Monitoring* (Monitoramento de integridade estrutural)
SORM	Método de Confiabilidade de Segunda Ordem (*Second Order Reliability Method*).
WSS	*Within cluster sum of square*
SSE	*Sum of square errors*
BSS	*Between sum square*
PCA	*Principal Components Analisys* (Análise de Componentes Principais)
IDE	*Integrated Development Environment*
P_i	Nível i de priorização interna
GMEC	Grupo de Modelagem em Estruturas de Concreto
PL	Programação linear
PLI	Programação linear inteira
VMD	Volume diário médio
LCC	*Life Cycle Cost*
LCCA	*Life Cycle Cost Analisys* (Análise do custo de ciclo de vida)
SGO	Sistema de Gerenciamento de Obras

Lista de Símbolos

β	Índice de Confiabilidade Estrutural
ΔG	Energia Livre de Gibbs
T	Matriz de Transição de Markov
Q	Matriz de Intensidade
z	Função de Otimização
$d(X_l, X_k)$	Distância entre os elementos X_l e X_k
c_i	Custo de inspeção do ativo i
b	Limite Orçamentário para Inspeções
q_{ij}	Taxa de transição de estados adjacentes
C_m	Custo de manutenção
C_G	Custo de Gerenciamento
C_{MP}	Custo de manutenção preventiva
C_{ME}	Custo de manutenção essencial
C_I	Custo de inspeções associadas
w_i	Peso de cada item (ativo) selecionado
K	Número de *clusters*
C_i	*Cluster* de ordem i
J	Função de custo no *elbow method*
$a(i)$	Dissimilaridade média de um elemento i no *silhoutte method*
$s(i)$	*Silhoutte coefficient*
Σ_{pxp}	Matriz de covariância
$Cov(X_i, X_j)$	Covariância da variável aleatória X
Y	Vetor aleatório de combinações lineares

λ	Autovalor da variável aleatória X e expoente do vetor de ganhos da função objetivo da formulação II
$E(X)$	Esperança da variável aleatória X
e_i	Autovetor normalizado associado ao autovalor λ_i
$Tr(\Sigma_{pxp})$	Traço da matriz de covariância Σ_{pxp}
V_{CI}	Vetor de custos unitários
V_P	Vetor de pontes por prioridade
$V_F(k)$	Vetor de pontes selecionadas k por eventos de falha
B	Número de *datasets* clusterizados no método *Gap Statistic*
$\mathbb{B}$	Variável booleana
Γ	Família de *scores* de função objetivo

Sumário

1 – Introdução **1**
1.1 Justificativa 5
1.2 Objetivos 6
1.2.1 Objetivos Específicos 6
1.3 Motivação 6
1.4 Organização do trabalho 8

2 – Fundamentação Teórica **9**
2.1 Referencial Teórico 9
2.2 Modelos de Deterioração de Pontes 10
2.2.1 Segurança e Confiabilidade de Estruturas 14
2.3 Anomalias das OAE Ferroviárias 19
2.4 Inspeções Técnicas em OAE Ferroviárias 24
2.4.1 Tipos de Inspeção 24
2.4.2 Qualificação de Inspetores 28
2.4.3 Levantamento e Identificação de Anomalias 29
2.4.4 O Aspecto Humano 31
2.5 Classificação do Grau de Deterioração de OAE 37
2.6 Sistemas de Gerenciamento de Obras de Artes Especiais - SGO 43
2.6.1 Alocação de Recursos 45
2.6.2 Gestão de Custos 46
2.6.3 Problema da Mochila - *Knapsack Problem - PK* 48
2.6.3.1 Mochila 0-1 49
2.6.3.2 Múltiplas Mochilas 49
2.7 Análise de Agrupamentos (Clusterização de Dados) 52
2.7.1 Algoritmo K-means 53
2.7.2 Medidas de Distância 56
2.7.3 Número Ótimo de *Clusters* 57
2.7.3.1 *Elbow Method* 58
2.7.3.2 *Silhouette Method* 58
2.7.3.3 *Gap Statistic Method* 59
2.7.4 Análise de Componentes Principais 60
2.8 Validação de *Clusters* 64
2.8.1 Índice Dunn 64
2.8.2 Conectividade 65

3 – Metodologia **66**
3.1 Delineamento da pesquisa 66
3.2 Coleta e tratamento de dados 67
3.2.1 Banco de Dados I 67
3.2.2 Banco de Dados II 72
3.3 Análise de Agrupamentos 76
3.3.1 Roteiro para simulação do tipo I 77
3.3.2 Roteiro para simulação do tipo II 77
3.3.3 Validação de *Clusters* 78
3.4 Formulações de Otimização 79
3.4.1 **Formulação I** 79
3.4.2 **Formulação II** 80

4 – Análise e Discussão dos Resultados **82**
4.1 Agrupamento 82
4.1.1 Resultados do Banco de Dados I 82
4.1.1.1 Simulação I 82
4.1.1.2 Simulação II (com Tratamento de Dados) 85
4.1.2 Resultados do Banco de Dados II 93
4.1.2.1 simulação I 93
4.1.2.2 Simulação II (dados tratados) 102
4.2 Otimização 111
4.2.1 Resultados da Formulação I 111
4.2.2 Resultados da Formulação II 114
4.2.2.1 Resultados da Simulação 114

5 – Atividades Desenvolvidas **122**
5.1 Produção Bibliográfica 122
5.2 Trabalhos Técnicos e Inspeções de Campo 124

6 – Considerações Finais **130**
6.1 Trabalhos Futuros 131

Referências **132**

Apêndices **142**

APÊNDICE A – Lista de Danos **143**

APÊNDICE B – Quadro Comparativo de Artigos 148

APÊNDICE C – Algoritmos 149
C.1 Exemplo de Instância da Formulação I 150

APÊNDICE D – Validação de *Clusters* 152
D.1 Análise para dados tratados do banco de dados I 152
D.1.1 Resultados com tratamentos de dados 152
D.2 Análise para dados tratados do banco de dados II 154
D.2.1 Resultados de validação de *clusters* com tratamento de dados 154

APÊNDICE E – Otimização 158
E.1 Resultados de seleção de pontes 158

Anexos 159

ANEXO A – Fluxograma de Gereciamento de OAE 160

B – Programa de Treinamento para Inspetores 161

C – Gráficos e Informações Descritivas do Banco de Dados I 162
C.1 Banco de Dados I 162

D – Gráficos e Informações Descritivas do Banco de Dados II 171

1 Introdução

O sistema ferroviário nacional conta com uma malha de aproximadamente 29.000 quilômetros de extensão[1], integrando diversos estados em todas as regiões brasileiras, embora esteja mais concentrado nas regiões Sudeste, Sul e parte do Centro-Oeste (ANTF, 2022). Historicamente as construções das principais ferrovias nacionais foram associadas a investimentos mistos de capital privado, nacional e/ou de países estrangeiros com a intenção primária de escoamento de produção agrícola e em casos mais específicos ao transporte público de passageiros (ABIFER, 2022). Após ser incluída no Programa Nacional de Desestatização (PND) por meio do Decreto nº 473/1992, a Rede Ferroviária Federal S/A (RFFSA), empresa estatal responsável pelas ferrovias brasileiras, foi liquidada no período de 1992 a 1998, sendo oficialmente extinta no ano 2007. Segundo Pereira (2014), apenas cinco operadores são responsáveis por 90% da carga transportada e o Grupo Vale responde por 60% desse total por meio das ferrovias EFVM (Estrada de Ferro Vitória-Minas), EFC (Estrada de Ferro Carajás), FCA (Ferrovia Centro-Atlântica) e parte em operação da Ferrovia Norte Sul. O mapa da Figura 1 representa a distribuição geográfica da malha nacional.

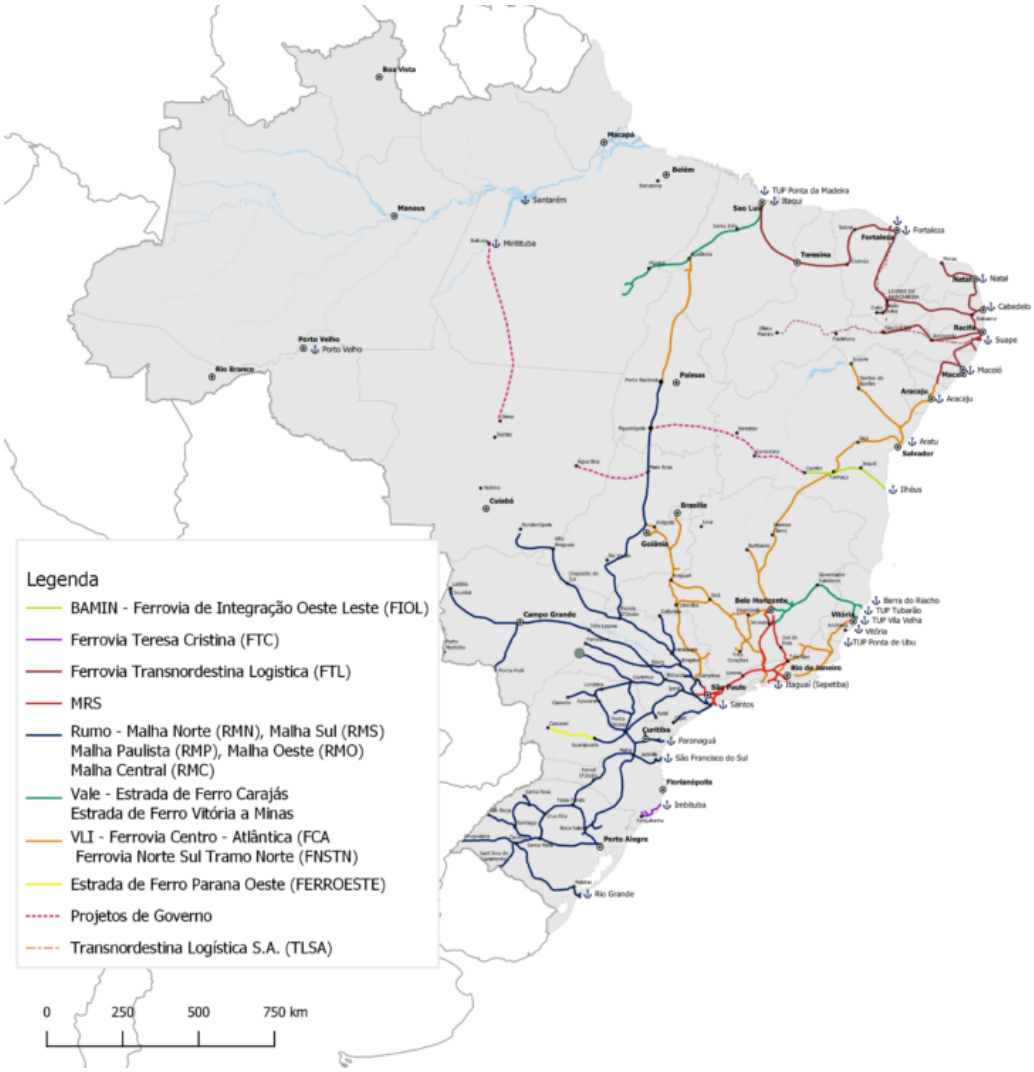
Atualmente, após os processos de privatização ocorridos em meados da década de 1990 e a concessão em quase totalidade dos ativos ferroviários nacionais a empresas privadas, os operadores responsáveis pelos trechos ferroviários ativos realizam praticamente transporte de cargas como minério de ferro, calcário siderúrgico, soja, cimento, derivados do petróleo, adubos entre outros. Portanto, o modal ferroviário brasileiro é atualmente o sistema de infraestrutura que permite o escoamento de produção de grandes companhias e/ou regiões e está condicionado quase exclusivamente ao tipo de atividade primária que compõe grande parcela do produto interno bruto nacional. Sua importância é tal que em Lei nº 12.379, sancionada em 06 de janeiro de 2011, o governo brasileiro previu investimentos da ordem de 90 bilhões de reais em aproximadamente 10.000 quilômetros, visando articular e modernizar o sistema ferroviário nacional com acessos a portos e promovendo ligações com sistemas ferroviários de países vizinhos.

Segundo dos Santos (2005), a matriz logística brasileira contava com a participação ferroviária de 20% no período anterior à privatização da RFFSA e que após a concessão, considerando o modelo adotado, houve aumento para 25%; considerado modesto dado as condições macroeconômicas do período. A meta prevista pelo Plano Nacional de Logística e Transporte (PNLT) é de que no ano de 2025 a participação ferroviária será de 32%, equilibrando o modal ferroviário aos dois demais modais principais; rodoviário e hidroviário.

O gerenciamento da infraestrutura do sistema ferroviário nacional é complexo e apresenta dificuldades de ordem estrutural devido à extensão da malha ferroviária e às

[1] Dado obtido de www.antf.org.br, acesso em 17 de maio de 2022.

Figura 1 – Mapa Ferroviário do Brasil.(ANTF, 2022)



características topográficas das regiões do traçado resultam em uma necessidade de manutenção que operacionalmente não condiz à realidade financeira e estratégica dos operadores concessionados, resultanto em um notório e indesejado *backlog*. Índice que representa a demanda necessária de capacidade produtiva (tempo, mão de obra, recursos, etc) para se sanar todas as necessidades identificadas de recuperação de ativos com disponibilidade plena de capacidade de manutenção nas ferrovias nacionais. Nesse contexto, a infraestrutura ferroviária, composta pelos taludes/contenções, sistemas de drenagem superficial, OAC (obra de arte corrente), OAE (obra de arte especial) e túneis, é responsável por considerável parcela do aporte financeiro de investimentos destinados à manutenção (VIANA, 2002).

A engenharia de pontes é um campo da engenharia estrutural que representa o nível de intelectualidade de uma sociedade por meio da materialização de projetos destinados a estabelecer o tráfego de cargas e pessoas sobre obstáculos diversos. Esse importante ramo da atividade humana demanda conhecimentos dos materiais, sistemas estruturais, geotecnia, gerenciamento, recuperação, reforço e manutenção por parte dos responsáveis técnicos. Sobretudo, essa área é dotada de grande responsabilidade pela segurança das pontes e, por

isso, há o esforço em se promover um nível de integridade que elimine os acidentes com perdas incalculáveis como detalhado em estudos de vários lugares do mundo (Prisco et al., 2019; Ayub, 2019).

Pela definição de termos da ABNT (2023b), OAE é "*estrutura classificada como ponte, pontilhão, viaduto ou passarela*". Sendo especificado, *ibidem*, que ponte é "*estrutura destinada à transposição de obstáculo à continuidade do leito normal de uma via, e cujo obstáculo deve ser constituído por canal aquífero, como rio, mar, lago, córrego e outros*". Classificando que os demais obstáculos (grotas, vales, rodovias, ferrovias e contorno de encostas) são transpostos por viadutos e que a ambas naturezas de estruturas denomina-se pontilhão em vãos menores ou iguais a 6 metros (PIPINATO, 2016)(LIN; Teruhiko, 2017). O termo *especial* indica que os projetos desses ativos são dotados de característica bastante específicas e, normalmente, não possibilitam sua reutilização em situação relativamente semelhantes. Não sendo, portanto, essas obras de uso *corrente* ao longo das ferrovias pelo nível de complexidade estrutural que apresentam. Alguns autores, como Rosa e Ribeiro (2016), indicam que alguns elementos normalmente classificados como obras de arte corrente podem ser tratados como OAE em virtude de suas dimensões . O mesmo autor, *ibidem*, define que OAC são:

> ... estruturas, tais como as obras de drenagem, que se repetem com características semelhantes ao longo de uma estrada, em geral obedecendo a um projeto padronizado. Usualmente, todas as obras de drenagem são definidas como obras de arte correntes, à exceção dos bueiros de grota. Os bueiros de grota ou talvegue, quando possuem dimensões muito grandes, podem ser considerados obras de arte especiais. (ROSA; RIBEIRO, 2016, p. 27)

Neste trabalho os termos citados serão simplificados com sinônimos para pontes, OAE ou ativos para denotar o objeto de estudo que é o conjunto heterogêneo de pontes ferroviárias anteriormente descrito no sistema modal ferroviário.

Na realidade da gestão de ativos ferroviários a tratativa de planejamento e execução de manutenções de pontes representa um desafio aos profissionais da área técnica. Demandando esforços e recursos para monitoramento e identificação do estado de conservação e nível de desempenho das estruturas. Diversas tratativas têm sido aplicadas a fim de se estabecer melhores metodologias de classificação e priorização das ações de classificação, conservação e reparo das OAE (SANTOS et al., 2022b; BONATTE et al., 2022; JUNQUEIRA et al., 2019).

Sistemas de gerenciamento de pontes são desenvolvidos por diversos órgãos estatais e empresas concessionárias adotando estratégias distintas e adaptadas aos contextos específicos de cada realidade (SILVA et al., 2021). Nesses sistemas há a necessidade de se implementar funcionalidades que otimizem os ciclos de inspeções técnicas a serem realizadas e possibilitem estratégias de manutenção mais adequadas às realidades distintas . As inspeções representam, portanto, atividade de mais elevada importância pois fornecem um conjunto de informações que abastecem os sistemas de gerenciamento para tomadas de decisão. Além de serem o contato real, *in loco*, do corpo técnico com as estruturas.

De forma geral, a importância financeira disponível para as atividades de manutenção e inspeção são limitadas e inferiores ao montantes que possibilitariam a performance estrutural do conjunto de pontes de forma plena. Portanto, existe a necessidade de se estabelecer de forma mais precisa os ativos que serão inspecionados ou reparados em certo período de

planejamento. Atendendo às limitações financeiras, logísticas estratégicas e humanas da gestão de pontes.

A concepção de novas perspectivas sobre os modelos preditivos de deterioração das estruturas pode possibilitar o desenvolvimento de ferramentas mais adaptadas à realidade das ferrovias brasileiras. Propõe-se neste trabalho o uso de técnicas que auxiliem na seleção do conjunto de pontes a serem inspecionadas, como agrupamento de dados, levando em conta eventos de ruptura. Parte-se de hipóteses fundamentais sobre as características e comportamentos típicos dos conjuntos de pontes ferroviárias. Além de formulações que visam otimizar a seleção de ativos com base nos limites de recursos financeiros e priorizações customizadas a cada realidade.

1.1 Justificativa

As pontes ferroviárias são elementos de vital importância no funcionamento e integridade das vias férreas. Em geral, não permitem ou possuem rotas alternativas em caso de colapso estrutural. Estão sujeitas às ações do intemperismo e a eventos esporádicos e distintos que podem impactar nos níveis de desempenho e na confiabilidade desses ativos. Portanto, além do desgaste típico e esperado pelo uso ao qual a estrutura foi dimensionada (*e.g.* fadiga), as pontes ferroviárias podem apresentar danos causados por ações associadas ao ambiente nos quais foram construídas. Devido à extensão geográfica a intensidade e a natureza da agressividade ambiental podem variar bruscamente ao longo da malha ferroviária. Ou seja, pontes com características constitutivas e tipologias semelhantes podem apresentar durabilidade e vida útil diferentes, mesmo estando sob condições de solicitação mecânicas equivalentes. Em especial, pode-se citar regiões litorâneas onde o efeito da salinidade acentua a deterioração dos componentes metálicos e os ambientes urbanos, nos quais as ações antrópicas podem acelerar a deterioração de elementos estruturais ou mesmo danificá-los.

De maneira geral, o diagnóstico do estado de conservação é realizado por meio de inspeções técnicas de caráter visual-sensitivo. Como será descrito na Subseção 2.4.1, as inspeções que são realizadas por meio da investigação direta *in loco* e sem a utilização de equipamentos de medição ou monitoramento são as mais comumente realizadas. Ocasionando em conclusões a respeito do estado de conservação baseadas naquilo que o inspetor consegue enxergar e na sua experiência profissional. A partir disso são feitas classificações com base em valores específicos que quantificam por meio de escalas numéricas o grau de conservação – ou degradação - da estrutura (ASCE, 2021). As inspeções técnicas permitem a observação específica de propriedades e características das pontes ferroviárias e a classificação parcialmente subjetiva da condição estrutural por meio do cadastro de anomalias.

Disso surge, talvez, uma das maiores dificuldades da aquisição e tratamento dos dados ao se atribuir de forma particular o estado de conservação. Naturalmente, para casos mais explícitos de condições de conservação – estruturas muito conservadas (novas) e estruturas muito degradadas - a repetibilidade das classificações se torna mais aderente e permite maior assertividade no processo de tomada de decisão em relação ao tipo de intervenção, caso seja necessária. No entanto, espera-se que em um dado conjunto de pontes ferroviárias com idades mais avançadas haja um maior percentual de estruturas que necessitem de classificações intermediárias ou críticas de manutenção preventiva e, nos casos mais graves, de intervenções corretivas de reparo ou reforço. Dessa forma, reforça-se a justificativa deste estudo pelas seguintes constatações (ROZEMBERG, 2019):

- ✓ Em virtude da diminuição do desempenho, é previsível a necessidade de reparar um número crescente de OAE;

- ✓ As ocorrências tendem a ser observadas em intervalos de tempo decrescentes;
- ✓ Necessidade de se prolongar a vida útil por meio de intervenções;
- ✓ Limitação de recursos para atender a plena manutenção e inspeção das OAE;
- ✓ Necessidade de se desenvolver ferramentas preditivas de maior acurácia;
- ✓ Planejamento constante e inadiável para evitar colapso e/ou interrupção da infraestrutura ferroviária.

1.2 Objetivos

A presente tese tem como objetivo contribuir com o estado da arte dos sistemas de gerenciamento de ativos ferroviários aplicando ferramentas de otimização e agrupamento de dados, a fim de se obter melhores asserções na tomada de decisão sobre o conjunto de pontes ferroviárias a serem selecionadas para ciclos de inspeções ou intervenções de manutenção por período.

1.2.1 Objetivos Específicos

- ✓ Realizar tratamento e estudo dos bancos de dados de pontes ferroviárias e identificar os campos equivalentes aos de cadastro da NBR 9452;
- ✓ Aplicar formulações de otimização linear inteira para seleção de ativos considerando fatores como índices de prioridade, condição (IC) e custos individuais de inspeção;
- ✓ Realizar análise de agrupamento de dados (*clustering*) identificando os grupos de pontes similares nos bancos de dados disponíveis utilizando campos equivalentes aos da NBR 9452;
- ✓ Avaliar a funcionalidade da ferramenta de agrupamento em conjunto das formulações de otimização.

1.3 Motivação

O governo brasileiro, por meio da emenda provisória 1.065/2021, criou o Marco Legal das ferrovias com o intuito de incentivar os investimentos privados no setor ferroviário nacional. A medida reduz a burocracia para a construção de novos trechos de ferrovias, permite o aproveitamento de trechos ociosos e na prestação do serviço de transporte ferroviário. A medida provisória ainda conta com a permissão de construção de novas ferrovias por autorização, Figura 2, assim como em outros setores estratégicos de infraestrutura, *e.g.*, de telecomunicações, portuários, aeroportuários e de energia elétrica. Ainda no ano de sua assinatura o horizonte de investimentos previa a construção de 3,5 mil quilômetros à malha

ferroviária em diversos estados brasileiros[2] (BRASIL, 2021).

Figura 2 – Mapa de novas ferrovias. (BRASIL, 2021)



Os responsáveis técnicos pelo gerenciamento do conjunto de ativos e pela tomada de decisão em relação ao planejamento de manutenção devem considerar aspectos de deterioração das pontes, carregamentos correntes, dados de inspeção, condições de contexto histórico-social e limitações orçamentárias para o período planejado. Em muitos casos os dados cadastrados são escassos ou pobres e, por isso, pouco ou nada auxiliam no julgamento dos ativos que devem ser priorizados. Causando assim um quadro de risco sistêmico pela baixa acurácia da definições de manutenção em suas diversas naturezas, seja preventiva ou corretiva (BITTENCOURT et al., 2021).

A necessidade perene de se desenvolver o modal ferroviário brasileiro e as recentes expansões da malha férrea no território nacional indicam a crescente importância do gerenciamento e manutenção dos ativos de infraestrutura. O estado de conservação de estruturas pode ser entendido como o conjunto complementar do seu nível de deterioração e, portanto, o entendimento de quão mais assertiva pode ser o tratamento dessa gestão se apresenta como quadro bastante desafiador. Isso, associado à experiência do autor em atividades de inspeção de pontes ferroviárias, classificação de ativos, planejamento de execução de inspeções/intervenções são os pilares motivadores deste trabalho.

[2] Dados obtidos de agenciabrasil.ebc.com.br, acesso em 16 de maio de 2022.

1.4 Organização do trabalho

O Capítulo 2 trata da fundamentação teórica relacionada ao tema. Os tópicos selecionados são relacionados a modelos de deterioração de pontes, anomalias em pontes ferroviárias, os tipos de inspeção, métricas de classificação e sistemas de gerenciamento de pontes. Também as ferramentas análise de agrupamento (clusterização) e otimização propostas no escopo deste trabalho .

O Capítulo 3 descreve a metodologia utilizada para coleta e tratamento de dados, roteiros de simulações e formulações matemáticas inicialmente desenvolvidas e implementadas.

O Capítulo 4 trata da análise e discussão dos resultados.

O Capítulo 5 detalha as atividades desenvolvidas durante o período de doutoramento até a defesa da tese. Cita os trabalhos de produção bibliográfica (artigos e relatórios técnicos) nos quais o autor desenvolveu e/ou colaborou. Contém também as descrições das atividades de campo realizadas.

O Capítulo 6 contém as considerações finais e as propostas de trabalhos futuros a partir do estado de desenvolvimento da pesquisa. As referências bibliográficas do trabalho, os anexos com materiais complementares e apêndices desenvolvidos são apresentados na sequência.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Referencial Teórico

Antes de tratar propriamente do conteúdo diretamente relacionado ao escopo deste trabalho é de bom princípio estabelecer os tópicos pesquisados e também o histórico dos temas mais afins. Nesse sentido, parte-se das definições usuais dos modelos de deterioração de pontes tratando de conceitos como desempenho, tempos de manutenção e os métodos mais utilizados para predição. Em seguida, os conceitos de segurança e confiabilidade de estruturas com a definição do índice de confiabilidade β e os métodos probabilísticos para análises da confiabilidade.

Adiante, define-se o conceito de anomalias em OAE ferroviárias e os tipos mais comumente identificadas, considerando-se os materiais e elementos estruturais para os quais podem ser mais danosas. Apresenta-se o conteúdo sobre inspeções técnicas - considerado de elevada importância no contexto deste trabalho - e o objetivo dessa atividade, os tipos de inspeção definidos pela NBR 9452, a importância e o nível de qualificação do inspetor técnico e o levantamento/identificação de anomalias.

Em tópico seguinte, com o intuito de se incentivar o entendimento sistêmico do problema, busca-se identificar a relação do aspecto humano envolvido na atividade laboral de inspeção e sua influência nos resultados de classificação. Sendo este assunto o conteúdo do tópico seguinte nesta revisão, no qual se pretende explanar a escala dos índices de condição (IC) e parâmetros da NBR 9452 que resultam nas definições de periodicidade de inspeções e/ou intervenções.

Em seguida, os sistemas de gerenciamentos de obras de artes especiais (SGO) são estudados em suas definições básicas sobre objetivos e perspectivas no contexto de novas ferramentas tecnológicas. Alinhado a isso, trata-se de forma sucinta do gerenciamento e alocação de recursos no contexto do ciclo de vida útil das pontes.

Adentrando ao tópico da proposta do trabalho, são referenciados os aspectos teóricos do problema de otimização da mochila (*knapsack problem*), pois embasa o modelo de seleção de ativos de interesse nesta tese. Também é revisado o conteúdo de análise de agrupamentos (*clustering*), sua necessidade, conceito central e método utilizado como ferramenta base deste estudo.

2.2 Modelos de Deterioração de Pontes

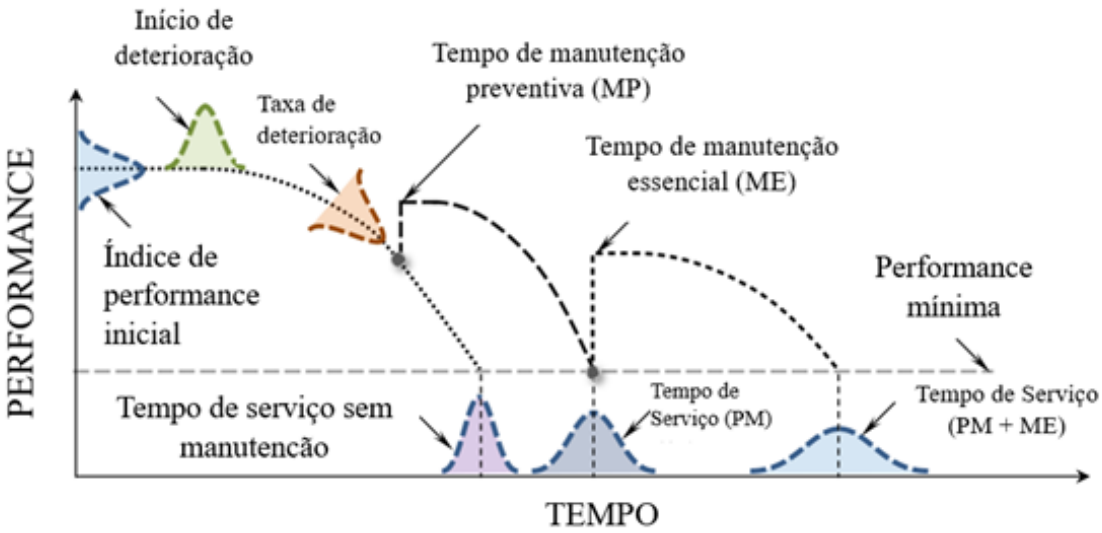
Diversos modelos de deterioração são propostos com o intuito de prever as condições físicas nas quais certo conjunto de ativos deverá se apresentar no futuro (OLIVEIRA et al., 2017). Cabe citar neste ponto que o conteúdo teórico publicado relacionado ao gerenciamento de pontes tangencia ou trata diretamente de buscar responder ao questionamento sobre o estado futuro de deterioração dessas estruturas. Pois, claramente, saber e poder controlar esses estados permitiria estabelecer melhores níveis de segurança estrutural e uma alocação de recursos mais precisa nos planejamentos de inspeções e manutenções (essenciais e preventivas), conforme Figura 3. Em síntese, os modelos de deterioração de pontes são vitais na busca de se obter um quadro de gerenciamento de ativos mais favorável (AFSHIN; MORCOUS, 2011).

Em geral, o estado de conservação de pontes é dotado de constante decaimento de seu nível de integridade por processo espontâneos que se notabilizam por características como localização geográfica, carregamento, manutenção preventiva, materiais, etc. Sob o ponto de vista termodinâmico, pode-se observar que os processos de natureza química de degradação apresentam espontaneidade energética, ou seja, apresentam valores negativos de energia de Gibbs ($\Delta G < 0$).

Do ponto de vista mecânico ocorrem descontinuidades físicas e acúmulo de danos capazes de comprometer as propriedades de resistência dos materiais constituintes após ciclos de carregamento. No caso das pontes, em geral, o regime de trabalho devido aos tráfegos tendem a ser bem menores do que os valores de resistência dos materiais comumente utilizados, como aço e concretos diversos. Os eventos de fratura que ocorrem nas estruturas pelas flutuações de tensões após um número de ciclos são classificados como fadiga. Os valores de tensões com alta amplitude produzem eventos de falha dos materiais com números de ciclos inferiores aos casos de baixas amplitudes, sendo possível ocorrer rupturas com valores de tensões inferiores às resistências dos materiais (Carneiro; Portela; Bittencourt, 2020; Rossato et al., 2021). Em virtude das consequências da degradação há o constante esforço de engenharia por parte dos responsáveis técnicos de se identificar e conter o avanço dos efeitos do desgaste, em grande parte, natural das estruturas como pontes ferroviárias.

Modelos de deterioração podem ter premissas distintas dependendo dos objetivos para os quais foram propostos. Alguns deles têm como foco auxiliar na substituição de bens/ativos cujo desempenho de vida útil indica que deve-se realizar um substituição ou reparo Lee et al. (2014). No caso de pontes os modelos deterioração devem ser adequados ao tempo de vida útil dessas estruturas e, devido a isso, fornecer indicativos do prazo ainda confiável de utilização e dos intervalos de futuras vistorias (FANG; SUN, 2019). Recentes estudos como de Matos de Santana et al. (2023), Santos et al. (2022b) e Oliveira, Greco e Bittencourt (2019) utilizam cadeias de Markov a fim de determinar os comportamentos de deterioração das estruturas ao longo do tempo. Nessa abordagem ocorre a forte dependência com os valores de classificações oriundos das inspeções de campo na composição da matriz

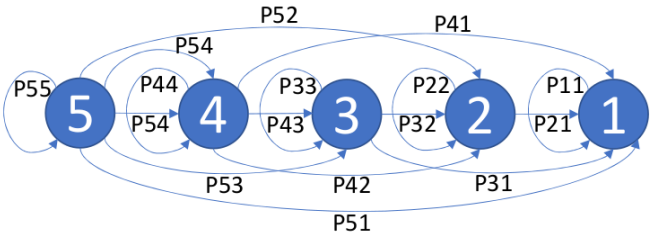
Figura 3 – Comportamento gradual de deterioração de performance estrutural.



Fonte: adaptado de (Frangopol; Sabatino; Dong, 2017)

de transição do sistema. No caso comum para classificação de pontes no Brasil que considera 5 valores para o índice de condição, tem-se o esquema de probabilidade de transição como na Figura 4.

Figura 4 – Probabilidade de transição para um modelo de 5 estados.



$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{55} & P_{54} & P_{53} & P_{52} & P_{51} \\ 0 & P_{44} & P_{43} & P_{42} & P_{41} \\ 0 & 0 & P_{33} & P_{32} & P_{31} \\ 0 & 0 & 0 & P_{22} & P_{21} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{11} \end{bmatrix}$$

Fonte: (SANTOS et al., 2022b)

Processos Markovianos, ou cadeias de Markov, são de natureza estocástica e possuem a características de serem independentes com estados de tempos passados (processos sem memória). A partir disso sua utilização no caso de pontes ou ativos gerais de infraestrutura é indicada por inserir as incertezas e aleatoriedade dos processos de deterioração, acumulando as probabilidades de transição de um estado a outro em intervalos de tempo discretos, conforme Equação (1).

$$P(X_{t+1} = i \mid X_{t+1} = j) = P(i,j) \tag{1}$$

O principal componente do processo Markoviano é a denominada matriz de transição **T** da Equação (2) - também chamada de matriz estocástica ou de probabilidade - que descreve a probabilidade de mudança baseada no histórico de dados a um estado i ao outro avançado de degradação j. Há, portanto, subentendido que o uso desse tipo de processo objetiva representar o decaimento das condições de conservação dado um estado atual de já observado (BOLDRINI et al., 1986)(KOLMAN, 1996).

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots\cdots & p_{1r} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots\cdots & p_{2r} \\ : & : & \cdots\cdots & : \\ : & : & \cdots\cdots & : \\ p_{r1} & p_{r2} & \cdots\cdots & p_{rr} \end{bmatrix} \tag{2}$$

Dessa forma, dada um matriz de transição **T**, então o vetor de estado $p^{(k+1)}$ no (k+1)-ésimo período será determinado a partir de $p^{(k)}$ no k-ésimo período.

$$p^{(k+1)} = \mathbf{T}p^{(k)} \tag{3}$$

A definição da Equação (3) é adotada na abordagem clássica dos processos markovianos que considera intervalos discretos e constantes de tempo entre as iterações. Na aplicação de previsão de deterioração de pontes faz sentido considerar o seguinte paradigma:

- Existe dependência do vetor de estado com os valores definidos nas inspeções técnicas;
- Dada duas pontes com mesma classificação, a que está a mais tempo classificada deve, a rigor, apresentar maior probabilidade de mudança de estado;
- Na prática, é comum que haja diferença nos intervalos de inspeção entre as pontes.

Para contornar tais questões autores como Santos et al. (2022b) adota o processo de tempo contínuo, no qual o intervalo de tempo entre estados possui distribuição exponencial que depende apenas do estado i. Assim, o modelo estima a matriz de intensidade **Q** usando o histórico de dados das inspeções de campo, conforme as equações (4) e (5).

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} -\theta_1 & \theta_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\theta_2 & \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\theta_3 & \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\theta_4 & \theta_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{54} \\ q_{43} \\ q_{32} \\ q_{21} \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$q_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum \Delta t_i} \tag{5}$$

Onde q_{ij} representa a taxa de transição entre estados adjacentes, n_{ij} é o número de elementos que mudaram do estado i para j e $\sum \Delta t_i$ a soma dos intervalos de tempo entre observações que iniciam no estado i. Nesta formulação a matriz de transição se relacionar com a a matriz de intensidade pela relação diferencial da Equação (6).

$$\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} = \mathbf{PQ} \tag{6}$$

Em estudo com proposta de modelo probabilístico para intervalos otimizados de inspeção de Ilbeigi e Pawar (2020) foi utilizado o banco de dados do NBI (*National Bridges Inventory*) publicado pelo FHWA (*Federal Highway Administration*) com mais de 17.500 pontes. Os autores utilizam um modelo de Markov bi-dimensional no qual consideram o índice de condição da ponte C_t e o número de anos em que a ponte está classificada com tal valor. Dessa forma o vetor de estado é dado como na Equação (7).

$$E(t) = \begin{bmatrix} C_t \\ Y_t \end{bmatrix} \tag{7}$$

Dessa forma os modelos de deterioração mais amplamente utilizados dependem da classificação das estruturas com base em alguma métrica pré-definida de integridade (DROMEY et al., 2020). A despeito das interferências reconhecidas no processo de classificação, como é tratado na Subseção 2.4.3, em termos factíveis, os modelos de deterioração necessitam das entradas de dados (*input*) oriundos das inspeções técnicas e das classificações normativas. Santos et al. (2022b) utiliza, *e.g.*, os dados coletados em inspeções de 10331 pontes nas rodovias obtidos do banco de dados do departamento nacional de infraestrutura e transporte (DNIT) e da agência nacional de transporte terrestre (ANTT) permitiu a categorização e a estratificação desse conjunto de pontes. Na aplicação do modelo de deterioração, *ibid.*, os números de 10331 pontes e 24127 inspeções são reduzidos (filtrados) para 7754 e 12681, respectivamente. Essa queda acentuada nas quantidades de dados é devida aos casos de recuperação dos ativos que, em geral, modifica a classificação do ativo para condição mais favorável ou porque as classificações de campo causam inconsistências nos valores de classificação. Uma compilação dos tipos de modelos de deterioração baseados em índices de condição e suas propriedades pode ser encontrada na tese de doutoramento de Oliveira (2019, p. 24).

2.2.1 Segurança e Confiabilidade de Estruturas

O comportamento de um sistema estrutural possui dependência direta com incertezas de natureza intrínseca, epistêmica e do fator humano (vide 2.4.4) que são frutos da aleatoriedade das variáveis que determinam os valores de resistência e das solicitações, bem como dos modelos utilizados para a sua representação, das limitações de medidas para tratamentos de erros e do conhecimento existente a respeito do comportamento estrutural e de seu estado de conservação e performance. Para uma estrutura submetida a mecanismos de degradação ou a eventos extremos existem ainda as incertezas associadas aos modelos de deterioração e ao efeito das intervenções humanas. Sobretudo, a predição da performance futura envolve incertezas que demandam uma abordagem probabilística (Yang; Frangopol; Teng, 2019).

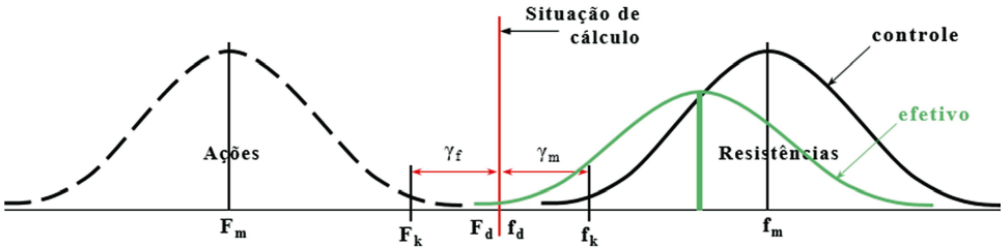
O conceito de confiabilidade pode ser definido como a probabilidade de que um sistema não apresentar falhas, considerando suas asserções de projeto e sua vida útil esperada. No caso de componentes produzidos em série, *e.g.*, componentes da indústria eletrônica, a quantidade de falhas pode ser enumerada pela contagem de itens inoperantes. A partir disso a probabilidade de falha pode ser tratada com a taxa de falhas, e advém de uma interpretação frequentista de probabilidades definida pela Equação (8). Na qual o número de eventos n_a, de certo evento (A), observado em uma quantidade grande de eventos n para os padrões de engenharia. No entanto, em se tratando de confiabilidade estrutural algumas considerações devem ser feitas em relação à produção de larga escala a interpretação frequentista é inadequada para descrever a probabilidade de falha. A percepção de que tal abordagem não possui aderência à realidade das estruturas é bastante explícita ao se considerar que o conceito de falha, ou colapso, para estruturas como pontes não deve ser, em sentido estrito, um evento factível de ser observado. Assim, aplica-se a abordagem bayesiana, que se caracteriza pelo grau de confiança na performance da estrutura (BECK, 2019)(do Carmo Jacinto, 2011).

$$P(A) = \lim_{n \longrightarrow \infty} \frac{n_a}{n} \tag{8}$$

Pela abordagem Bayesiana a probabilidade de um acontecimento deve ser tomada como uma medida de escala entre 0 e 1 da confiança (ou grau de certeza) que se espera sobre a ocorrência de certo evento, sendo esse recorrente ou não. Assim, a probabilidade é sempre condicional e tem seu *status* alterado com a disponibilidade de possíveis novas informações sobre o evento, gerando assim uma interpretação subjetiva ou personalista (do Carmo Jacinto, 2011)(Paulino et al., 2018). A composição dos modelos físicos para representação de estruturas reais é baseada em parâmetros que objetivam descrever propriedades como resistência e o conjunto de solicitações possíveis e que são observadas e descritas por distribuições de probabilidades, conforme figura 5. Como dito, as estatísticas utilizadas para

descrever as variáveis de modelos são concebidas sob a ótica da abordagem frequentista.

Figura 5 – Representação simplificada da análise de segurança pelo método probabilista. Modificado de (Couto et al., 2015)



Nesse contexto, o intuito dos estudos de confiabilidade é definir a probabilidade de sujeição aos estados limites de segurança (BECK, 2019), descritos e limitados por equações de estado limite, $g(X)$ da Equação (9), associadas a um modo de falha de determinada estrutura. Nessa abordagem pode-se computar o colapso capacitivo individual dos elementos ou a combinação de falha de um conjunto de elementos podendo gerar um evento colapsivo geral da estrutura.

$$g(X) = g(X_R, X_S) = g(X_1, X_2, X_3 ... X_n) = 0 \tag{9}$$

Onde X_R e X_S são os vetores relativos às variáveis aleatórias de resistência e solicitações, respectivamente. Sendo a confiabilidade a probabilidade tal de S não exceder R, $P(X_S \leq X_R)$. Assim a probabilidade de falha, $p_F(t)$, pode então ser expressa em termos das funções de distribuição das variáveis aleatórias, conforme Equação (10).

$$p_F(t) = \int_0^{\infty} \left(\int_0^{S} f_{R,S}(t) dr \right) \qquad ds \tag{10}$$

A partir disso, define-se o conceito de índice de confiabilidade β a fim de tornar a compreensão do *status* de desempenho das estruturas de forma mais condensada como a razão entre o valor esperado e o desvio padrão das variáveis aleatórias, Equação (11). Em virtude dos baixo valores de probabilidade de falha, o índice de confiabilidade β assume valores da inversa da função cumulativa de probabilidade de falha quando se assume que as distribuições de X_R e X_S são normais, conforme a Equação (12).

$$\beta = \frac{E[g(X)]}{\sqrt{Var[g(X)]}} \tag{11}$$

$$\beta(t) = \Phi^{-1}(1 - p_F(t)) \tag{12}$$

Nesse contexto, alguns métodos podem ser utilizados para a solução ou análise de problemas de confiabilidade estrutural, como os métodos de transformação, que se baseiam na aproximação da equação de estado limite no espaço normal padrão, e os métodos de simulação. Dentre os métodos de transformação, podem ser citados:

- Método de Primeira Ordem e Segundo Momento (*First Order Second Moment Method* – FOSM);
- Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (*First Order Reliability Method* – FORM);
- Método de Confiabilidade de Segunda Ordem (*Second Order Reliability Method* – SORM).

Cujas diferenças são estabelecidas pelo nível de aprofundamento das informações estatísticas utilizadas e, também, pelas aproximações sobre a não-linearidade da equação de estado limite (do Carmo Jacinto, 2011).

Em trabalho sobre os indicadores de danos em superestruturas de pontes Saydam e Frangopol (2011) utilizaram medidas de performance do sistema estrutural como um todo a fim de avaliar de forma conveniente a segurança global da estrutura. O objetivo dessa abordagem é provocar a reflexão baseada em históricos de falhas catastróficas ocasionadas pelo desencadeamento de eventos extremos. No caso das obras de arte especiais, por exemplo, é de interesse a identificação da probabilidade de falha do sistema estrutural, que pode incluir o caso de estruturas formadas por muitos elementos ou por modos de falha distintos, exigindo a computação da probabilidade de falha do sistema. Isso pode ser entendido ao se considerar pontes com sistemas estruturais mais complexos (como treliças de grandes vãos), que são constituídas por um elevado número de elementos e - muitas vezes - sem possuir elementos de redundância ou mesmo terem sido projetadas com a concepção de robustez estrutural. No Brasil, algumas companhias concessionárias de malhas ferroviárias têm implementado, mesmo que de forma ainda incipiente e embrionária, modelos para gerenciamento considerando os aspectos probabilísticos e de confiabilidade. Portanto, uma interpretação da probabilidade de falha do sistema deve ser baseada na identificação dos modos de falha possíveis e das relações de causa/efeito entre a falha de componentes e a probabilidade da propagação de colapso para a falha completa do sistema.

Em termos práticos a análise da confiabilidade de sistemas pode ser encaminhada pelo método cartesiano de conversão do sistema em uma combinação ou particionamento em subsistemas mais simples, com componentes associados em paralelo ou em série, ou ainda em séries de subsistemas formados por componentes em paralelo. A solução do problema

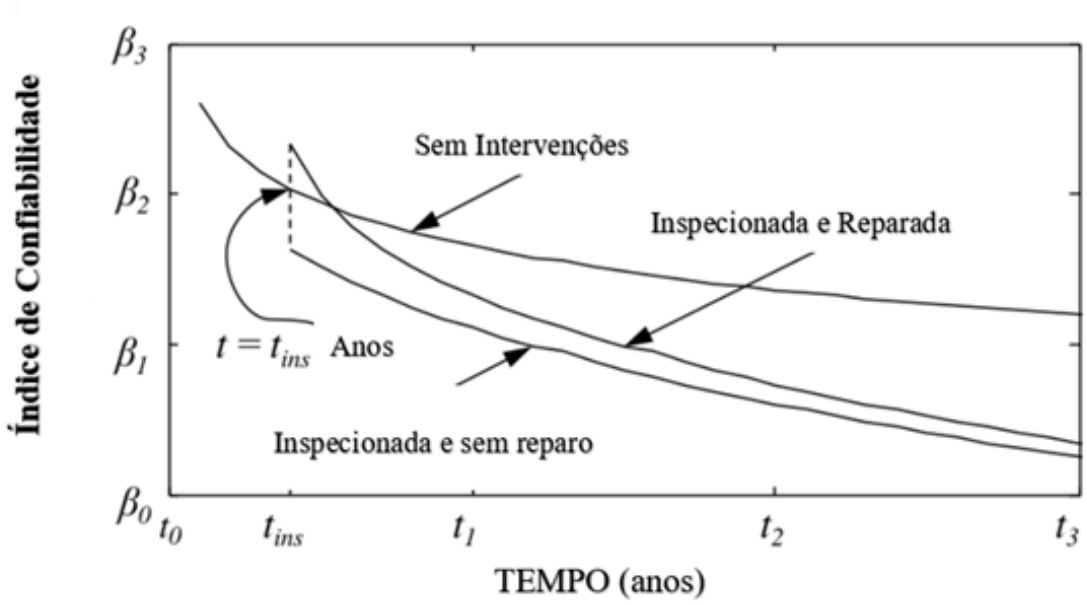
de confiabilidade para os diferentes modos de falha individuais pode ser combinada para a determinação da confiabilidade do sistema (Ghosn; Frangopol, 2016). Naturalmente, a confiabilidade do conjunto de pontes é conformada pela confiabilidade individual de seus componentes e da configuração do fluxo do modal de transporte. Isso é ainda mais acentuado à realidade ferroviária, na qual em sua extensão há quase sempre forte dependência de fluxo em linha singela. Sendo o sistema vulnerável a quaisquer gargalos ou eventos de interrupção pela dificuldade e inoperância de se executar reparos em tempo curto ou desvios que permitam o fluxo de locomotivas e minimizem os efeitos deletérios dessa situação. Em um cenário ideal de gerencimento a confiabilidade da rede de pontes depende da conectividade entre a origem e os nós de destino, permitindo que o fluxo seja perene quando da ocorrência de eventos extremos (Ghosn; Frangopol, 2016).

Sob a ótica do gerenciamento de obras de arte especiais, indicadores baseados em valores de probabilidade de falha têm sido empregados na otimização no ciclo de vida de pontes e de redes de pontes (Yang; Frangopol; Teng, 2019). Em geral, os indicadores são divididos em duas classes principais: uma classe baseada em confiabilidade variante no tempo (*time-variant reliability*) – ou indicadores instantâneos (*point-in-time reliability indicators*). A outra de indicadores baseados na confiabilidade dependente do tempo (*time-dependent reliability indicators*) (Barone; Frangopol, 2014a).

Os indicadores instantâneos podem ser compreendidos como medidas, em geral coletadas em programações anuais, de performance da estrutura para os quais podem-se utilizar técnicas de avaliação de confiabilidade independentes do tempo. Como exemplos de indicadores variantes no tempo cita-se a probabilidade de falha e o risco anuais, redundância, robustez e vulnerabilidade (Saydam; Frangopol, 2011). A Figura 6 apresenta qualitativamente um tipo de atualização no índice de confiabilidade β dada a verificação de anomalia e seu comportamento após reparo o não da condição de confiabilidade. Cabe observar a continuidade de decaimento do valor β quando ocorre a não detecção da fratura, induzindo a um valor superior e indevido de *output* do modelo de confiabilidade. Observa-se também que, para o caso geral, os valores de confiabilidade tendem a ser menores após um reparo. Isso possui certa aderência com a realidade de engenharia, mas nem sempre pode-se deduzir que a confiabilidade global de uma ponte e, principalmente, a confiabilidade de certo elemento apresentará o decaimento previsto. Haja vista algumas técnicas de recuperação que permitem reforçar o elemento para padrões maiores de desempenho e funcionalidade do que sua condição no tempo $t = 0$ de vida útil.

Por outro lado, indicadores baseados na confiabilidade dependente do tempo exigem técnicas especializadas, onde as variáveis que influenciam nos parâmetros de resistência e solicitação podem ser abordadas como processos estocásticos. Em aplicações de otimização do cronograma de inspeções e manutenções, são utilizados na forma das distribuições de probabilidade do tempo até a falha, funções de sobrevivência (*survivor functions*), dispo-

Figura 6 – Atualização do índice β de confiabilidade. (Frangopol; Sabatino; Dong, 2017)



nibilidade (*availability*) e taxa de falhas instantânea (*hazard functions*), no qual se almeja representar a evolução da probabilidade de falha ao longo do tempo de forma analítica (Barone; Frangopol, 2014b) (GHODOOSI et al., 2018).

Para sistemas estruturais expostos ao meio ambiente, caso típico e geral das pontes ferroviárias, devem ser levados em conta os processos de deterioração ou danos locais capazes de reduzir a capacidade resistente. Pois, em conjunto com a ocorrência de eventos extremos - com baixa probabilidade - esses processos podem resultar na perda de componentes estruturais. Nesse sentido, o conceito de confiabilidade estrutural tem sido utilizado para o tratamento de incertezas no âmbito da análise de ciclo de vida de obras de arte especiais, no planejamento de inspeções e manutenções (Ghosn; Frangopol, 2016)(Han; Yang; Frangopol, 2020) (Kim; Ge; Frangopol, 2019).

2.3 Anomalias das OAE Ferroviárias

A NBR 9452 define como anomalia a "*descaracterização de um elemento ou sistema integrante da OAE em relação à sua concepção original*"e, a partir desse conceito, define patologia como o estudo técnico e detalhado das causas ou fatores que desencadeiam determinada anomalia ou certa alteração gerada por esta a qualquer elemento estrutural sob análise. O texto normativo, *ibidem*, define ainda como diagnótico a atividade que identifica e caracteriza certa anomalia. Sendo, pois, a ação geradora do conteúdo de análise patológica em estruturas.

De forma geral, na realidade brasileira, os termos relacionados ao que se define como anomalia e/ou patologia são coerentes ao apresentado na NBR 9452. Sendo, portanto, anomalia um termo referente ao problema em si existente na estrutura e com elevada acuidade. Por conseguinte, o termo patologia refere-se ao entendimento dos mecanismos auxiliares ou causadores do problema estrutural. Seu conteúdo tem alta dependência do nível de conhecimentos e qualificação do responsável técnico que o define. Autores como Bolina, Tutikian e Helene (2019), a título de simplificação, estabelecem analogias dos termos de medicina no estudo das patologias em estruturas de engenharia civil, *e.g.* anamnese. O Quadro 1 contém um resumo adaptado desse tipo de analogia. Contudo, ao longo do texto valer-se-á das definições usuais da NBR 9452 em virtude de sua simplicidade e confinidade ao tema desenvolvido.

Segundo Farrar e Worden (2007) o processo de implementação de identificação de danos na engenharia civil, aeroespacial e mecânica é definido como *Structural Health Monitoring* (SHM). Nessa abordagem, dano é definido como uma alteração das propriedades materiais ou geométricas dos sistemas estruturais, seja nas condições limites ou na interface com outros sistemas, que comprometa a performance sob os aspectos funcionais, estruturais ou de durabilidade. A estratégia do SHM consiste na atuação de alguns componentes como processamento e análise de dados, monitoramento, avaliação de anomalias e tomada de decisão. O conceito possui um grande potencial de oferecer benefícios econômicos e de segurança consideráveis ao longo da vida útil de estruturas. No entanto, sua aplicação ainda é embrionária na realidade de engenharia civil e necessita de enormes avanços que requerem a mudanças em vários campos em virtude de seu caráter multidisciplinar (Chen; Ni, 2018). O uso de sistemas de monitoramento *fulltime* com recursos de *software e hardware* e equipamentos de medição/sensores em ambientes operacionais permite conhecer a resposta estrutural sob a demanda real e o uso de modelos para avaliação e predição do desempenho atual e futuro dos ativos. Assim, a estratégia de SHM pode ser estratificada em 5 níveis:

I - Detecção de danos por meio de inspeção qualitativa dos danos possíveis e/ou presentes;
II - Localização do dano por meio de sua localização provável;
III - Classificação do tipo de dano;

Quadro 1 – Exemplos de termos gerais do estudo de patologias das construções

Termo	**Definição**	**Patologia das Construções**	**Patologia Médica**
Manifestação Patológica	São os problemas visíveis ou observáveis, indicativos de falhas do comportamento normal	Fissuras, trincas, manchamentos, deformações, mofo.	Dor de cabeça, enjoo, tontura.
Diagnóstico	É a explicitação e o esclarecimento das origens, mecanismo, sintomas e agentes causadores do fenômeno ou problema patológico.	Corrosão, eflorescência, recalque.	Câncer, depressão.
Anamnese	É o estudo dos antecedentes; nessa etapa, deve-se escutar dos usuários e pacientes o que estão sentindo.	Conversa com usuários, análise de projeto, verificação das estruturas adjacentes.	Análise de histórico do paciente e dos familiares, verificação de exames anteriores.
Inspeção	É o *check-up*, quando o patólogo ou médico avalia o seu paciente, aprovando a condição ou solicitando novos exames ou ensaios.	Avaliar a estrutura regularmente ou quando houver um fato extraordinário de interesse.	Avaliar a pessoa para saber a condição atual de saúde.

Fonte: Adaptado de Bolina, Tutikian e Helene (2019)

IV - Avaliação da extensão e potencial do dano;

V - Prognóstico com asserções sobre a segurança estrutural e estimativa de vida útil.

Observa-se que há uma estrutura hierárquica nos níveis citados, *i.e*, para a compreensão de um certo nível as informações dos níveis subjacentes são imprescindíveis. A partir disso, maior será o conhecimento do estado da estrutura no que se refere ao seu desempenho ou performance e a predição de seu comportamento futuro. Nos níveis mais elevados a estimativa das ações de carregamento associada a algum modelo de deterioração são necessárias para um completo prognóstico.

O danos, ou anomalias, observadas em pontes ferroviárias são de conhecimento geral nas estruturas por serem, a princípio, tipicamente associados ao tipo de material constituinte, à tipologia estrutural ou às condições ambientais nas quais a estrutura está inserida. A Figura 7 apresenta alguns exemplos típicos de anomalias em estruturas de concreto. Sendo, em geral, anomalias mais facilmente identificadas em virtude da robustez das estruturas de concreto e relativa facilidade de identificação visual.

Figura 7 – Exemplos de anomalias em estruturas de concreto



a) Drenagem obstruída



b) Guarda corpo fraturado



c) Armadura exposta



d) Corrosão de armadura exposta



e) Umidade em região de apoio



f) Falha em sistema de drenagem do tabuleiro

As estruturas metálicas em mistas são bastante presentes em ferrovias e rodovias (citar ademir, artigo com pontes americana) e contêm anomalias do dois principais tipos de materiais constituintes de pontes (concreto e aço). A Figura 8 apresenta alguns exemplos de elementos metálicos corroídos em distintas situações e rupturas de ligações.

Figura 8 – Exemplos de anomalias em estruturas metálicas e mistas



a) Corrosão em elementos metálicos



b) Corrosão e umidade



c) Corrosão e umidade



d) Eflorescência em laje fissurada



e) Corrosão em conectores



d) Ruptura de ligação

Outras anomalias podem ser observadas em componentes de caráter funcional, de superestrutura ferroviária, aparelhos de apoio ou em estruturas antigas. Especialmente encontros constituídos de alvenaria de pedras que são remanescentes de uma tecnologia não mais utilizada e ainda bastante comuns nas ferrovias brasileiras, Figura 9.

Figura 9 – Exemplos de anomalias gerais e funcionais



a) Dormentes faltantes



b) Ausência de contratrilhos



c) Aparelho de apoio esmagado



d) Fratura em encontro de pedra



e) Sujeira na região de apoio



d) Fratura em alvenaria de pedra

O Apêndice A conta com uma compilação de anomalias estratificada por material e componentes das pontes baseada no conteúdo da NBR 9452 e na experiência dos levantamentos de campo. Nota-se nessa seleção básica que para elementos de concreto, aço e alvenaria de pedra há mais de setenta anomalias passíveis de serem observadas. Para os casos mais comuns de tipos de aparelhos de apoio encontra-se número em mesma ordem de grandeza.

2.4 Inspeções Técnicas em OAE Ferroviárias

Em virtude de ser o método pelo qual os engenheiros e gestores obtêm informações quanto à condição das OAE, a atividade de inspeção é a principal ferramenta entre todas as demais contidas no conceito de gerenciamento de pontes (RYALL, 2010). Essas atividades têm o objetivo de avaliar as condições físicas e funcionais das pontes a fim de auxiliar por meio de informações coletadas em campo o efetivo gerenciamento desses ativos. De acordo com a AASHTO (2013), um processo bem-sucedido de inspeção depende de planejamento, técnica, experiência e confiabilidade dos agentes envolvidos.

A aderência ao estado real das pontes aliada a precisão e a fidelidade dos dados coletados em inspeções determina diretamente as análises posteriores, inclusive nos processos de modelagem de deterioração e de tomada de decisão. Portanto, o papel da atividade de inspeção é fundamental no gerenciamento e manutenção de pontes. Pois o produto de sua prática está atrelado fatores como segurança, custos, planejamento e operação ferroviária.

De forma geral, os países definem suas próprias diretrizes que norteiam esse processo, caracterizando os tipos de inspeção empregados, a periodicidade das atividades, os procedimentos de registro dos ativos e o treinamento dos profissionais que atuam na área. As inspeções de pontes no contexto nacional possuem como principais referências os textos normativos elaborados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), pela Agência de Transporte dos Estado de São Paulo (ARTESP) e pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) por meio da NBR 9452 com a mais recente revisão no ano de 2019 e participação do autor deste trabalho junto ao grupo de estudo de colaboradores de diversas empresas concessionárias, servidores de órgãos públicos, instituições de ensino superior, profissionais de reconhecido saber e membros da ABECE (Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural). Neste trabalho serão seguidas as diretrizes normativas da NBR 9452 que definem e detalham os tipos de inspeções a serem realizadas nos ativos, assim como os parâmetros de classificação.

2.4.1 Tipos de Inspeção

A leitura, ou diagnóstico, do estado de conservação das estruturas pode ser realizada em níveis de detalhamento determinados pelas necessidades ou características do ativo. Por isso, e também por fatores como limitações financeiras, as inspeções se dividem quatro tipos básicos segundo a NBR 9452: cadastral, rotineira, especial e extraordinária. Inspeções cadastrais são realizadas, em geral, no período de término de construção de uma ponte e seus dados são cadastrados em um inventário, ou ainda quando ocorrer mudanças nas configurações de sua estrutura. Esse tipo de inspeção prioriza a coleta de dados gerais, memoriais descritivos da obra, projetos completos e informes da construção, além de relatório fotográfico. O Anexo A da NBR 9452 contém a ficha de cadastramento com subdivisão por dados de cadastro, características da estrutura e funcionais, registro de anomalias,

classificação da OAE, croquís e levantamento topográfico. Essa ficha contém um total de 91 campos a serem preenchidos e é particionada em três principais conjuntos de dados que contemplam o registro básico de uma ponte, Figura 10. Importante ressaltar que na realidade das concessionárias brasileiras, em virtude de mudanças de operadores responsáveis pelos trechos ferroviários, não raramente é necessária a execução de recadastramento do conjunto de pontes por perda de banco de dados.

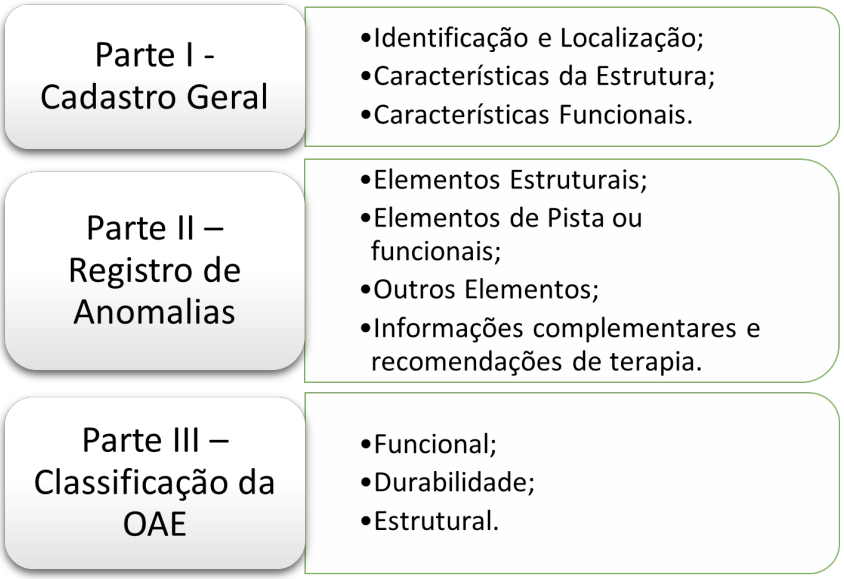


Figura 10 – Composição dos dados básicos do Anexo A da NBR 9452

Para representação visual a norma estabelece o registro dos croquis da planta do tabuleiro, dos cortes longitudinal e transversal e, quando necessário, de detalhes adicionais. Assim como o registro de pelo menos 8 fotografias que possibilitem de forma clara o entendimento dos aspectos gerais da estrutura. No entanto, neste estudo trataremos os registros fotográficos. Pois seu uso, no atual estado da arte, ainda não é tão relevante nos modelos computacionais preditivos baseados em algoritmos de agrupamentos. Embora o uso de imagens nas tecnologias de *digital twins* se apresenta como alternativa bastante interessante no futuro das inspeções (Ellis, 2024) e já se aplica, mesmo no Brasil, ferramentas como drones para geração de modelos tridimensionais e inspeções em regiões de difícil acesso e/ou espaços confinados (ZAKARIA; KARAASLAN; CATBAS, 2022) (Futai et al., 2022).

As diferentes naturezas das três partes sugeridas para cadastro de dados devem ser analisadas a fim de se compreender o estado de um conjunto de pontes e seu gerenciamento por meio dos dados. Em primeiro lugar, os dados gerais de cadastro são de maior facilidade de aquisição, têm baixa tendência à modificações e alta impessoalidade. Em geral, são obtidos por meio de medidas e observações diretas das tipologias, da geometria e materiais constituintes dos elementos. Além de – em muitos casos – possuírem informações oriundas de projetos e *as built* das obras. Para os dados relativos aos registros de anomalias tem-se um conjunto com maior dificuldade de levantamento em campo (em alguns casos demandam equipamentos

para acesso e identificação), têm elevada tendência à modificação e dependência da expertise e formação do inspetor. Reside nesses dados um grau gerador de incerteza em virtude de comporem um elo entre o conhecimento da estrutura por meio do cadastro geral e, a partir deles, orientação para a classificação do índice de condição.

Por fim, os dados de classificação (índices de condição) são conclusivos dos levantamentos anteriores e, por isso, sempre alistados nas inspeções, tendem à modificação pela perda de desempenho da estrutura e dependem significativamente da pessoalidade/impressão qualitativa dos inspetores. Assim sendo, pode-se estabelecer ao menos três características que são qualitativamente distintas para os diferentes tipos de dados. O nível de dificuldade de obtenção, o grau de aderência ao estado real e a estabilidade dos registros ao longo do tempo. Portanto, sob essa perspectiva são os dados de cadastro que tendem a apresentar maior integridade, Figura 11.

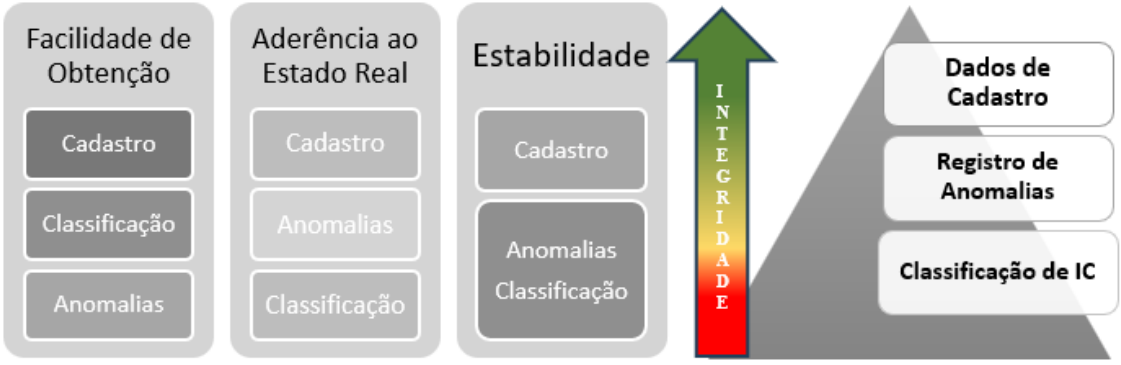


Figura 11 – Comparativo entre as diferentes naturezas dos dados obtidos por meio de inspeções técnicas.

As inspeções rotineiras são as mais realizadas e normalmente compõem o planejamento em intervalos ou ciclos anuais e bienais. Embora tenha sido estabelecido pela NBR 9452/2019 que inspeções rotineiras devem ter seu ciclo de realização baseado nas condições das pontes, sem no entanto ultrapassar o intervalo de dois anos, conforme Figura 12. O cenário da periodicidade de inspeções definido pela norma passou por notável alteração de concepção na versão atualizada do ano de 2023. Contudo, a natureza desse tipo de inspeção permanece e objetiva acompanhar o desenvolvimento das patologias verificadas em análise anteriores, assim como o surgimento de novas anomalias. São as inspeções com coleta de dados mais superficiais, em que são realizadas avaliações visuais-sensitivas, resultando em um registro fotográfico e uma ficha de inspeção rotineira, conforme Anexo B1 *ibidem*. No caso mais geral, utiliza-se equipamentos simples e de menores custos possíveis, excetuando-se os casos em que são estritamente necessários (AASHTO, 2013)(DNIT, 2004).

Figura 12 – Periodicidade de Inspeções. Fonte:(ABNT, 2023a)

Tipo de inspeção	Condição da OAE / períodos de inspeção				
	Excelente	**Boa**	**Regular**	**Ruim**	**Crítica**
Inspeção cadastral	Imediato	Imediato	Imediato	Imediato	Imediato
Inspeção rotineira	Não superior a 2 anos	Não superior a 2 anos	Não superior a 1 ano	Não superior a 1 ano	Não superior a 1 ano
Inspeção especial	Não superior a 10 anos	Não superior a 10 anos	Não superior a 5 anos	Não superior a 5 anos	Não superior a 5 anos

Inspeções especiais devem ser realizadas com recorrência de 5 a 10 anos dependendo da condição da OAE. Trata-se de uma inspeção detalhada e, para tal, necessita de recursos materiais e equipamentos que possibilitem a verificação gráfica e quantitativa de todos os elementos aparentes a fim de se realizar o diagnóstico e o prognóstico de níveis mais profundos da estrutura. Sua execução é normalmente antecipada nos casos de:

i) Necessidade de intervenção de curto prazo observada em inspeção anterior nos seus parâmetros de desempenho estrutural e de durabilidade;
ii) Modificações significativas na estrutura, como reforços para aumento da capacidade portante.

Inspeções extraordinárias são previstas em casos específicos de necessidades ou na ocorrência de eventos de baixa probabilidade como impacto de veículos, trem ou embarcações. Além de eventos decorrentes fenômenos naturais como inundações, vendavais, sismos, etc. Dessa maneira não possuem planejamento periódico, e são resguardadas para situações de urgência/emergência que apresentam possibilidade de desencadear o colapso de elementos ou comprometam a estabilidade global das pontes. Os relatórios desse tipo de inspeção são específicos, devem conter documentação fotográfica, identificação de anomalias, descrição da obra e terapia recomendada (Verly, 2015)

Convém indicar que muitas concessionárias estabeleceram por meio da experiência e especificidades do conjunto de pontes sob sua responsabilidade diretrizes para inspeção adaptando questões como periodicidade e classificação a quesitos internos. Sendo pois, que pela participação ativa de muitos profissionais dessas companhias na confecção do texto normativo, diversos itens são herdados das práticas propostas e implementadas durante anos de prática profissional, respeitando assim a *expertise* do corpo técnico de engenharia brasileira. Por via de regra, tais diretrizes se equivalem na efetiva dependência do planejamento que compreende todos os dados disponíveis da ponte a ser inspecionada como o tipo de ponte;

o seu estado geral e de seus componentes; o tipo de inspeção; as condições de acesso; a duração estimada da averiguação; o tamanho da obra, ferramental necessário e as condições de circulação do trecho.

2.4.2 Qualificação de Inspetores

Diferentes requisitos são adotados pelos países no intuito de promover o treinamento e a certificação de seus inspetores técnicos. Em geral, exige-se requisitos técnicos educacionais para a formação destes profissionais, nos quais a maioria dos países exige que pelo menos a liderança das equipes de inspeção seja ocupada por profissional com diploma de engenharia e experiência mínima comprovada na área de inspeção de pontes. Dessa forma, busca-se estabelecer padrões de qualificação profissional que garantam um nível de qualidade técnica da inspeção e dos dados obtidos nesse processo.

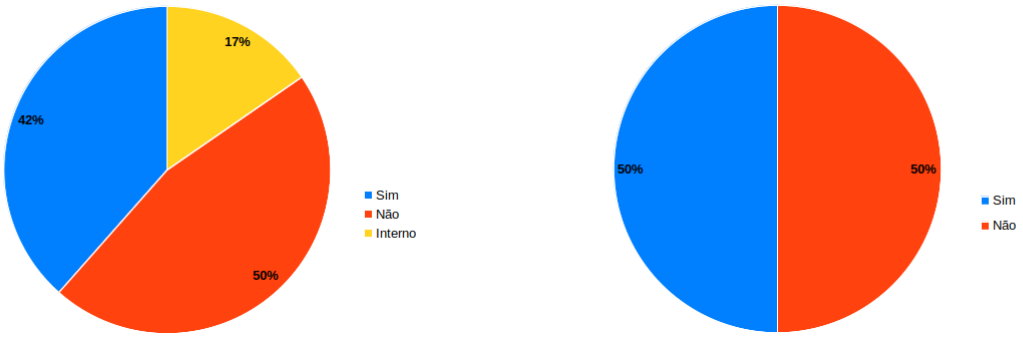
A norma brasileira NBR 16230 ABNT (2013), para inspeção de estruturas de concreto, define as diretrizes para qualificação e certificação de inspetores no Brasil. Segundo a norma, os candidatos à qualificação e requalificação devem apresentar diploma ou certificado que comprovem escolaridade, conforme o Quadro 2. A norma orienta também um conjunto de conteúdos desejáveis de currículo ao profissional que será habilitado a realizar inspeções em estruturas de concreto, conforme quadro de conteúdos programáticos do Apêndice B. Embora sejam os tópicos dessa normatização muito relevantes à formação do profissional, faz-se ainda necessário desenvolver um conteúdo mais específico ao caso de inspeções de pontes, sobretudo no que se refere ao processo de classificação dos ativos quanto ao seu estado de deterioração.

Quadro 2 – Requisitos mínimos de escolaridade e experiência profissional conforme NBR 16230 (2013)

Categoria	**Alternativa A**	**Alternativa B**	**Alternativa C**
1	Curso superior na área de construção civil, com um ano de experiência em patologia e terapia das estruturas de concreto.	Ensino médio profissionalizante em construção civil com dois anos de experiência em patologia e terapia das estruturas de concreto	Ensino médio com cinco anos de experiência na atividade de inspeção, recuperação ou reforço.
2	Engenheiro civil especialista (pós-graduado **lato senso**, mestre ou doutor) em patologia e terapia das estruturas de concreto, com dois anos de experiência na atividade.	Engenheiro civil com cinco anos de experiência em patologia e terapia de estruturas de concreto.	Curso superior na área de construção civil com dez anos de experiência em patologias e terapia das estruturas de concreto.

Fonte: ABNT (2013)

Figura 13 – Conhecimento dos profissionais sobre cursos de capacitação



a) Gestores **b) Inspetores**

O manual de inspeção de pontes rodoviárias do DNIT (2004, p. 47) define como requisitos mínimos para um inspetor: mínimo de cinco anos de experiência com projeto, execução e restauração de pontes; mínimo de dez anos de experiência em inspeção de pontes e perfeito conhecimento do manual de inspeção em pontes rodoviárias do DNIT. Os auxiliares técnicos devem possuir segundo grau completo, aptidão física para subir e descer em estruturas, habilidade em fazer desenhos a mão livre e ler projetos estruturais, demonstrar conhecimento com equipamentos de medidas e ter total conhecimento do manual assim como o inspetor. Contudo, no catálogo nacional de cursos técnicos o eixo tecnológico de infraestrutura não apresenta em seus cursos mais relacionados à área de inspeção de pontes qualquer conteúdo no itinerário formativo relacionado ao item de inspeção de infraestrutura ferroviária ou rodoviária (MEC, 2020a)(MEC, 2020b). Em estudo que trata da obtenção de dados por meio de inspeções técnicas Carvalho Neto, Cruzeiro e Bittencourt (2024) apresentam o grau de conhecimento a respeito de cursos e programas de capacitação de inspetores de profissionais atuantes do nível gerencial e como inspetores técnicos .

Todos os profissionais informaram já terem participado de algum treinamento interno para inspeção em ativos de infraestrutura. No entanto, metade desses profissionais afirma desconhecer qualquer tipo de treinamento ou certificação que qualifique a função, exceto pelas ações internas das companhias e órgãos nos quais trabalham, Figura 13(a). Quadro bastante similar se observa nas respostas dadas pelos gestores, Figura 13(b). Nesse cenário, todos os inspetores informam já terem recebido algum tipo de treinamento para inspeção de ativos de infraestrutura dentro das companhias nas quais estão trabalhando.

2.4.3 Levantamento e Identificação de Anomalias

O texto do guia de inspeções da AREMA considera que "o inspetor de pontes é a primeira linha de defesa entre os efeitos de deterioração e uma potencial catástrofe devida a uma falha estrutural". Pode-se pensar o procedimento de inspeção como uma sequência lógica cuja função seja verificar integridades dos elementos e conjuntos estruturais. Nesse sentido, há a representação meio pela percepção do inspetor utilizando dos seus atributos sensoriais

(Pinheiro, 2007). Em síntese, a atividade busca encontrar o conjunto complementar ou não conformidades que são as anomalias. Nesse sentido a tarefa se estrutura por:

- ✓ Localização e identificação;
- ✓ Medição e caracterização;
- ✓ Mecanismos atuantes;
- ✓ Priorização/classificação.

Embora haja o crescente desenvolvimento de ferramentas tecnológicas como monitoramento remoto, ferramentas de inteligência artificial, gêmeos digitais (*digital twins*) e inspeções com drones - que permitem cada vez mais diminuir a dependência da mão de obra nos procedimentos de levantamentos de dados em campo e conhecer a realidade das estruturas com mais profundidade como visto em Futai et al. (2022). Contudo, em horizontes próximos e práticos, o saber-fazer definido por Ribeiro (2000) ainda é fundamental e necessário no processo de investigação e classificação das pontes ferroviárias. Pela teoria geral da Administração, desde a clássica experiência *Hawthorne*, sabe-se que as condições do ambiente de trabalho são fatores determinantes e condicionantes da produtividade do indivíduo inserido em certa atividade laboral. Em muitos casos a situação encontrada nas estruturas, no contexto do que é chamado de realidade de campo, é indescritível pelas condições de acesso ou pode ser descrito de forma bastante equivocada por questões de limitações técnicas do inspetor.

Neste trabalho há o intuito principal de se colaborar com a tomada de decisão no gerenciamento de pontes ferroviárias. Subentendido nesse objetivo coexistem, até os dias atuais, as inevitáveis relações entre agentes de diferentes níveis hierárquicos, culturais, de formação e responsabilidade. Consequentemente, o gerenciamento de ativos ferroviários depende da ação direta do ser humano e das consequências de suas interações com o meio material que compõe o conjunto de infraestrutura (Ribeiro, 2007). Tal observação constitui o cerne de todas as ações de gestão relacionadas ao tema, embora sua tratativa seja subestimada ou evitada em certos casos do ambiente corporativo. Portanto, essa atividade laboral antrópica surge da busca de novas tentativas de melhor conhecer as questões inerentes à existência das pontes. Nos casos de inspeções de campos em elementos de infraestrutura ferroviária como pontes, túneis, taludes e bueiros a necessidade do julgamento humano é fator determinante do nível de entendimento da real condição de conservação. Merleau-Ponty considera um engano sobre a qualidade:

> Nós construímos, pela ótica e pela geometria, o fragmento do mundo cuja imagem pode formar-se a cada momento em nossa retina. Tudo aquilo que está fora desse perímetro, não se refletindo em nenhuma superfície sensível, não age sobre nossa visão mais do que a luz em nossos olhos fechados...[ ].Ora, a experiência não oferece nada de semelhante e nós nunca compreenderemos, a partir do mundo, o que é um campo visual. Se é possível desenhar um perímetro de visão aproximando pouco a pouco os estímulos

> laterais do centro, os resultados da mensuração variam de um momento ao outro e nunca se chega a determinar o momento em que um estímulo inicialmente visto deixa de sê-lo...(MERLEAU-PONTY, 1999, p. 26)

Portanto, é uma atividade de relacionamento com o mundo físico que é medida, compreendida e, por fim, transmitida e representada por meio da linguagem. Sendo esta a disponível (ou acessível) ao inspetor técnico e podendo, portanto, ser melhor compreendida pela análise da semiótica de todo o conteúdo produzido (Almeida et al., 2011). Cabe aqui conceituar, mesmo de forma resumida, a ciência que estuda a relação de significação dos objetos, segundo Santaella e Nöth (2017, p.7):

> Numa primeira definição, podemos dizer que a semiótica é a ciência dos sistemas e dos processos sígnicos na cultura e na natureza. Ela estuda as formas, os tipos, os sistemas de signos e os efeitos do uso dos signos, sinais, indícios, sintomas ou símbolos. Os processos em que os signos desenvolvem o seu potencial são processos de significação, comunicação e interpretação.

Embora seja este trabalho focado na aplicação de ferramentas matemáticas/computacionais ao problema em estudo. Faz-se necessário entender a parte central de grande maioria das dificuldades em se alcançar um padrão de informação confiável, aderente e capaz de fornecer ao responsável pelas ações gerenciais um conteúdo que melhor oriente na tomada de decisões.

2.4.4 O Aspecto Humano

Classificar algo é, *per summa capita*, determinar o quadro geral das propriedades do objeto a ser classificado por meio de percepções sensoriais, intuições e possibilidades detectoras associadas à experiência individual e/ou procedimentos pré-definidos. O ser humano realiza as atividades de diagnosticar e classificar entes em todos os âmbitos de seu cotidiano. Seja por exemplo o nível de valor de mercado de bens de consumos duráveis ou não-duráveis, as condições econômico-financeira, as relações interpessoais no ambiente profissional, o estado próprio de saúde e tantos outros exemplos. Em um exercício abstrato o ser humano pode fazer (ou faz) classificações ordenadas de acordo com seus interesses, afinidades ou experiências com praticamente tudo que o cerca e é passível de observação.

Segundo Marcondes (2004, p. 8): “compreender o mundo significa compreender a realidade diferentemente de como o fazemos e de foma mais satisfatória, dados certos objetivos práticos e/ou teóricos". Daí surge a concepção de um mundo que não é transparente o bastante para se revelar em sua totalidade aos nossos sentidos e experiências de forma espontânea. O conhecimento depende da análise fundamentada na decomposição e separação do observável e a partir disso se produzir definições cujo conjunto é mutável, por ser fruto de recorrente sentimento de insatisfação ou desconhecimento devido às circunstâncias ou contexto da análise do objeto investigado. Isso se aplica e é claramente percebido na relação

ser humano e estrutura no que se refere ao entendimento do nível de confiabilidade ou integridade estrutural.

Pela utilidade para a qual uma estrutura foi projetada está intrínseca a necessidade de se reconhecer o quanto ela ainda atende ao seu objetivo inicial de forma satisfatória. De maneira específica, trata-se de uma constante interação entre os indivíduos e o meio/objeto material projetado resultante da genialidade humana. Essa simbiose homem-estrutura carece dos recursos comuns utilizados pela sociedade para se registrar não apenas o processo de criação como também o estado de conservação e desempenho, *e.g.* projetos, relatórios, imagens e documentos gerais.

> A nossa condição de relacionamento com o mundo é mediada por uma rede de linguagens e representações. Comunicamo-nos por meio de leituras ou produção de textos, por meio de imagens, gráficos, sinais, números, sensações, de modo que podemos nos considerar *"seres de linguagem"*. (Almeida et al., 2011, p. 1).

Pela perspectiva da semiótica a transmissão e/ou transferência do conhecimento ou o acesso ao que se pode conceber como verdade no mundo físico carece de estruturação lógica baseada na sintaxe, na semântica e na pragmática a fim de se endossar o que se pretende estabelecer como verdadeiro(OLIVA, 2010). Dessa maneira, faz-se um paralelo com o contexto técnico de engenharia de forma resumida:

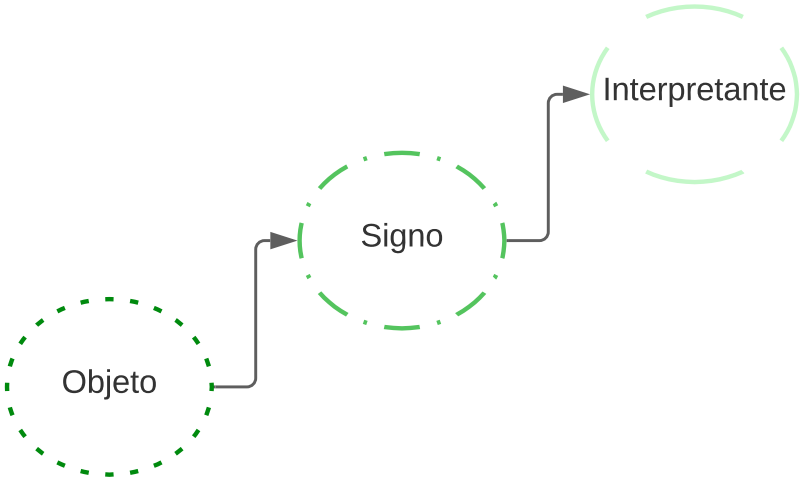
- ✓ **Sintaxe**: trata das relações existentes entre os signos sem, no entanto, se considerar a que referem ou o contexto em que se aplicam. Representando assim a forma do discurso;
- ✓ **Semântica**: diz respeito à conexão direta entre a linguagem e a realidade em si. Por representar o conteúdo do discurso é de enorme importância para os casos de levantamentos de anomalias, pois, talvez, a confiabilidade das informações obtidas em campo seja a característica mais importante no processo de inspeção, *i.e.*, a informação deve representar de forma fidedigna o que ocorre na estrutura;
- ✓ **Pragmática**: representa o contexto e está relacionada aos aspectos bióticos da comunicação. Ou seja, as relações dos signos com seus usuários e quem diz o que, como, quando e para qual fim o conteúdo é transmitido. Sendo, portanto, muito relevante na etapa de transmissão, interpretação e tratamento dos dados coletados em campo.

Importante citar o conceito de signo no contexto da percepção e da representação humana sobre o mundo material e abstrato. O signo é um ente fundamental da semiótica e, em suma, pode ser entendido como algo que representa um certo objeto que, por sua vez, é o determinante do signo numa relação inicialmente diádica de *aliquid stat pro aliquo*, ou algo que representa outra coisa. Tal conceito só se faz presente quando o signo é capaz de representar/substituir algo diferente dele mesmo, como uma identidade do objeto em

certa forma e capacidade. Como resultado da relação do signo com o objeto surge o conceito interpretante conforme esquema semiótico peirceano da Figura 14. Sendo o interpretante o resultado de um processo racional que, na mente do intérprete, substitui o objeto e será o que o indivíduo tentará transmitir por meio de suas capacidades e recursos.

> Existem também signos não produzidos por seres vivos. O céu nublado significa chuva, o gelo significa que a temperatura caiu abaixo de zero, e febre junto com o congestionamento das vias respiratórias, dores de cabeça e de garganta significam uma gripe. Exemplos deste tipo são os signos naturais. Os médicos costumam chamar os signos naturais causados por uma gripe de sintomas. (SANTAELLA; Nöth, 2017)

Figura 14 – Esquema semiótico peirceano. Modificado de (Almeida et al., 2011)



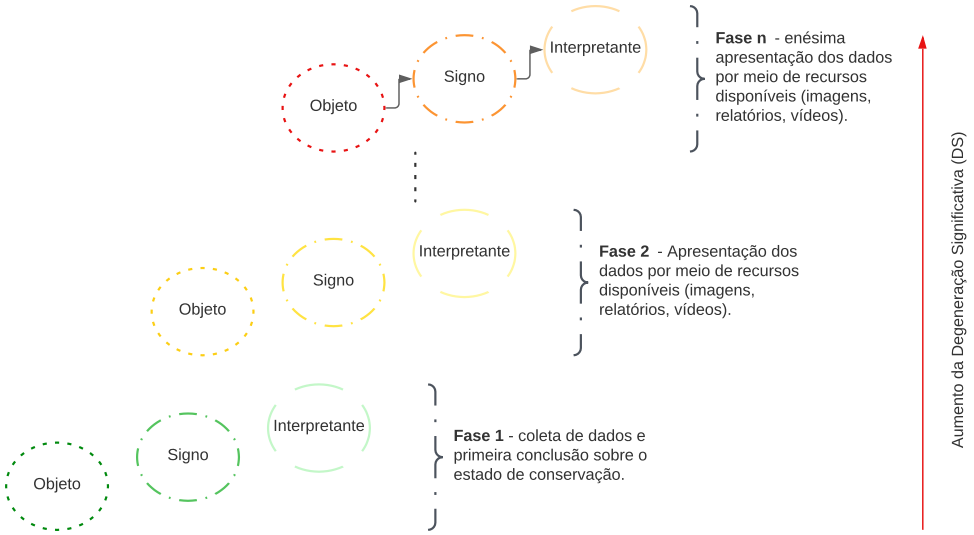
Em inspeções técnicas a percepção de determinada anomalia, *e.g.*, uma fissura, em certo elemento estrutural representa para o indivíduo, inicialmente, que há uma descontinuidade de ordem material. Podendo-se a partir da identificação da anomalia inferir a origem ou causa da patologia observada. Percebe-se, pois, que há possíveis desdobramentos dos signos mesmo nos mais simples exemplos, já que a conexão de causa é individual, pode ser obtusa e dependente, por exemplo, da experiência do intérprete (SANTAELLA; Nöth, 2017)(Ribeiro, 2007). A observação inicial de uma trinca que, a primeiro momento, denota uma descontinuidade no elemento inspecionado é dada ao que se define como primeiridade. Atribui-se, portanto, um caráter de qualidade ao que é observado, pois o conceito de trinca é definido *a posteriori* da percepção de descontinuidade. Em seguida pode-se mentalmente classificar, de fato, o observado como uma trinca. Isso decorre do fato de que o intérprete hipoteticamente possui experiência para identificar e classificar o que vê, no que é denominado secundidade. Adiante pode-se entender quais processos desencadearam ou causaram a trinca no elemento e se fazer ponderações e análises em uma fase de terceiridade. Assim,

forma-se na mente do intérprete o conceito de interpretante do objeto que neste caso é a patologia em si classficada de acordo com algum critério.

Por Costa (1997), a força de uma teoria é medida pela sua capacidade em revelar a verdade, contribuindo para o campo do conhecimento específico no qual se insere e permitindo o distanciamento crescente do erro, seja ele intuitivo ou não. No contexto das inspeções técnicas ferroviárias o comum isolamento geográficos exige a análise individual do inspetor e gera, a despeito de sua formação e expertise, a consequente relevância de sua opinião graças ao fato de que o olhar *in situ* ser sempre carregado de maior insuspeição no ambiente de engenharia. Disso, em termos práticos, dá-se à opinião do inspetor a justa proeminência do contato *in loco*, embora isso não signifique completa anuência de suas conclusões. Podendo em muitos casos os gestores solicitarem novas inspeções - realizadas por outros profissionais - quando os materiais de campo e a opinião do inspetor induzem a um ponto de vista inconclusivo sobre a avaliação de certa estrutura.

A perda da qualidade da informação no processo de transferência do campo para o ambiente de tomada de decisão será aqui definida como etapas de degeneração significativa (DS). Pressupõe-se dessa forma que quanto maior o número de interpretações da informação coletada em campo - nos moldes definidos anteriormente - maior será a DS da inspeção e o intrínseco afastamento da tomada de decisão do que pode ser considerado, *a priori*, como a realidade técnica. Importante esclarecer que o afastamento da definição inicial de campo pode ser a favor ou contra ao que, de fato, é a condição verdadeira da estrutura. Assim, pode ocorrer uma série de conceituações difusas a respeito do estado estrutural à medida que são realizadas observações com base nos recursos normalmente disponíveis. O esquema da Figura 15 busca representar como os desdobramentos da informação até a sua utilização na tomada de decisão pode aumentar com o número de resignificações do conteúdo.

Figura 15 – Esquema de desvio da qualidade da informação pela degeneração significativa



A relevância do fator humano no conteúdo coletado em campo pelas inspeções e a devida tratativa dessa atividade não têm sido, ainda, aspectos norteadores de atenção em termos bibliográficos. Uma maior aproximação com as diversas realidades das concessionárias por meio da investigação de eventos recorrentes dos inspetores e gestores poderia direcionar as ações e permitir concepções de modelagem mais acuradas a respeito de como se gerenciar o conjunto de pontes com base nas informações coletadas via inspeções técnicas. Neste contexto, a análise dos dados de classificação é dependente do quão desenvolvida é a gestão do conhecimento e sua compreensão no ambiente coorporativo.

De forma geral, não há um consentimento sobre o conceito de gestão do conhecimento. Isso pode ser entendido como uma propriedade ou aspecto epistemológico dessa área, não possuir fronteiras determinadas e estáticas por sempre necessitar de novas adequações e redimensionamentos.

> Gestão do conhecimento pode ser simplificadamente definida como o que é necessário fazer para tirar o máximo proveito do conhecimento já adquirido. Apesar de ser aplicada a indivíduos nas organizações têm sido uma disciplina de uso crescente para promover a criação, compartilhamento e alavancagem do conhecimento corporativo. (BECERRA-FERNANDEZ; SABHERWAL, 2015, p. 4).

Em uma abordagem mais específica, na qual o trabalhador é ente fundamental e responsável pela produção, manutenção e disseminação do conhecimento que permeia a organização. Nota-se claramente a contextualização da gestão do conhecimento no caso de inspeções técnicas e dos produtos gerados a partir das atividades e dados coletados em campo.

> Gestão do Conhecimento é definida pela abordagem sistemática e integrada com vista a identificar, gerir e partilhar todos os ativos de informação de uma empresa, incluindo bases de dados, documentos, políticas e procedimentos, bem como conhecimento prévio não articulado e experiência dos indivíduos. Fundamentalmente, trata-se de disponibilizar a informação existente a nível coletivo e a experiência da empresa a cada trabalhador individualmente, que por seu turno é também responsabilizado pela utilização criteriosa das mesmas e pela realimentação do stock daquelas. Hackett (2002, p. 725).

Pela teoria da gestão do conhecimento é necessário estratificar de forma adequada e introdutória os conceitos de conteúdos de dados, informação e do conhecimento em si.

- ✓ **Dados**: é um elemento de informação ou descrição exata de algo ou algum fenômeno. Por si, os dados não possuem relevância se tomados isoladamente. No entanto, representam a matéria-prima essencial no processo de análise para criação de informação.
- ✓ **Informação**: representa o conteúdo do dado trabalhado com valor significativo ou agregado após análises específicas obtidas com o uso de ferramentas de tratamento. A partir da informação há a possibilidade interlocução e transferência inteligível entre os indivíduos da cadeia produtiva.

✓ **Conhecimento**: é a informação em contexto prático que permite tomada de decisões, a previsibilidade e a interconexão com outras informações permitindo a transmissão para tempo futuro e, portanto, constituindo uma representação de ativo invisível acumulado com o passar do tempo pela experiência dos indivíduos atuantes nas organizações.

Dessa forma, o conhecimento gerado nas organizações se consolida como um ativo de caráter fundamentalmente invisível e cumulativo com o tempo. Não podendo ser negociado ou copiado, embora seja dotado de elementos físicos de registro. Parte desse conhecimento pode ser diretamente transmitido e sistematizado por meio de linguagem formal e recursos como relatórios, imagens, vídeos e é denominado conhecimento explícito. Por outro lado, há parte do conhecimento que possui caráter introspectivo e é de difícil transmissão em virtude de não ser verbalizado. Não permite sua documentação, reprodução ou armazenamento em bases de informação. Esse conhecimento tácito é construído a partir das experiências dos indivíduos no ambiente de trabalho e representa um ativo de valor imenso na realidade das corporações, conforme Tabela 1 (TAKEUCHI; NONAKA, 2004).

Tabela 1 – Conhecimento Explicíto x Conhecimento Tácito.

Conhecimento Explícito	**Conhecimento Tácito**
Baseado na racionalidade	Gerado pela experiência
Possui ordenamento sequencial	Caráter simultâneo
Permite armazenamento e transmissão direta	Elementos intangíveis

Fonte: Takeuchi e Nonaka (2004).

A interação dinâmica desses tipos de conhecimento promove ciclos de desenvolvimento e por meio de processos interativos partindo do nível individual até o social se consolida o que Takeuchi e Nonaka (1997) definem como espiral do conhecimento, Figura 16. Essa estrutura é fruto das conversões permutativas entre os tipos de conhecimento. Ou seja, certas interações possibilitam a síntese ou aglutinação dos conhecimentos de diferentes naturezas.

- **Socialização**: quando conhecimento tácito é convertido em conhecimento tácito (mesma natureza);
- **Externalização**: conversão do conhecimento tácito em conhecimento explícito;
- **Combinação**: quando o conhecimento explícito gera conhecimento da mesma natureza;
- **Internalização**: é fruto da transformação do conhecimento explícito em conhecimento tácito.

Figura 16 – Espiral do Conhecimento. Modificado de Takeuchi e Nonaka (1997, p. 80)



2.5 Classificação do Grau de Deterioração de OAE

Os sistemas de gerenciamento de pontes tendem a gerar um quadro de entrada (*input*) e saída (*output*) apoiado no julgamento de engenharia e considerado correto por meio do seu uso ao longo do tempo. No entanto, o processo de tomada de decisão dependente desse sistema de gerenciamento deve conter um método de utilização criterioso e questionador. Considerando a sensibilidade e a *expertise* dos profissionais responsáveis caso algum resultado possa contrariar a intuição do que pode ser esperado. A necessidade de classificação dos ativos acarreta, quase naturalmente, no uso de índices para determinar o grau de deterioração das pontes. Contudo, definições a respeito do sistema estrutural da ponte e seus componente são necessárias para se padronizar a classificação. Em resumo, um particionamento é realizado a fim de facilitar a identificação dos elementos e o mapeamento da anomalias, como na Figura 17. Na qual a simplifica-se a divisão em superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura.

De forma geral, as normas regulamentadoras dos países utilizam valores numéricos em um padrão de espectro descontínuo no qual em seus limites classificam-se as pontes como ótimo estado de conservação e sem necessidade de qualquer intervenção ou monitoramento. E no extremo oposto os ativos em condições de extrema degradação e/ou que ofereçam risco iminente de colapso devido a insuficiência estrutural. Importante observar que esses documentos contêm em suas classificações certas similaridades sem, no entanto, deixar de apresentar diferenças que são devidas às particularidades de cada região, cultura de gerenciamento, nível de tecnologia aplicada ao monitoramento e recursos financeiros disponíveis para atender às demandas de manutenção.

Na Europa, a partir do ano de 2015, o documento *Cost Action* TU1406 serve como

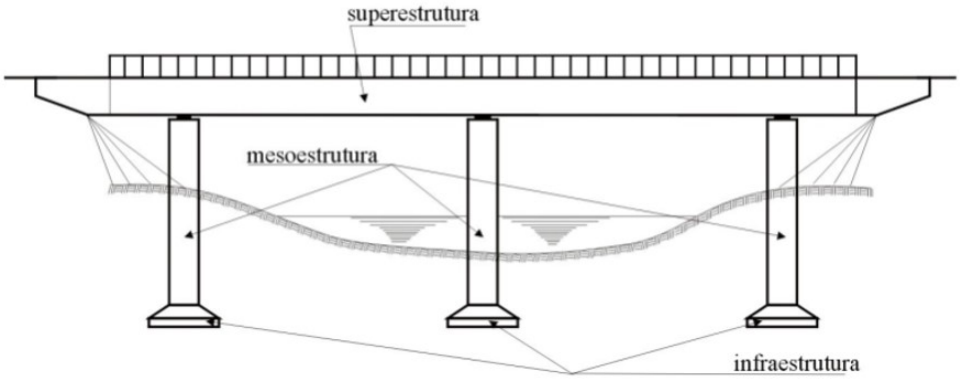


Figura 17 – Principais regiões dos componentes das pontes. Fonte: Vitório (2002)

orientação para indicadores de performance no controle de qualidade. Esse documento resulta da participação de profissionais com notável experiência em gerenciamento de pontes como pesquisadores, profissionais da indústria e agências governamentais. Em 2019, padronizou-se cinco níveis para classificação por meio de índices de condição (IC), de 1 a 5, relacionados à urgência de manutenção ou intervenção dos ativos. Sendo classificado com nota 1 para pontes com condições plenas e satisfatórias de performance e 5 para pontes em condições críticas e necessitando de imediata intervenção (DROMEY et al., 2016; DROMEY et al., 2020). Portanto, há uma inversão na escala de classificação do padrão da norma NBR 9452 em relação ao sistema adotado nos países europeus. Em termos práticos o conceito de IC pode ser amplo e diverso. Podendo, em certos casos, não corresponder diretamente ao valor da nota atribuída pela norma e ser resultado da composição de outros parâmetros de interesse do corpo técnico de engenharia (severidade, criticidade, nota normativa etc).

A dinâmica mais comum das mudanças nas classificações das pontes é representada pela Figura 18. Na qual pode-se observar que variações ΔIC podem indicar casos de degradação esperados em decaimentos unitários, como também mudanças abruptas, por exemplo $\Delta IC = 4$. Em virtude das naturezas dos processos de degradação atuantes nas pontes, em termos práticos, as classificações são mais seguras nos extremos dessa escala de notas e tendem a apresentar maior incerteza nos valores centrais. Ou seja, estabelecer por meio de inspeções que pontes estão em estados muito ou nada degradados é mais indubitável que determinar níveis intermediários de degradação. Pois nesses casos há concomitância de processos patológicos que dificulta a determinação das consequências dos danos observáveis em seus respectivos estados.

No Brasil, a NBR 9452 normatiza os requisitos exigíveis na realização de inspeções de pontes, viadutos e passarelas de concreto e para classificação das estruturas por meio dos parâmetros que permitem contemplar o estado de conservação observável. Os parâmetros considerados são:

- **Parâmetros Estruturais**: em termos práticos esses parâmetros são os mais relevantes

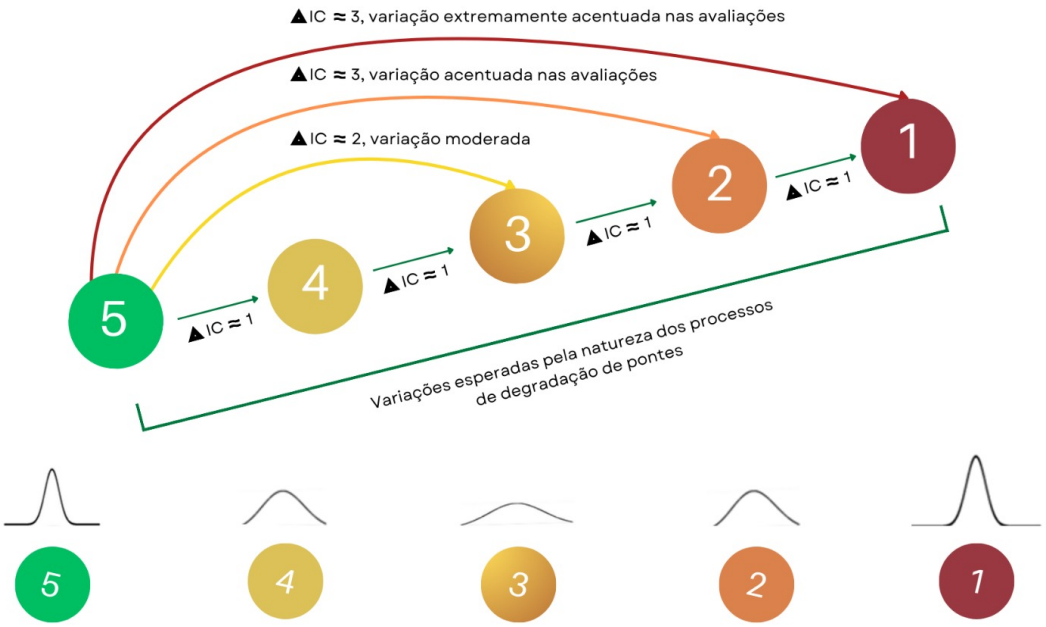


Figura 18 – Dinâmica prevista das classificações

por estarem diretamente relacionados às condições de segurança das estruturas como estabilidade e capacidade portante;

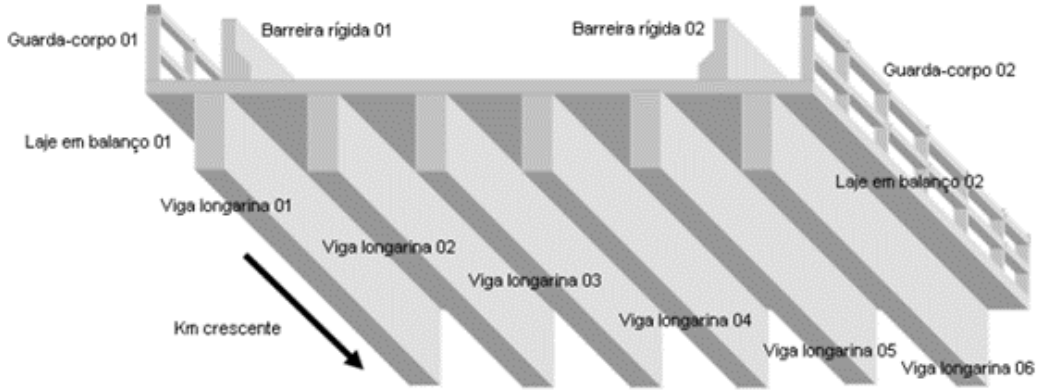
- **Parâmetros de Durabilidade**: estão associados à vida útil das estruturas e de sua capacidade em desempenhar a função para a qual foi projetada considerando as condições de agressividade do ambiente no qual está locada;
- **Parâmetros de Funcionalidade**: relacionados ao uso da estrutura de forma confortável por seus usuários para os fins aos quais ela ou seus elementos se destinam.

Além da divisão em parâmetros que revestem a necessidade de observação do desempenho estrutural. Há para os casos de inspeções mais detalhadas a classificação dos elementos com base na relevância dos mesmos para a estrutura, Figura 19. Ou seja, o texto normativo sugere que anomalias devem ser associadas ao risco (ou dano) que oferecem à estabilidade estrutural e não somente ao grau de deterioração que promovem. Sendo, pelo Anexo E da NBR 9452 ABNT (2023b, Anexo E):

- **Elemento Principal (P)**: cujo dano pode ocasionar o colapso parcial ou total da obra;
- **Elemento Secundário (S)**: cujo dano pode ocasionar ruptura localizada;
- **Elemento Complementar (C)**: cujo dano não causa nenhum comprometimento estrutural, apenas funcional na OAE.

Por meio dessa classificação a tabela E.1 da normaABNT (2023b) define-se que para a superestrutura de uma ponte a viga longarina é elemento principal enquanto a transversina é secundário, para o caso de um sistema estrutural de duas vigas. Em relação às anomalias,

Figura 19 – Nomenclatura de longarinas (perfis simples) no eixo da rodovia ou ferrovia. ABNT (2023b)



ibidem, na tabela E.2.1 as armaduras principais rompidas devem ser classificadas de 1 a 3, respectivamente, para elementos classificados como principal, secundário e complementar. O texto normativo tem apresentado maior nível de detalhamento a cada revisão. Contudo, a realidade ainda não corresponde a essa expectativa na maioria dos bancos de dados de OAE no Brasil. Mesmo com esse avanço considerável observado nos últimos anos no esforço de se padronizar esses dados. No caso específico das ferrovias, observa-se que os campos de registros dos bancos de dados ainda não são fiéis ao proposto pela norma. Contudo, isso em parte se explica pelas recentes modificações no texto normativo. Pois, embora seja do ano de 1986, teve suas revisões publicadas após o ano de 2012, conforme o histórico da Figura 20.

Revisão (mês/ano)	*Ação*
04/1986	Publicada edição
08/1986	Publicada nova edição (sem alteração.)
12/2012	Publicada edição
04/2016	Publicada edição
09/2019	Publicada emenda
09/2019	Publicada nova edição (incluindo emenda)
12/2023	Publicada edição

Figura 20 – Histórico de Atualização da NBR 9452

A classificação da OAE depende da consideração do responsável técnico sobre sua condição estrutural que pode ser excelente, boa, regular, ruim ou crítica dependendo das avaliações baseadas nos parâmetros citados. Define-se a faixa de notas de 1 a 5 para classificação, conforme Quadro 3, sendo a nota mais alta definida como melhor condição de conservação, *e.g*, uma ponte considerada em excelente estado de integridade dos seus elementos estruturais, perfeitas condições de funcionamento aos usuários e nenhuma degradação que

comprometa a sua durabilidade e, portanto, necessitando assim apenas de planejamento de inspeção rotineira. De forma antagônica, uma ponte classificada como nota 1 apresenta danos que geram insuficiência estrutural com risco tangível de colapso, nenhuma condição funcional de utilização e elevado grau de deterioração ocasionando problemas e/ou risco de natureza estrutural. Quanto ao que se define sobre o nível de manutenção, assim como sua frequência, o item de classificação da norma cita: "*Cabe ao inspetor atribuir as notas finais (estrutural, funcional e durabilidade), ficando a cargo do engenheiro gestor responsável a tarefa de gerir a priorização das intervenções*". Evidenciando o nível de responsabilidade atribuída ao corpo técnico pela classificação final e à tomada de decisão sobre as intervenções a serem aplicadas. Isso se motiva pelo interesse em não se engessar as diretrizes de manutenção, já que é entendida a diversidade nacional dos conjuntos de pontes, sejam da malha rodoviária ou ferroviária.

Quadro 3 – Classificação de OAE segundo os parâmetros estrutural, funcional e de durabilidade pela NBR 9452.

Nota de Classificação	**Condição geral dos parâmetros**
1	A ponte apresenta insuficiência estrutural e colapso iminente, sem condições funcionais e elevado grau de deterioração
2	Há danos que comprometem a segurança e necessidade de intervenção urgente, funcionalidade visivelmente comprometida com anomalias moderadas e abundantes.
3	Estrutura com danos que podem gerar deficiência estrutural sem comprometer a estabilidade, apresenta desconforto ao usuário e comprometimento moderado da vida útil.
4	Apresenta danos pequenos que não causam desconforto aos usuários e sem comprometimento considerável de sua durabilidade
5	Estrutura em condições estruturais satisfatórias, com segurança e conforto aos ususários e com recomendação de inspeção rotineira

Fonte: NBR 9452 ABNT (2023b)

Nas concessionárias responsáveis pelas ferrovias brasileiras foram, e ainda é em certo grau, utilizados padrões de classificação estabelecidos internamente. Isso se origina nas realidades bastante distintas das condições de trabalho, de via permanente, *backlog* e do aporte financeiro que tais empresas vivenciam. Conceitos como severidade e criticidade nortearam os gestores em anos de planejamento por meio da combinação do que se entende como nível de deterioração de certo ativo (severidade ou probabilidade) e da relevância do mesmo no sistema global de infraestrutura (criticidade ou consequência). A partir do cruzamento tabular dessas classificações obtém-se o nível de prioridade ou risco de cada

ponte inspecionada, Figura 21.

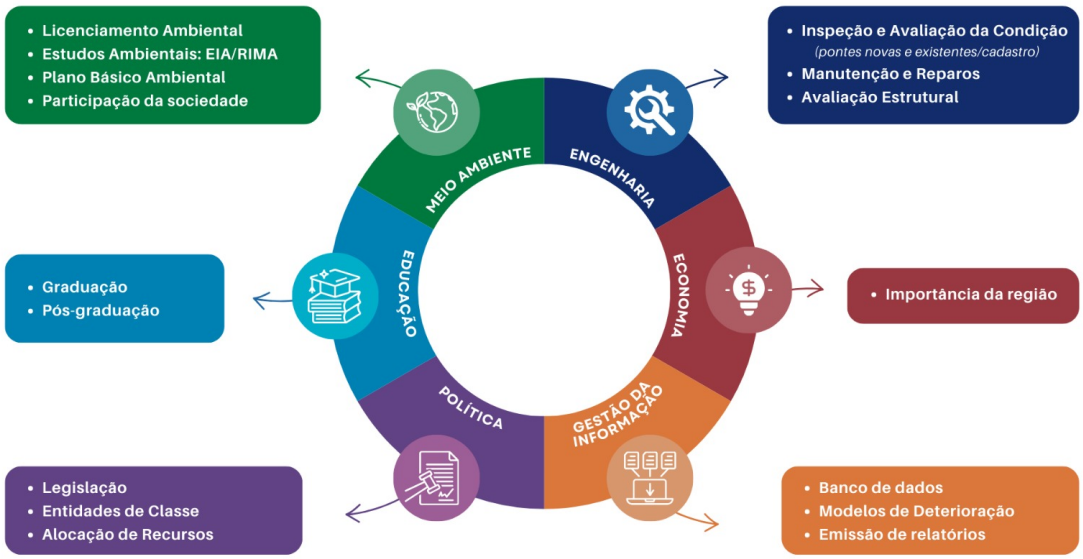
Figura 21 – Matriz de Risco. Fonte: (SOUZA et al., 2021)

Probabilidade	Consequência				
	Insignificante	Pequeno	Moderado	Alto	Catastrófico
Muito provável	Moderado	Alto	Extremo	Extremo	Extremo
Provável	Moderado	Alto	Alto	Extremo	Extremo
Possível	Baixo	Moderado	Alto	Alto	Extremo
Improvável	Baixo	Moderado	Moderado	Alto	Alto
Muito improvável	Baixo	Baixo	Baixo	Moderado	Moderado

2.6 Sistemas de Gerenciamento de Obras de Artes Especiais - SGO

Os sistemas de gestão de pontes, ou BMS (*Bridge Management System*), são sistemas computacionais especializados em catalogar, organizar e padronizar por meio de normas os dados obtidos durante as inspeções realizadas a fim de se permitir maior acurácia na tomada de decisão por parte dos responsáveis técnicos. Permitindo o desenvolvimento de modelos preditivos sobre as condições atuais e futuras do conjunto de pontes. Em tese de doutorado Mendes (2009, p.35) considera o caráter amplo de "um sistema multifacetado que abrange aspectos relacionados à engenharia, à ciência da computação, à economia, à ciência do ambiente e à política", sendo por essa multidisciplinaridade de difícil implementação nos ambientes corporativos e institucionais, Figura 22. O autor, *et sequentia*, cita a existência de diversos SGOs em utilização no mundo e, embora sejam construídos com objetivos semelhantes, apresentam diferenças pontuais em função das especificidades para as quais são utilizados. Em resumo, os sistemas de gerenciamento são baseados em premissas que procuram otimizar os benefícios do uso do conjunto de pontes na medida que minimizam o custo de vida útil, ou LCC (*Life Cycle Cost*). Neste contexto centra-se a seleção racional do subconjunto de ativos a serem inspecionados dada as limitações de recursos.

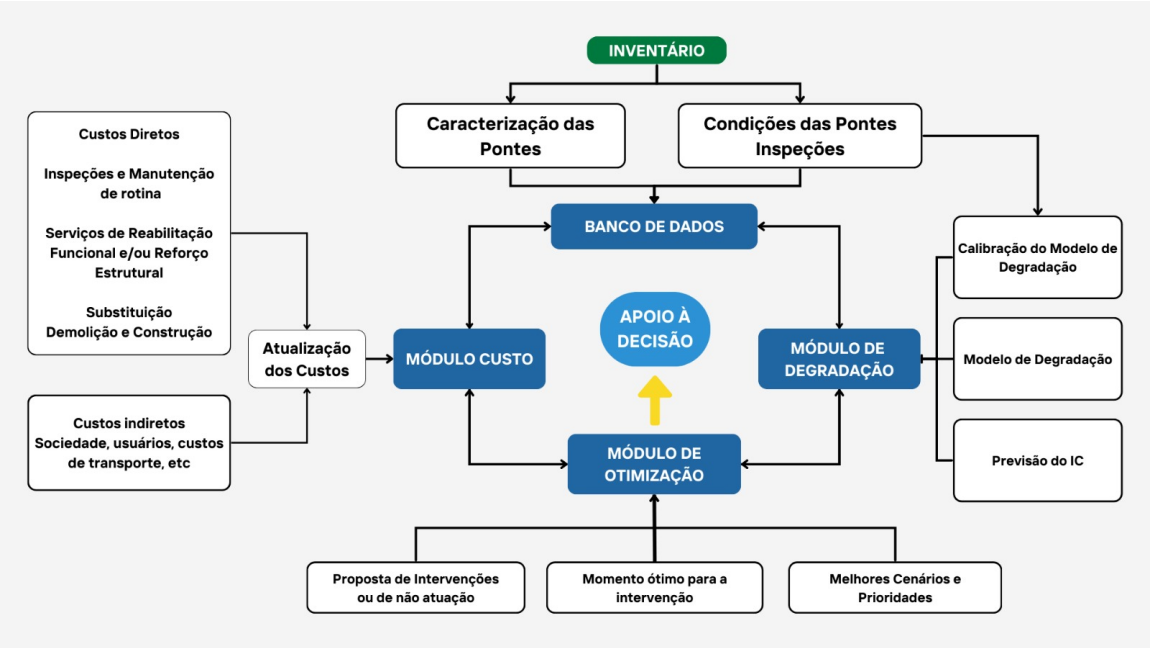
Figura 22 – Modelo de Gestão de Pontes. Fonte: modificado de (Mendes, 2009)



Em virtude de sua forte associação e natural dependência com os dados do ambiente prático da engenharia ferroviárias, os BMS devem ser administrados por gestores de comprovada capacidade técnica e experiência nas etapas de concepção, implantação, monitoramento, recuperação, inspeções e demais intervenções em OAE (AASHTO, 2013). Nesse contexto os modelos de gerenciamento de ferramentas de análise de custo de vida

ou *Life Cycle Costs Analysis* (LCCA), na qual os custos gerais demandados em toda a vida da estrutura são considerados, seja de seu projeto até os momentos de reabilitação ou demolição (RYALL, 2010). A Figura 23 exemplifica uma típica estrutura de apoio à tomada de decisão de um BMS com seus módulos de custos, degradação e otimização. Pode-se observar que tais módulos necessitam de dados de campo confiáveis e com a devida qualidade para que contribuam da melhor maneira para o funcionamento sistêmico.

Figura 23 – Estrutura Básica de BMS. Fonte: modificado de (Oliveira, 2019)



A Figura 24 detalha a relação inseparável das atividades de planejamento, classificação e inspeções de pontes ferroviárias no cotidiano normal do gerenciamento. Dessa maneira, observa-se que interdependência das ações e a continuidade do processo que busca otimizar o conjunto de ativos que devem ser priorizados nas manutenções.

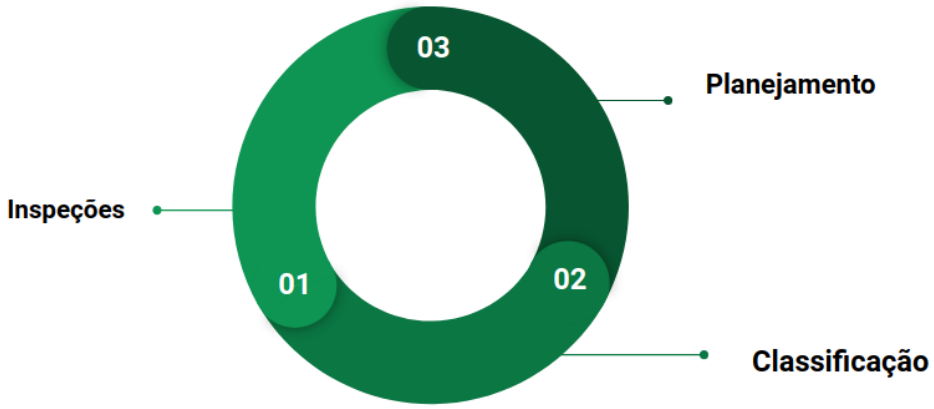
Planejamento: limitado pelo recurso disponível para o ano corrente um novo plano de inspeções e manutenção (corretiva e preventiva) é proposto.

Inspeções: com base nos recursos disponibilizados para inspeção é selecionado o subconjunto de pontes que deve ser inspecionado. A seleção tem critérios definidos pelas inspeções anteriores ou por critérios particulares da operadora, e.g., trecho de maior circulação ou mais rentável.

Classificação: classificação segundo NBR 9452. Nesta etapa o fator humano pode influenciar consideravelmente o resultado. Considera-se este com o fator que pode mais agregar incerteza ao processo.

Em trabalho que trata do desenvolvimento histórico dos BMS, Ellis (2024) evidencia os pontos mais relevantes desses sistemas de gerenciamento ao se considerar as dificuldades metodológicas, abordagens teóricas e práticas dos sistemas. O autor, sintetiza o futuro dos

Figura 24 – Processo de planejamento de inspeções



sistemas de gerenciamento com as ferramentas e desafios que emergem como mais relevantes nos apontamentos:

- Condições de inspeção e coletas de dados;
- Automação e inspeções remotas;
- Modelagem 3D, digitalização, gêmeos digitais e realidade estendida;
- Uso de sensores, SHM e integração via IoT (*Internet of Things*);
- GPS e dados de satélite.

Em termos práticos, evidencia-se que os sistemas de gerenciamento são fortemente vinculados ao uso de recursos. Seja em práticas mais tradicionais do gereciamento dos ativos, seja na implementação de novas técnicas e/ou tecnologias de monitoramento. De tal maneira que, assim como qualquer atividade de engenharia, demanda um nível de compromentimento técnico sempre atrelado aos custos envolvidos nos processos para destinação e definição dos direcionamentos de recursos financeiros disponíveis.

2.6.1 Alocação de Recursos

As premissas deste trabalho têm o objetivo de representarem as condições e a realidade do gerenciamento de pontes ferroviárias. Neste contexto, o maior desafio encontrado pelos gestores reside num conjunto de tomada de decisões que contempla, a rigor, a seleção de ativos apoiada na restrição de recursos. De maneira geral, para um conjunto heterogêneo de pontes ferroviárias, no caso das principais trechos concessionados no país, não haverá recursos disponíveis para inspeção de todos os ativos. Mesmo para se executar o modo mais simples inspeção técnica definida pela NBR 9452 (inspeção rotineira) há que se determinar o conjunto de ativos a ser priorizado.

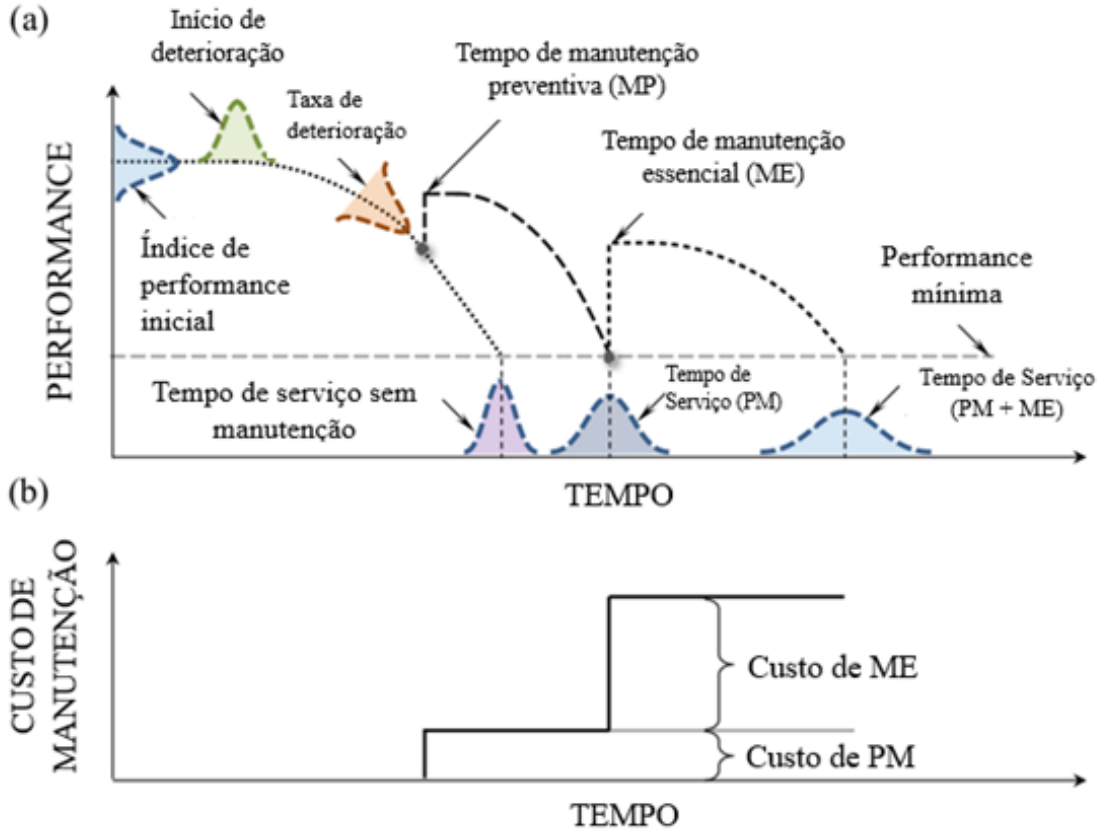
A priorização de manutenção de ativos pode ser atrelada a algum padrão de normalização, classificação interna por meio da *expertise* do setor de engenharia, percepção de risco (Figura 21) e/ou variação da demanda produtiva. No caso comum de algumas concessionárias determina-se uma quantidade mínina de pontes, ou trechos, ferroviárias que

deverão ser atendidas durante o ano dada as limitações orçamentárias para o período.

2.6.2 Gestão de Custos

Um tópico central no gerenciamento de ativos é a gestão de custos. Por meio desta é que se determinam as decisões que limitam e direcionam ações possíveis com certa disponibilidade de recursos financeiros. No caso das pontes o montante financeiro para ações de monitoramento, recuperação e reforço pode representar considerável parcela do recurso total destinado a essa natureza nas companhias. Portanto, os modelos de gerenciamento devem sempre contemplar o item de custos em uma abordagem mais amplificada da visão de engenharia. A Figura 25 exemplifica uma concepção do comportamento dos custos associados às ações de manutenção preventivas e essenciais/emergenciais.

Figura 25 – Concepção do comportamento gradual de deterioração de performance estrutural associado aos custos de manutenção.



Fonte: modificado de (Frangopol; Sabatino; Dong, 2017)

Em geral, o estudos relacionados às pontes tratam de aspectos intimamente constituídos de análises estruturais. Modelagens matemáticas, técnicas de monitoramento, abordagens probabilísticas e inspeções técnicas são itens recorrentes nas publicações da área de pesquisa. Naturalmente isso se explica pelo caráter estrutural do tema e por se tratarem das ferramentas mais aplicáveis. Como resultado desses estudos tem-se um direcionamento/entendimento

apenas intuitivo dos custos envolvidos no escopo da investigação sobre o estado de degradação de certa ponte ou conjunto de pontes. Contudo, na maioria dos casos, ainda há baixa preocupação em se tornar explícita as tratativas dos custos necessários seja para o controle do inventário de ações de recuperação ou dos planos de investimento. No XIV Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas a lista de trabalhos apresentados[1] não contém em nenhum dos títulos os termos *financeiro* ou *custos* (CBPE, 2023). Apenas um dos trabalhos (em quase uma centena) apresenta em seu título a palavra *econômica* (STRAVATE; CARVALHO, 2023). Em parte, isso ocorre em virtude das dificuldades de se conhecer ou acessar os valores reais envolvidos nos serviços de manutenção e da variabilidade dos casos de distribuição orçamentária em ferrovias e rodovias. De tal modo que os estudos se restringem aos aspectos estruturais das pontes. Em termos práticos de engenharia isso claramente é uma limitação, pois qualquer decisão técnica deve ser, sumariamente, definida pela possibilidade financeira de se realizá-la. Maiores informações sobre gestão de custos podem ser acessadas no relatório de estado da arte do gerenciamento de pontes do Instituto de Pesquisas em Transporte (IPR) [2]

O entendimento dos custos no ciclo de vida de uma pontes deve ser baseado na visão sistêmica do ativo e todas as suas particularidades. De forma geral, a gestão dos custos de pontes deve abarcar a classificação:

- **Custos Diretos**: correspondem a todos os gastos feitos diretamente relacionados à ponte sobre os quais a administração deve se responsabilizar (LIMMER, 2015);
  - Custos Iniciais: são relativos ao pré-contrato, projeto, atividades de construção, materiais etc;
  - Custos de Operação: importância financeira aplicada aos eventos de manutenção, custos de usuários durante esses evento e o custo social induzido pela atividade de manutenção (Xie; Wu; Wang, 2018);

- **Custos Indiretos**: a definição dessa natureza de custos pode apresentar diferenças em função das particularidades de cada projeto de engenharia civil. Segundo Limmer (2015, p. 87);

  > Somatório de todos os gastos com elementos coadjuvantes necessários à correta elaboração do produto ou, então, de gastos de difícil alocação a uma determinada atividade ou serviço, sendo por isso diluídos por certo grupo de atividades ou mesmo pelo projeto todo.

  Contudo, no caso de pontes, alguns autores tratam os custos indiretos considerando as consequências do fechamentos temporário para intervenções, falhas e custos de impactos ambientais. Inseridos nesses eventos são incluídos os custos de mobilização,

[1] Dados obtidos de https://cbpe2023.com.br/site/apresentacao_trabalhos.pdf, acesso em 25 de outubro de 2023.

[2] https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/relatorios-de-pesquisa-1/ipr_rp_004_estado_da_arte$_{m}odulo_de_custos.pdf$

sinalização, inspeções emergenciais e custos de canteiros de obras.

Outra forma de se definir os custos indiretos é com base no volume de produção em custos fixos, variáveis e semivariáveis. No entanto, essa classificação se aplica mais frequentemente aos casos de orçamentação de obras em fase de construção.

2.6.3 Problema da Mochila - *Knapsack Problem - PK*

Em virtude da necessidade de seleção/priorização dos ativos para ações de manutenção, o uso de ferramentas de otimização que melhor representem o contexto se faz necessário. Busca-se uma solução ótima que contemple um número máximo de ativos a serem atendidos dada certa restrição de recursos. O chamado problema da mochila possui formulação relativamente simples e aplicação prática direta por ser facilmente exemplificado pela situação - metafórica - na qual se pretende ocupar uma mochila com certa capacidade de carga com itens com pesos pré-estabelecidos, de tal maneira que se carregue o maior peso final possível dada a restrição de carga total da mochila. Tal problema tem estreito relacionamento com outros modelos de programação linear e aplicação prática em carregamentos de frotas, orçamentação, problema de corte e empacotamento e investimentos de capital (GOLDBARG, 2005)(ARENALES et al., 2011).

A formulação básica do problema da mochila consiste em se maximizar certa função objetivo cujo vetor de variáveis é sujeito ao conjunto de restrições como se segue:

Parâmetros:

- c_i: custo ou valor "econômico"de cada item i;
- w_i: peso de cada item i selecionado;
- b: capacidade total da mochila.

Variáveis:

- x_i: número de objetos do tipo i adicionado à mochila.

$$\max \quad z = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{c}_i x_i \tag{13}$$

$$s.a: \quad \sum_{i=1}^{n} \mathbf{w}_i x_i \leq \mathbf{b} \tag{14}$$

$$x_i \in \mathbb{R}^+ \tag{15}$$

Outra formulação clássica é conhecida por problema da mochila inteira, na qual a variável de decisão x_i passa a assumir apenas valores inteiros não negativos, alterando

apenas na formulação acima a restrição da Equação ((15)) por:

$$x_i \in \mathbb{Z}^+ \tag{16}$$

Segundo Goldbarg (2005) o problema da mochila é *NP-árduo*, o autor se baseia na obra de Garey e Johnson (1979, p. 109) que definem "podemos dizer que tal problema Π é *'NP-Hard'* desde que, em certo sentido, seja pelo menos tão árduo quando um NP-completo". Sendo que no caso em que as variáveis são contínuas pode ser solucionado de modo eficiente em *O(n)*, com *n* representando o número de variáveis do problema. Goldbarg (2005) pondera que esse possa ser o problema em que se consiga notar com maior facilidade a diferença de dificuldade de solução de problemas de programação linear inteira e apenas programação linear pela consideração única de restrição.

2.6.3.1 Mochila 0-1

O problema da mochila possui adaptações, em suas diversas aplicações, que consideram a seleção ou não de certo item. Nessa formulação, também chamada de binária, um determinado x_i será limitado aos valores 1 ou 0 em caso de escolha do item i ou não, respectivamente. Assim as variáveis do problema passam a ser definidas como:

$$x = \begin{cases} 1, & \text{se } x \text{ é selecionado} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Então o problema passa a ter a seguinte formulação:

$$\max \quad z = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{c}_i x_i \tag{17}$$

$$s.a: \quad \sum_{i=1}^{n} \mathbf{w}_i x_i \leq \mathbf{b} \tag{18}$$

$$x_i \geq 0 \in \mathbb{B}^n \tag{19}$$

2.6.3.2 Múltiplas Mochilas

Considera-se aqui o caso em que n itens devem ser colocados em m mochilas com capacidade distintas b_i. O problema consiste em se selecionar m subconjuntos de itens que ocupem as máximas capacidades em maximizem o carregamento total.

Parâmetros:

- c_i: custo ou valor "econômico"de cada item i;
- w_i: peso de cada item i selecionado;

- b_i: capacidade total da mochila de cada mochila i.

Variáveis:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o item } j \text{ é selecionado para a mochila } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$\max \quad z = \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} \mathbf{c}_i x_{ij} \tag{20}$$

$$\text{s.a:} \quad \sum_{j=1}^{n} \mathbf{w}_j x_{ij} \leq b_i \tag{21}$$

$$\sum_{i=1}^{m} x_i \leq 1 \tag{22}$$

$$\sum x_i \in \mathbb{B}^{mn} \tag{23}$$

A formulação para múltiplas mochilas pode ser aplicada ao problema de selecionamento de pontes ferroviárias para ciclos de inspeção ou manutenção considerando critérios de priorização de regionais. Considerando as premissas deste trabalho, o conjunto total de ativos é formado por subconjuntos heterogêneos de pontes, geograficamente pulverizados sem, *a priori*, possuir distribuição definida e com limitações orçamentárias de planos de inspeções. Em geral, a malha ferroviária é particionada em trechos que podem ser definidos baseando-se em pré-requisitos diversos, *e.g*, limites estaduais ou municipais, facilidade de acesso, estrutura de apoio, natureza dos carregamentos, topografia, dentre outros. Essas subdivisões obriga ao gerenciadores a desenvolverem estratégias de manutenção considerando as diretrizes de planejamento estratégico da companhia concessionária. Normalmente, trechos de maiores criticidades e importância econômica tendem a ser priorizados e, a partir disso, pode-se estabelecer divisões, como fossem mochilas, que determinem quantidades mínimas de ativos a serem inspecionados para cada trecho ferroviário.

Neste trabalho procurou-se associar as naturezas da atividade de classificação das pontes aos resultados obtidos por meio do agrupamento de dados. Assim, os valores dos índices de condição (IC) como elemento numérico de interesse e as custos de manutenção individuais, buscou-se inserir esses fatores nas formulações. Exemplo similar dessa tratativa é feito por Almeida et al. (2023), que define notas dos elementos de um conjunto denominadas *score* associoando valores ao grau de complexidade de cada perfil individual, Equação (24). Sendo c_{jk} a nota em escala normalizada para um custo k e indivíduo j e p_k o peso atribuído a esse critério.

$$\gamma_i = \sum_{k=1}^{K} c_{jk} p_k \tag{24}$$

A partir das definições dos *scores* individuais os autores, *ibidem*, estabelece *score* familiar elevados a λ definido por:

$$\Gamma_i = \sum_{j=1}^{m_i} \gamma_j^{\lambda} \tag{25}$$

Definindo-se o problema de otimização conforme a Equação (26)

$$maximizar \quad \sum_{i=1}^{n} \Gamma_i x_i \tag{26}$$

2.7 Análise de Agrupamentos (Clusterização de Dados)

Como citado, o levantamento das inspeções de campos em pontes ferroviárias tem como fruto material um conjunto de relatórios e arquivos que são essenciais aos objetivos dos sistemas de gestão de pontes. Neste trabalho pretende-se aplicar a ferramenta de análise de agrupamentos, ou análise de conglomerados, denominada de clusterização de dados (*clustering*) e amplamente utilizada em atividade de aprendizado de máquina. De forma geral busca-se dividir os elementos de certa amostra ou população em subgrupos de tal maneira que seus elementos apresentem similaridade com respeito às suas características e, assim, sejam formados os *clusters*. Segundo Jain (2010) a clusterização de dados tem sido usada em três principais propósitos:

1. Estruturas subjacentes: investigação de dados, gerar hipóteses, detectar anomalias e identificar saliências nas bases de dados;
2. Classificação natural: identificar graus de similaridade em formas, organismos, imagens e dados em geral;
3. Compreensão: organizar e sumarizar dados por meio de simulações.

Entende-se como métodos de agrupamento não-hierárquicos aqueles que são desenvolvidos para gerar agrupamentos em k grupos definidos com n elementos. Segundo Mingoti (2005, p. 192) é necessário que "*a partição satisfaça dois requisitos básicos: 'coesão' interna (ou semelhança interna) e isolamento (ou separação) dos clusters formados*". A necessidade da especificação do número k pelo usuário é uma das principais diferenças dos algoritmos não hierárquicos em relação aos algoritmos hierárquicos aglomerativos. Há também a diferença que elementos que compõem um certo grupo em uma etapa não estarão obrigatoriamente juntos nas etapas seguintes (MINGOTI, 2005). São exemplos de métodos não hierárquicos o K-Means, Fuzzy c-Means e as redes neurais artificiais aplicadas a casos de clusterização (MINGOTI, 2005)(JOHNSON; WICHERN, 2002) (IKOTUN et al., 2023). Diversos algoritmos são utilizados para agrupamentos com variações dos métodos mais clássicos a fim de atender demandas específicas de problemas, (DINH; HUYNH; SRIBOONCHITTA, 2021). Como qualquer ferramenta de análise, clusterização apresenta aspectos muito positivos e que motivam seu uso amplo. No entanto, suas limitações de uso devem ser entendida e pontua-se as seguinte críticas à análise de *clusters*:

- A análise de agrupamento é descritiva, a-teórica, e não inferencial;
- Sempre criará *clusters*, independentemente da existência real de qualquer estrutura nos dados;
- A solução de *cluster* não é generalizável porque é totalmente dependente das variáveis utilizadas como a base para a medida de similaridade.

2.7.1 Algoritmo K-means

O algoritmo K-médias (*K-means*) é um método de agrupamento de dados não-hierárquico que é utilizado para particionar um conjunto de dados e inicialmente proposto por Steinhaus (1956). O algoritmo é amplamente utilizado em pesquisas científicas e aplicações industriais pela sua simplicidade e eficiência computacional (UMARGONO; SUSENO; GUNAWAN, 2020). Embora o algoritmo tenha origem na área de particionamento de corpos materiais e após décadas desde sua primeira publicação, ainda é consagrado na área de *data mining* e possui um elevado número[3] de atualiações e adaptações (JAIN, 2010)(DINH; HUYNH; SRIBOONCHITTA, 2021) (AHMAD; DEY, 2007) . O algoritmo busca minimizar as distâncias $d(.,.)$ de um conjunto $X = \{x_1, x_2, x_3..., x_n\}$ por meio da escolha inicial de K centroides para agrupamentos. No trabalho de Lloyde (1982) a soma dos quadrados das distâncias euclidianas d_E^2 entre os centroides c_i e os demais pontos p_j do conjunto são minimizadas, conforme Equação (27). O algoritmo 1 detalha o pseudo-código do algoritmo *K-means* (MATTE; NICOLETTI, 2019) (SAPUTRA; SAPUTRA; OSWARI, 2020) (JAIN, 2010).

$$c_i = \arg\min \sum_{p_j \in X_i} d_E^2(c_i, p_j) \tag{27}$$

Algoritmo 1: Algoritmo K-Means

Entrada: banco de dados com N instâncias e D dimensões, K *clusters* desejados
Saída: Dados divididos em K *clusters*

1. **início**
2. inicializa os K centróides com valores aleatórios
3. **enquanto** critério de parada não atendido;
4. **para cada** amostra x_i **faça**
5. adicione x_i ao grupo do centróide c_k de menor distância;
6. **fim**
7. Atualiza os centróides c_k
8. **fim**

Segundo Kassambara (2017) o algoritmo apresenta as seguintes desvantagens:

- Assume um conhecimento prévio dos dados e requer do analista a escolha da quantidade de *clusters*;
- O resultado final é dependente da escolha inicial aleatória de centróides. Gerando possíveis diferentes resultados finais;
- É sensível a *outliers*;
- Em caso de reordenamento de dados, o resultado final pode ser alterado.

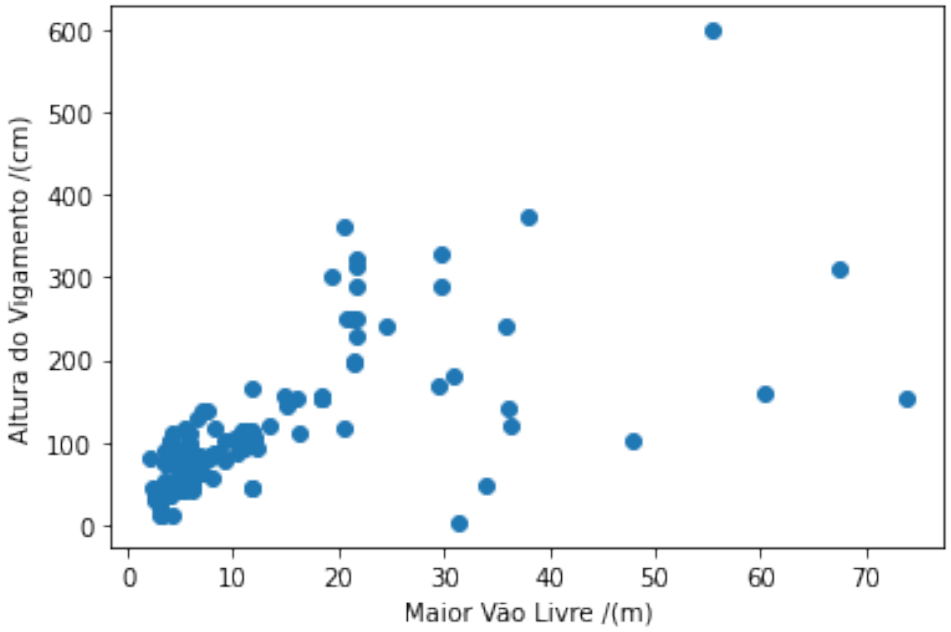
Como sugestão o autor, *ibidem*, indica:

[3] Tabela disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/24787/24787_5.PDF, acesso em 01 de julho de 2024.

- Realizar simulações para uma faixa de valores de k, por exemplo 2 a 10. Assim pode-se realizar comparações e escolher o melhor cenários entre os resultados de *clusters*;
- Utilizar diferentes centróides iniciais e escolher o que apresenta a menor soma de quadrados;
- Evitar distorções causadas pelos *outliers* aplicando tratativas a esses casos.

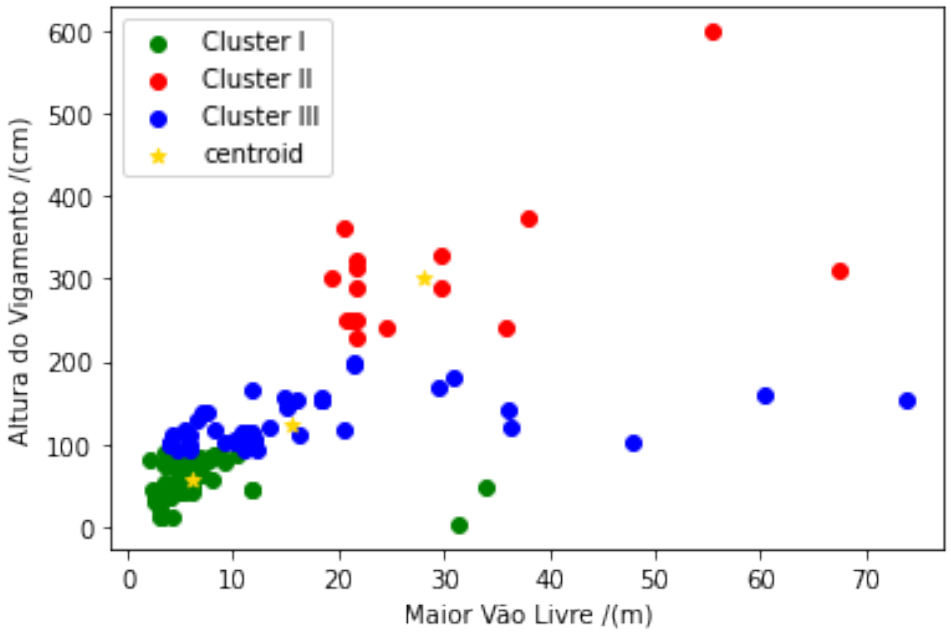
O uso das ferramentas de agrupamento é adicionada à proposta de conjunção com as formulações de otimização do item anterior. A Figura 26 e a Figura 27 representam um exemplo de agrupamento para um conjunto de 150 pontes em função das características de maiores vãos livres e alturas dos vigamentos selecionadas pelo algoritmo K-Means. As pontes desse exemplo foram selecionadas a partir de um banco de dados obtido junto a uma importante concessionária de trechos ferroviários e o exemplo trata de duas grandezas geométricas bastante relevantes para pontes e que, em geral, apresentam algum grau positivo de correlação.

Figura 26 – Amostra de dados.



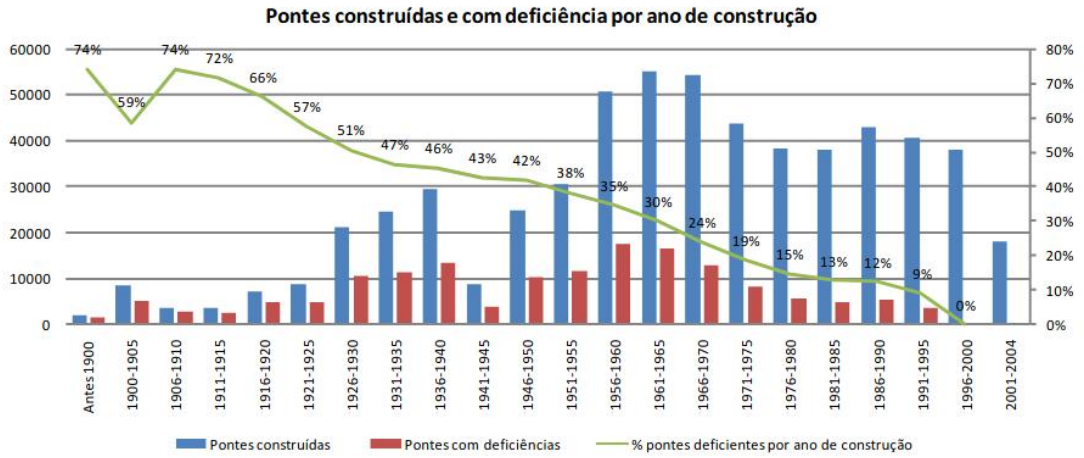
Observa-se que a seleção é dominada em quantidade por dados de caráter estático. Daí surge a necessidade de se inserir ponderações que considerem o dados dinâmicos e a importância física do acúmulo de danos e efeitos de fadiga. São conhecidas ocorrências em série de ativos que apresentaram rupturas em intervalos de tempo relativamente pequenos em trechos ativos e de elevado tráfego, além de que algo em torno de 40% dos danos observados em pontes são devidos à fadiga, sendo portanto a principal causa das ruínas em pontes ferroviárias (OEHME, 1989)(JUNQUEIRA et al., 2019). A Figura 28 indica a maior ocorrência de anomalias em pontes mais antigas, naturalmente, do banco de dados do *National Brigdes Inventory*. Ocorre também a tendência no crescimento das anomalias

Figura 27 – Amostra de dados agrupados. Fonte: autor



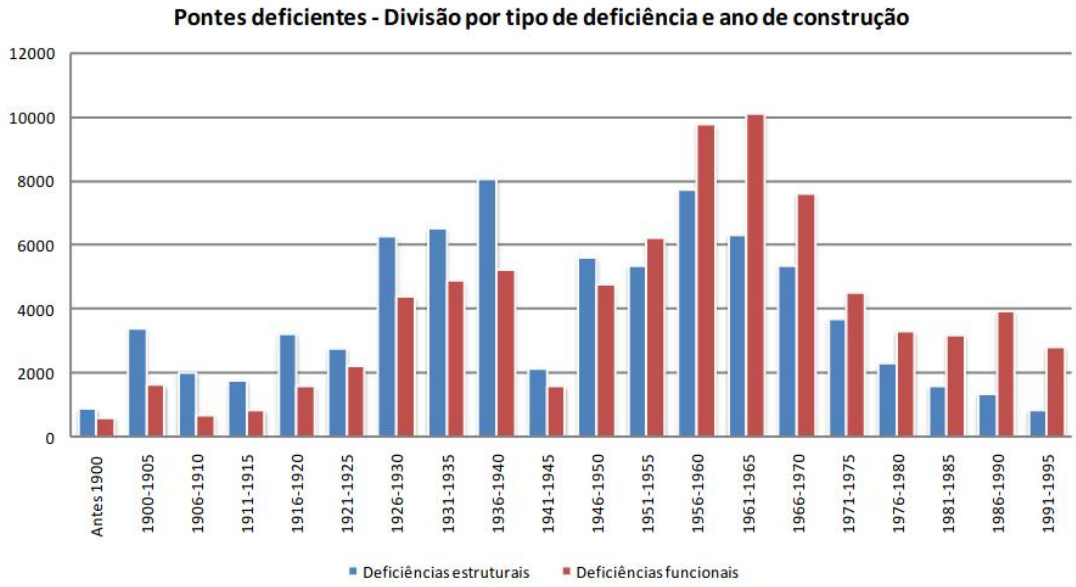
de caráter estrutural em pontes mais antigas, ou seja, estruturas com mais tempo de uso tendem a apresentar anomalias em seus componentes estruturais com maior frequência quando comparadas com deficiências de caráter funcional (Poças, 2009). Este fato, embora bastante previsível aos olhares da experiência de engenharia, serve como embasamento para a hipótese de que danos do campo material/estrutural são fortemente relevantes no contexto de previsibilidade de trativas de manutenção. Surge disso o indicativo de que ocorrências originadas pelo uso constante dos ativos, porém não previamente diagnosticadas, podem ter suas causas consideradas em modelos matemáticos de ciclos de vida útil e de realização de manutenções/inspeções técnicas.

Figura 28 – Deficiências em pontes dos EUA.(Poças, 2009)



A identificação do quanto, ou até que ponto, dois elementos são semelhantes é uma

Figura 29 – Natureza de Anomalias em pontes dos EUA.(Poças, 2009)



importante questão e depende da determinação de critérios ou medidas de similaridade. Ao se considerar que cada elementos possui n-características armazenadas em um vetor, pode-se realizar até n comparações elementares e, por meio de métricas, calcular o quão próximo um elemento está de outro (MINGOTI, 2005). Ou seja, dado um conjunto com m elementos com n características, para cada elemento amostral j tem-se um vetor de medidas dado pela Equação (28).

$$X_j = \left[X_{1j}X_{2j}X_{3j}...X_{nj}\right], \quad j = 1,2,...,m \tag{28}$$

No caso de variáveis quantitativas medidas de dissimilaridade são utilizadas para se determinar a distância dos elementos amostrais, sendo pois quanto menor o valor entre elementos comparados mais similares serão.

2.7.2 Medidas de Distância

Considerando dados com n características ou atributos, define-se, portanto um espaço multi-dimensional, mais precisamente n-dimensional, no qual se pretende estabelecer a distância entre os elementos.

- **Manhattan/City Block**:pode ser definida como a soma das diferenças absolutas entre dois pontos de coordenadas (x_i, y_i) cartesianas fixas, conforme Equação (29).

$$d(X_l, X_k) = \sum_{i=1}^{n} | X_{il} - X_{ik} | \tag{29}$$

- **Euclidiana**: trata-se provavelmente da distância mais utilizada em clusterização. Os elementos amostrais são comparados em cada variável do vetor de observações e é definida pela Equação (30).

$$d(X_l, X_k) = [\sum_{i=1}^{n}(X_{il} - X_{ik})^2]^{1/2} \tag{30}$$

- **Minkowsky**: essa medida é definda para dois elementos X_l e X_k, com $lneqk$, pela Equação (31).

$$d(X_l, X_k) = [\sum_{i=1}^{n} w_i \mid X_{il} - X_{ik} \mid^{\lambda}]^{1/\lambda} \tag{31}$$

  Onde w_i são pesos de ponderação para variáveis. Observa-se que no caso específico no qual os pesos são unitários e $\lambda = 1$ ou $\lambda = 2$ tem-se as distâncias manhattan e euclidiana, respectivamente.

- **Chebyshev**: é a medida de distância definida pela máxima diferença entre os valores absolutos das variáveis. Tal medida é bastante útil no caso de se desejar destacar quando dois elementos aprensentam diferenças entre dois atributos e é dada pela Equação (32).

$$d(X_l, X_k) = máx_{i=1}^{n} \mid X_{il} - X_{ik} \mid \tag{32}$$

- **Mahalanobis**: é definida pela Equação (33) e incorpora a correlação entre variáveis de forma que suas médias sejam nulas (0) e variância um (1). Tem como ideia básica associar diferentes pesos à diferentes variáveis com base em seus valores de variância e correlação linear entre pares (Metz, 2006).

$$d(X_l, X_k) = \sum_{l=1}^{n}\sum_{t=1}^{n}(X_{il} - X_{jl})Cov^{-1}(X_{it} - X_{jt}) \tag{33}$$

2.7.3 Número Ótimo de *Clusters*

Um dos maiores problemas, ou fraqueza, da técnica de clusterização é determinar o número de clusters que deverão ser identificados durante as simulações. Parte-se, pois, de um cenário que é dependente de definições iniciais baseadas na confiança e conhecimento do responsável por essa determinação. A definição do valor de k é, portanto, necessária por ser um parâmetro de entrada do algoritmo K-means. No caso em estudo, no nível gerencial normalmante aplica-se métricas internas para classificação das pontes. A fim de se estratificar o conjunto com base na matriz Figura 21 da Seção 2.5. Isso faz com que o número estipulado não seja muito elevado, normalmente em torno de cinco níveis para tomada de decisão.

Alguns métodos são utilizados para determinar o número de *clusters* iniciais para o uso de algoritmos de classificação. Neste trabalho serão utilizados os três métodos seguintes para determinação do número de *clusters* iniciais. Em suma, esses métodos buscam analisar o grau de coesão ou separação internas dos dados nas instâncias iniciais dos centroides (SAPUTRA; SAPUTRA; OSWARI, 2020). A coesão dos dados em certo *cluster* pode ser medida por meio do WSS (*within cluster sum of square*) da Equação (34) utilizando-se da soma dos quadrados de cada observação (m_i) e do valor do centroide (x). A separação/dispersão pode ser calculada BSS (*between sum square*), utilizando-se os valores da soma dos quadrados entre os centroides estabelecidos (m) e os valores médios de cada amostra m_i num conjunto total de objetos C_i no *cluster*, Equação (35).

$$WSS = \sum_{i} \sum_{x in C_i} (x - m_i)^2 \tag{34}$$

$$BSS = \sum_{i} |C|_i (m - m_i)^2 \tag{35}$$

2.7.3.1 *Elbow Method*

Trata-se de um método visual para testar a consistência, ou coesão, do número ótimo de *clusters* por comparação da diferença da soma dos erros quadráticos, ou *sum of square errors* (SSE) de cada *cluster*, também denominada função de custo J da Equação (36), segundo Cui et al. (2023). Nesse método o resultado gráfico é dado pelo valor de WSS e apresentado em função do número de k. Com o aumento do número de *clusters* irá diminuir gradualmente o valor de WSS. A lógica da escolha do ponto ótimo, ou *elbow point*, é baseada no ponto que representa notável mudança no valor de WSS em função de k, indicando uma inversão da dispersão interna nos *clusters*. Diversos trabalhos apresentam esse método como ferramenta básica para determinação do número k ótimo e realizam comparações em diferentes cenários para e tipos de bancos de dados(HUMAIRA; RASYIDAH, 2020)(UMARGONO; SUSENO; GUNAWAN, 2020). O algoritmo Item 2 apresenta os passos realizados no método.

$$J = \sum_{i=1}^{k} \sum_{x in C_i} |x - C_i|^2 \tag{36}$$

2.7.3.2 *Silhouette Method*

Esse método é baseado na hipótese de que os *clusters* devem ser densos o bastante, apresentarem coesão e também notavelmente separados. A partir disso, gera-se um coeficiente denominado *silhouette coefficient*, que trata da intensidade da razão desses dois aspectos, coesão e separação ou dissimilaridade e similaridade (CADY, 2017). Considere-se

Algoritmo 2: Algoritmo *Elbow Method*

Entrada: banco de dados com N instâncias e D dimensões
Saída: Número ótimo K de *clusters*

1. **início**
2. Executar o K-means para obter centróides e outros parâmetros
3. Calcular distância de cada objeto i ao centróide de acordo com a função de custo $SSE = \sum_{i=1}^{k} \sum_{xinC_i} |x - C_i|^2$;
4. Calcular diferentes k para obter os valores de SSE;
5. Plotar os valores de WSS e o *elbow point*;
6. **fim**

um elemento contido num *cluster* A com a presença de, no mímino, outro *cluster* vizinho C no conjunto de dados, a Equação (37) define o coeficiente no qual:

$a(i) =$ dissimilaridade média de um elemento i a todos demais objetos do *cluster* ao qual pertence;

$b(i) = \min_{C \neq A} d(i,C)$, sendo $d(i,C)$ a dissimilaridade média de i a todos os objetos de outro *cluster* C (ROUSSEEUW, 1987) e $b(i)$ a menor distância calculada;

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{max\{a(i), b(i)\}} \tag{37}$$

Outra maneira de representar esse coeficiente é:

$$s(i) = \begin{cases} 1 - \frac{a(i)}{b(i)}/ & \text{se } a(i) < b(i) \\ 0, & \text{se } a(i) = b(i) \\ \frac{a(i)}{b(i)} - 1, & \text{se } a(i) > b(i) \end{cases}$$

No caso hipotético do *cluster* A conter apenas um único elemento a definição de $a(i)$ pode ser simplificada como $s(i) = 0$ (KAUFMAN; ROUSSEEUW, 1990). Trata-se de uma deliberação e por meio dessa escolha tem-se:

$$-1 \leq s(i) \leq 1 \tag{38}$$

Essa relação indica que quanto maior o valor de $s(i)$ a configuração dos *clusters* é mais adequada e, portanto, escolhe-se o valor k referente a esse resultado, Figura 30. Por fim, $s(i)$ mede o quão bem alocados, ou classificados, os objetos estão em um *cluster*.

2.7.3.3 *Gap Statistic Method*

Os métodos citados (*elbow e silhouette*) são sensíveis nos casos em que o banco de dados apresenta *outliers* e/ou ruídos como valores fora do domínio, valores faltantes, inconsistências etc. A fim de evitar o comprometimento dos resultados gerados e auxiliar na escolha do valor k, pode-se utilizar o método *Gap statistic* (CUI et al., 2023) que é baseado,

também, na soma dos quadrados internos dos *clusters* e pode ser aplicado a qualquer algoritmo de clusterização . Xie, Lawniczak e Gan (2022) descrevem, de forma simplificada, os passos do método para determinar o valor ótimo de K baseado no trabalho de Tibshirani, Walther e Hastie (2002):

1. Clusterização dos dados pela variação do valor de $k = 1,2,3...K$, e calcular o WSS_k para cada k;
2. Gerar e clusterizar B *datasets* de referência baseados em certa distribuição para $k = 1,2,3...,B$ e obter WSS^*_{kB};
3. Calcular o *Gap statistic* pela seguinte definição:

$$Gap(k) = \frac{1}{B}\sum_{b=1}^{B}\log(WSS^*_{kB}) - \log(WSS_k) \tag{39}$$

4. Sendo $l = \frac{1}{B}\sum_{b=1}^{B}\log(WSS^*_{kB})$, computar o desvio padrão s_k e definir como:

$$s_k = sd_k\sqrt{1+\frac{1}{B}} \tag{40}$$

$$sd_k = \left[\frac{1}{B}\sum_{b=1}^{B}(\log(WSS^*_{kB}) - l)^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{41}$$

5. Escolher o número ótimo de *clusters* como o menor valor k dado:

$$Gap(k+1) - Gap(k) \leq s_{k+1} \tag{42}$$

Embora o método seja baseado em conceitos semelhantes aos do *elbow method*, apresenta a diferença de determinar o número ótimo de *clusters* pela maximização da diferença dos valores de WSS em escala logarítimica do conjunto de dados. Xie, Lawniczak e Gan (2022) citam uma notável limitação do método para os casos em que o banco de dados tem nível elevado de ruído. Pois as amostras devem apresentar valores muito altos de s_k. Dessa forma a Equação (42) pode ser facilmente atendida para valores pequenos de k. A Figura 30 apresenta o resultado da aplicação dos métodos para a mesma base de dados e contém o resultado que trata dessa limitação do método *Gap Statistic*, pois indica um $k = 1$ em virtude do elevado nível de ruído dos dados. Observa-se que o número k resultante da aplicação desses métodos relega ao usuário, em casos como esse, o dilema de avaliar e decidir o número devido de **clusters** tendo, contudo, uma orientação inicial por meio desses resultados (CUI et al., 2023).

2.7.4 Análise de Componentes Principais

Neste estudo os resultados gerados de agrupamento serão graficamente expressos por meio da aplicação da técnica de análise de componente principais, comumente chamada

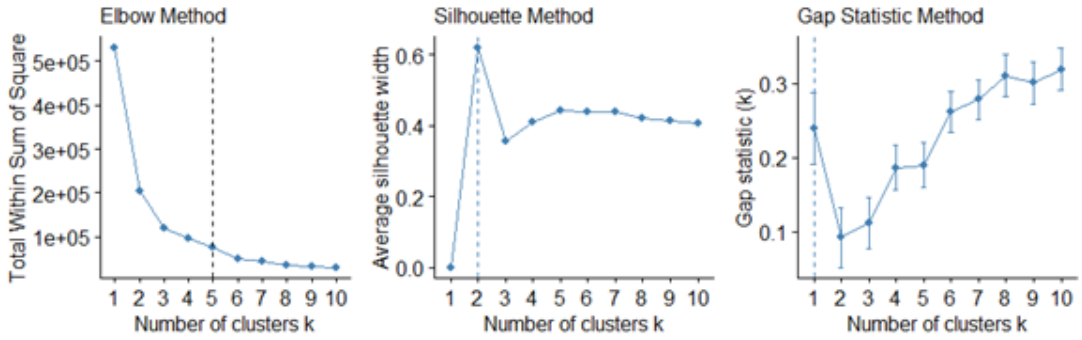
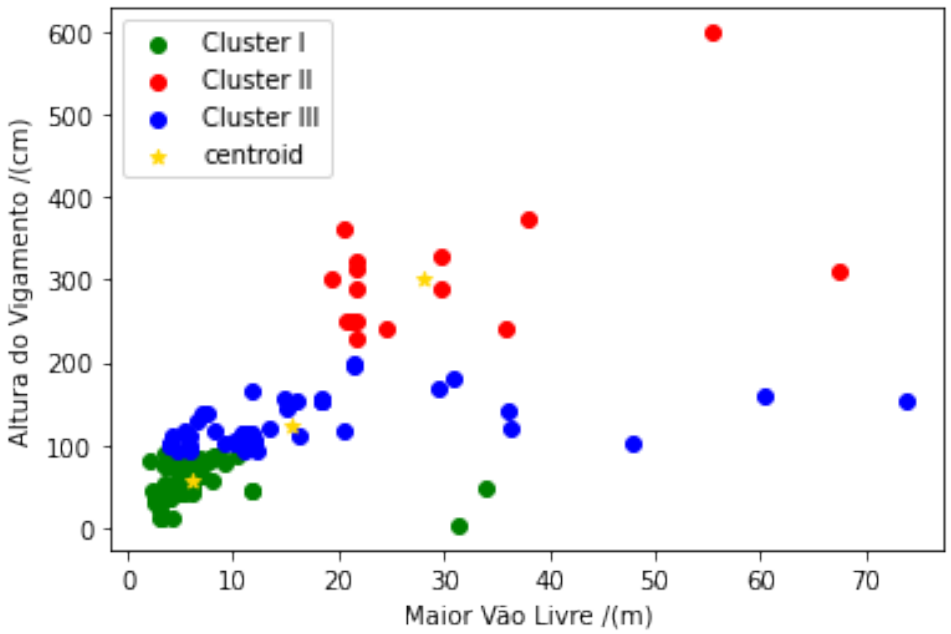


Figura 30 – Número ótimo de *clusters* com o uso dos métodos

de PCA (*Principal Components Analisys*). O objetivo da análise é explicar a estrutura de variância e covariância de vetores aleatórios, compostos de p-variáveis aleatórias. Shlens (2014) indica a ampla utilização da análise de componentes principais nas mais distintas áreas, desde a neurociência à computação gráfica. Pela sua simplicidade e capacidade de extrair informações importantes mesmo em complexos conjuntos de dados(MINGOTI, 2005).

Em certas análises pode ser interessante expressar os resultados de agrupamento em função de variáveis de interesse, como na Figura 31, cujos eixos coordenados são compostos pelas variáveis geométricas da altura do vigamento e do maior vão livre para o resultado da clusterização de um conjunto de 100 pontes. Contudo, neste estudo a representação dos resultados será de forma genérica (pelos componentes principais). Pois a priorização de certas variáveis induzirá os resultados gráficos para pontos de vista específicos de análise.

Figura 31 – Amostra de dados agrupados de 100 pontes. Fonte: autor



Normalmente, busca-se a redução do número de variáveis para facilitar a interpretação. Definindo k componentes principais (k<p) que substituem a informação contida no vetor aleatório original. Hongyu, Sandanielo e Oliveira Junior (2016, p. 83) definem:

> A ACP é uma técnica estatística de análise multivariada que transforma linearmente um conjunto original de variáveis, inicialmente correlacionadas entre si, num conjunto substancialmente menor de variáveis não correlacionadas que contém a maior parte da informação do conjunto original.

Portanto, a ideia geral é que poucos componentes (dois ou três) possam sintetizar a variação total dos p-componentes por meio da redução dimensional. Com a premissa de que as variáveis originais são correlacionadas. Caso contrário não haverá eficácia na redução dos dados (SILVA, 2016) (BRUCE; BRUCE, 2019). Algebricamente os componentes principais são casos de combinações lineares de p variáveis aleatórias $X_1, X_2, X_3 ...., X_p$. Geometricamente essas combinações representam um novo sistema de coordenadas obtido pela rotação do sistema original. Assim, dado um vetor aleatório $X = [X_1, X_2, X_3 ...., X_p]$ com matriz de covariância Σ_{pxp} e autovalores $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq ...\lambda p \geq 0$. Tem-se as combinações:

$$\begin{aligned} Y_1 &= a_1\mathbf{X} = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + a_{13}X_3 + \cdots + a_{1p}X_p \\ Y_2 &= a_2\mathbf{X} = a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + a_{23}X_3 + \cdots + a_{2p}X_p \\ &\vdots \\ Y_p &= a_p\mathbf{X} = a_{p1}X_1 + a_{p2}X_2 + a_{p3}X_3 + \cdots + a_{pp}X_p \end{aligned} \tag{43}$$

A covariância entre os valores da i-ésima e j-ésima variáveis do vetor X é definida por:

$$Cov(X_i, X_j) = \sigma_{ij} = E[(X_i - \mu_i)(X_j - \mu_j)] \tag{44}$$

Onde μ_i denota a esperança $E(X_i)$ da variável aleatória $X_i, i = 1,2,3...p$. Para o caso de muitas variáveis é mais comum utilizar a matriz de covariâncias. Sendo essa matriz simétrica, ou seja, $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ e negativa não definida (n.n.d), o que implica na positividade de seus autovalores $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_p,$. Mingoti (2005, p. 29) cita que algumas matrizes de covariâncias são positivas definidas (p.d), para as quais os autovalores de Σ_{pxp} são todos positivos, a matriz é não singular e seu determinante é maior que zero. Dessa forma, a matriz não simétrica e que não seja não negativa definida, ou positiva definida, não será uma matriz de covariância, Equação (45) .

$$Cov(X) = \Sigma_{pxp} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} & \cdots & \sigma_{1p} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} & \cdots & \sigma_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{p1} & \sigma_{p2} & \sigma_{p3} & \cdots & \sigma_{pp} \end{bmatrix} \tag{45}$$

As componentes principais são as combinações lineares de $Y_1, Y_2 ... Y_p$ cujas variâncias $Var(Y_i) = a_i^{'} \sum a_i$ são as maiores possíveis (JOHNSON; WICHERN, 2002). Assim sendo a primeira componente é a combinação linear que maximiza a variância $Var(Y_1) = a_1^{'} \sum a_1$. Dessa forma, utiliza-se as k combinações lineares principais, ao invés do vetor **X** original. Sendo que os vetores **X** e **Y** possuem as mesmas variâncias totais e generalizada. Embora

seja **Y** composto por variáveis não correlacionadas. A partir disso, define-se o ordenamento das componentes principais (MINGOTI, 2005) (JOHNSON; WICHERN, 2002).

Definição: A j-ésima componente principal da matriz Σ_{pxp}, $j = 1, 2, ..., p$, é dada pela Equação (46).

$$Y_j = e_j^{'} X = e_{j1} X_1 + e_{j2} X_2 + \cdots + e_{jp} X_p \tag{46}$$

Sendo $e_1, e_2, ..., e_p$ os autovetores normalizados associados aos autovalores λ_i e com as seguintes propriedades:

i) $e_i^{'} e_j = 0$, para todo $i \neq j$;
ii) $e_i^{'} e_j = 1$, para todo 1,2,3...,p;
iii) $\Sigma_{pxp} e_i = \lambda_i e_i$, para todo 1,2,3...,$p$.

Os valores de λ_i representam os valores de variância de uma componente principal Y_i em ordem decrescente. Assim, a proporção da variância total de X que é explicada pela j-ésima componente principal é dada pela Equação (47).

$$\frac{Var[Y_j]}{Var[X]_{Total}} = \frac{\lambda_j}{Tr(\Sigma_{pxp})} = \frac{\lambda_j}{\sum_{i=1}^{p} \lambda_j} \tag{47}$$

Caso as k primeiras componentes principais sejam explicativas o bastante sobre a variância total do vetor X, pode-se reduzir a análise em $(p - k)$ componentes do vetor aleatório $(Y_1, Y_2, ..., Y_k)$. Ou seja, apenas um conjunto k-dimensional passará a ser analisado sem perda significativa de informação do vetor original. Pelo teorema da decomposição espectral as k primeiras componentes principais aproximam a matriz de covariâncias Σ_{pxp} da Equação (48) (MINGOTI, 2005).

$$\Sigma_{pxp} \approx \sum_{j=1}^{k} \lambda_j e_j e_j^{'} \tag{48}$$

2.8 Validação de *Clusters*

Assim como é o número k de *clusters* um ponto sensível e dependente da análise/definição do responsável pelo uso dos algoritmos de agrupamento. Há também uma questão de grande importância a se responder após a saída de resultados. O quão adequados são os clusters gerados no contexto de certa base de dados. A validade da partição gerada é presente no conjunto de perguntas e desafios descritos por Jain (2010), no qual o autor cita aspectos como a concepção de um agrupamento, contribuição de outliers, valor de k e outros. Como citado nas seções anteriores, os resultados dos métodos que sugerem o número k têm dependência com a natureza do conjunto de dados. Podendo, assim, obter-se valores que são discrepantes nessa decisão (BROCK et al., 2008; Kassambara, 2017). A partir disso, é natural avaliar se os agrupamentos gerados apresentam características aceitáveis de coesão, conectividade e indepedência. Respondendo se certo grupo C_i possui em seus elementos um nível de similaridade interna indubitável quando se comparados a elementos de outros grupos. Para isso, realiza-se a validação dos *clusters*, cuja medida indica a qualidade dos agrupamentos gerados. De forma geral esse exame de validação possui duas naturezas básicas:(HASSAN et al., 2024) (AKBARPOUR; AKBARI; MOTAMENI, 2023) (JAIN; DUBES, 1988)

- **Validação interna**: medida de interrelação da homogeneidade interna dos elementos. Podendo ser influenciada pelo valor de k, o tamanho do banco de dados (registros e campos). Neste trabalho serão utilizados os métodos do coeficiente *silhouette*, conectividade e índice Dunn para validação interna.
- **Validação externa**: obtida por meio da medida comparativa dos dados de um agrupamento em relação aos dados externos (demais clusters). Trata-se, de certa forma, do quão independentes são os agrupamentos gerados.

2.8.1 Índice Dunn

Trata-se de um índice de validação interna para clusters que mede o grau de compactividade e o grau de separação dos agrupamentos (Ben Ncir; HAMZA; BOUAGUEL, 2021). É computado como:

$$D(C) = \frac{min_{1\leq i\neq j\leq m}\delta(C_i, C_j)}{max_{1\leq j\leq m}\Delta_i} \tag{49}$$

Onde os valores de δ e Δ reprentam os valores de separação entre os centróides dos clusters (50) e a compactividade (51) dos elementos internos dos agrupamentos

$$\delta_{ij} = d(v_i, v_j) \tag{50}$$

Onde v_i e v_j são os valores dos centroides de dos clusters C_i E C_j.

$$\Delta_j = max_{x_i, x_j \in C_J} d(x_i, x_j) \tag{51}$$

Sendo x_ie x_j todas os pares de distâncias no *cluster* J.

2.8.2 Conectividade

Seja N o total de registros em um banco de dados e M o total de campos (todos numéricos). Define-se medidas de vizinhos mais próximos para cada elemento i de certo cluster C_i como $nn_{i(j)}$ e $x_{i,nn_{i(j)}}$ como zero caso i ej pertençam ao mesmo *cluster* e em caso contrário $1/j$. Então, a partir de uma configuração gerada de agrupamentos $C = C_1, C_2, C_3,...C_k$, a conectividade é definida por (52). Nessa definição a conectividade pode apresentar valor entre 0 a ∞ para um dado número de *clusters* vizinhos L.

$$Conn(C) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{L} x_{i,nn_{i(j)}} \tag{52}$$

3 Metodologia

As premissas deste trabalho de se estudar as condições de seleção de subconjunto de pontes ferroviárias para inspeção/manutenção são associadas ao nível de qualidade dos dados e dependentes das ferramentas matemáticas/computacionais definidas para estudo. Adiante busca-se detalhar características como origem dos dados de simulação, os tratamentos aplicados aos dados, asserções sobre o modelo utilizado para otimização e classificação. Além disso, pretende-se explanar as considerações aplicadas na modelagem e suas conexões ao problema real de engenharia (BAPTISTA; CAMPOS, 2016) (JAAFARU; AGBELIE, 2022). Nas simulações de otimização foi utilizado a linguagem de programação Julia versão 1.6.1 e compilador CPLEX. A parte relativa ao agrupamento de dados foi desenvolvida em linguagem R versão 4.4.1 utilizando RStudio 2024.04.2+764 e Python 3.10.12 com o uso da plataforma Anaconda e IDE (*Integrated Development Environment*) Spyder 4.1.4. Nas simulações de agrupamento (clusterização) foi utilizado o algoritmo k-means e para os dados com registros completos e aplicou-se os métodos *elbow method*, *silhouette method* e *gap statistic method* a fim de obter valores do número k de *clusters*.

3.1 Delineamento da pesquisa

A natureza da pesquisa aplicada proposta neste trabalho é voltada para a contribuição direta de processo de gerenciamento de pontes ferroviárias com o uso de ferramentas/tecnologias consolidadas. Contudo, sem se distanciar dos objetivos propostos de contribuir em inovação com a área de manutenção e gestão ferroviária de ativos de infraestrutura.

Inicialmente buscou-se identificar as características descritivas das OAE que compõem os bancos de dados e a integridade dos seus registros. Nesta etapa, levanta-se a frequência de informações características como idade das pontes, número de vãos, extensão total, material da superestrutura etc. Trabalhos como de Dromey et al. (2020) e Santos et al. (2022b) indicam algumas possibilidades de estratificação dos dados de inventários de pontes em diferentes realidades.

Primeiramente, aplicar-se-á a ferramenta de agrupamento a dois bancos de dados de ferrovias brasileiras que possuem características distintas. Destaca-se a quantidades de ativos, os campos de cadastro e o número de registros com maior integridade; como pontos de notáveis diferenças entre os conjuntos de dados. Nas simulações de agrupamento foi utilizado o algoritmo k-means e para os dados com registros completos aplicou-se os métodos *elbow method*, *silhouette method* e *gap statistic method* a fim de obter valores do número k de *clusters* (Yang; Frangopol; Teng, 2019).

A ferramenta de otimização do conjunto de dados é aplicada ao banco de dados com menor quantidade de pontes, uso de valores de índices de condição (IC) e menor número de dados faltantes. Entende-se que essa premissa colabora com:

1. Maior aderência aos aspectos orçamentários práticos de engenharia;
2. Maior clareza na exposição dos resultados em relação aos *clusters* e aos valores de IC.

Em função da natureza multidimensional dos dados ($n > 2$), os gráficos de formação de *clusters* são estabelecidos por redução de dimensionalidade via PCA *(principal componentes analisys)*, gerada pelo método de visualização (fviz_cluster()[factoextra package] da IDE RStudio (Kassambara, 2017).

3.2 Coleta e tratamento de dados

3.2.1 Banco de Dados I

O banco de dados contém registros de 115 pontes com o total de 51 campos de cadastro, guardando certa equivalência aos principais dados de coleta da ficha do Anexo A da NBR 9452. As diferenças, em parte, se devem a certas particularidades das pontes ferroviárias e a campos referentes a campos específicos de natureza interna e/ou gerencial. O banco de dados, portando, conta somente com registros de natureza cadastral, impossibilitando assim qualquer análise relativa ao estado de conservação das pontes. Neste tópico serão apresentadas algumas informações consideradas mais relevantes sobre os registros contidos no banco de dados e mais aplicadas ao estudo. Contudo, maiores informações descritivas podem ser observadas no Apêndice D Anexo B.

O conjunto de pontes apresenta um total de 62 pontes construídas na primeira fase de implantação da ferrovia ($\approx$ 54 % do total), no início da década de 1980. Enquanto as demais pontes são relativas ao período de duplicação da linha, pós ano de 2005, Figura 32. Por se tratar de um campo de registro muito importante no nível de desempenho, a distribuição de idades dos ativos pode indicar que, em termos de deterioração, a ferrovia deve apresentar quadro consideravelmente heterogêneo em suas OAE. Contudo, existem outros fatores que devem ser considerados nessa asserção. Como o nível de manutebilidade aplicada ao longo da vida útil das pontes, padrão de qualidade da execução das obras, ações de conservação e reparo, campanhas de monitoramento etc.

Outra característica de grande interesse em estudos de pontes é o tipo de material utilizado na superestrutura desses ativos. É definido no texto da NBR9452 ABNT (2023b) que superestrutura é "*conjunto de elementos destinados a receber as cargas permanentes e acidentais, e transferi-las à mesoestrutura ou diretamente a infraestrutura*". Ou seja, trata-se dos elementos que estão mais propensos às ações diretas dos carregamentos e suas possíveis variações e impactos. A distribuição dos materiais usados na superestrutura está apresentada na Figura 33, com grande presença de pontes de concreto e mistas.

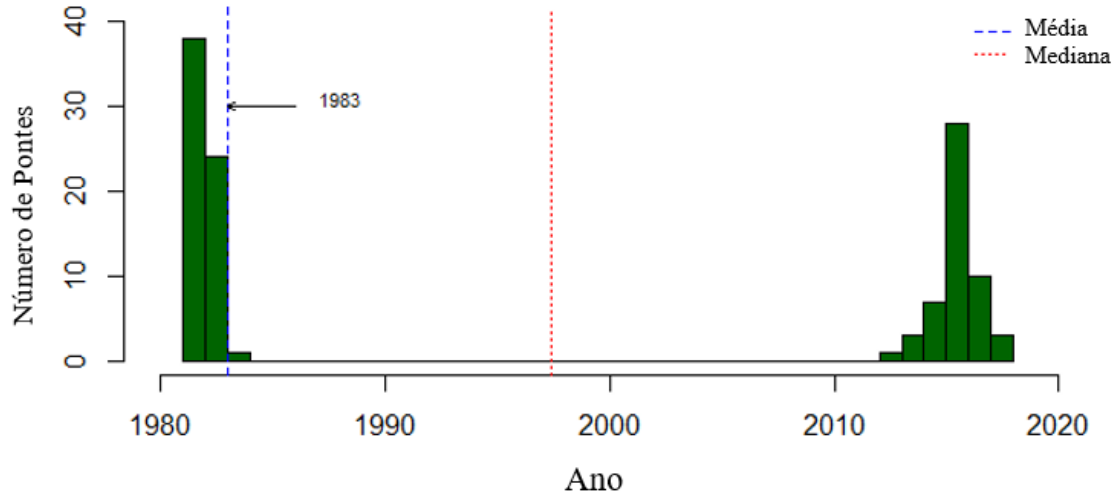


Figura 32 – Distribuição de pontes por ano de implantação.

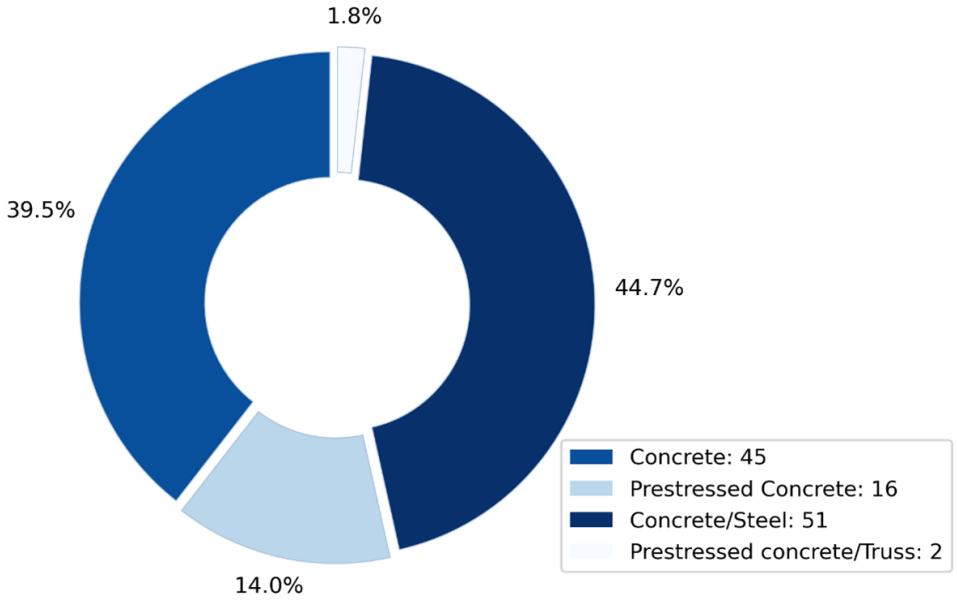


Figura 33 – Distribuição de pontes por material da superestrutura.

A Figura 34 apresenta a distribuição das pontes com os valores registrados de comprimento total e de quantidade de vãos, sendo mais frequente as pontes com até 7 vãos. Outro dado relevante trata do valor de maior vão, pois é medida fundamental para determinação diversos aspectos dimensionais da estrutura. Observa-se que há preponderância para maiores valores de vãos em torno 25 metros de comprimento, Figura 35.

Como citado na Seção 2.5, cadastros de pontes ferroviárias tendem a apresentar campos específicos e particularmente desenvolvidos para as diferentes realidades das concessionárias brasileiras. Em virtude de questões relacionadas à tomada de decisão no nível gerencial as companhias, ao longo do tempo, desenvolveram métricas próprias para classificação e priorização de manutenção em ativos. Matrizes de priorização baseadas em conceitos

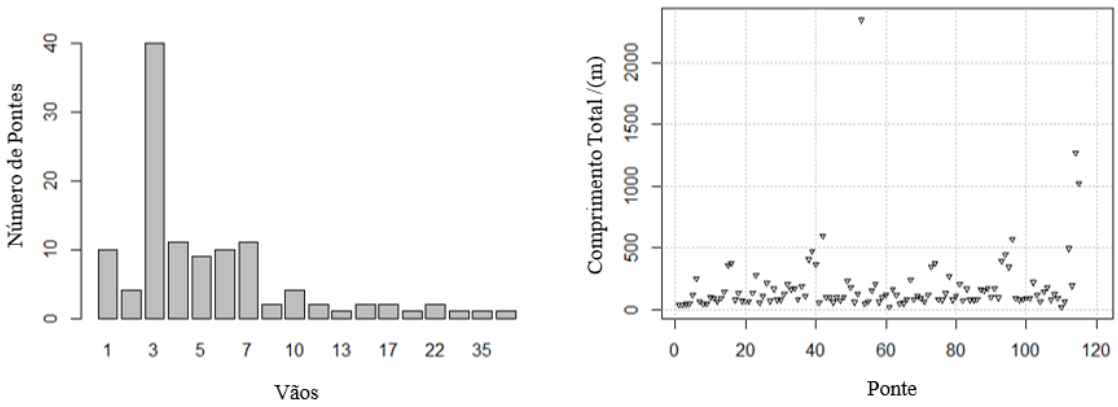


Figura 34 – Quantidade de pontes por número de vãos e extensão total das pontes.

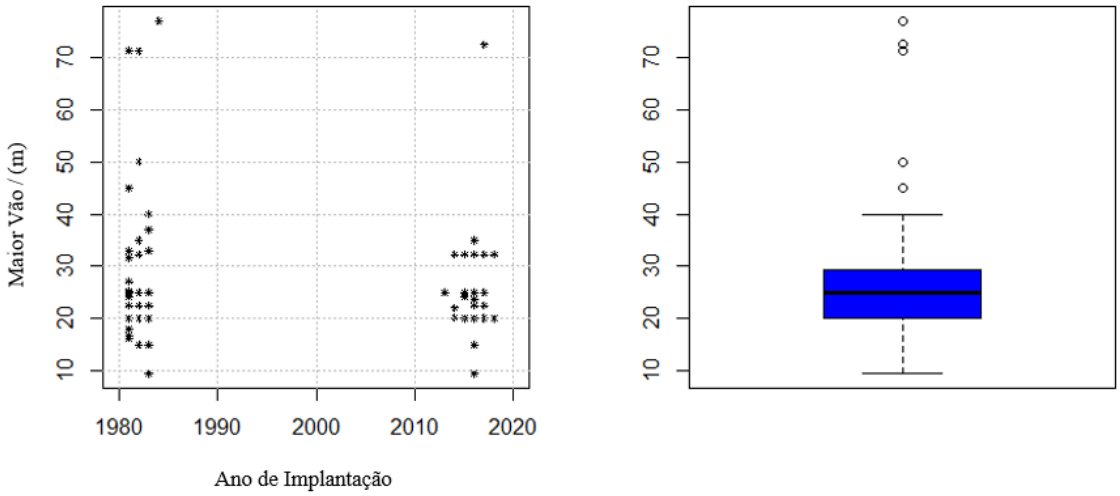


Figura 35 – Distribuição dos valores de maiores vãos em função da idade.

de criticidade e/ou severidade foram incorporadas à realidade de gestão ferroviária no Brasil. No caso em estudo há o campo de criticidade que possui 4 possíveis níveis de classificação, aqui representados numericamente (1, 2, 3 e 4). Não cabendo neste trabalho considerar as asserções que deram origem a essa classificação, mas apenas investigar por meio das ferramentas propostas a sua contribuição nos agrupamentos gerados pelo algoritmo K-means. A Figura 36 apresenta distribuição das pontes e a classificação da criticidade em função do ano de implantação.

As simulações de clusterização nos dados de 115 pontes confrontam o aspecto bastante comum nos bancos de dados de OAE, a ausência de informações básicas em alguns registros. Para este estudo foi realizada a seleção de 18 campos dos itens de cadastro da NBR 9452 que estão presentes nos registros de inspeções rotineiras das pontes. Os critérios de filtragem a serem estabelecidos são baseados na abordagem *top down*, a fim de priorizar os conjuntos de dados com maior número de registros íntegros. O gráfico da Figura 37 apresenta o extrato da relação de dados faltantes na base de dados utilizada para simulação. Os campos utilizados

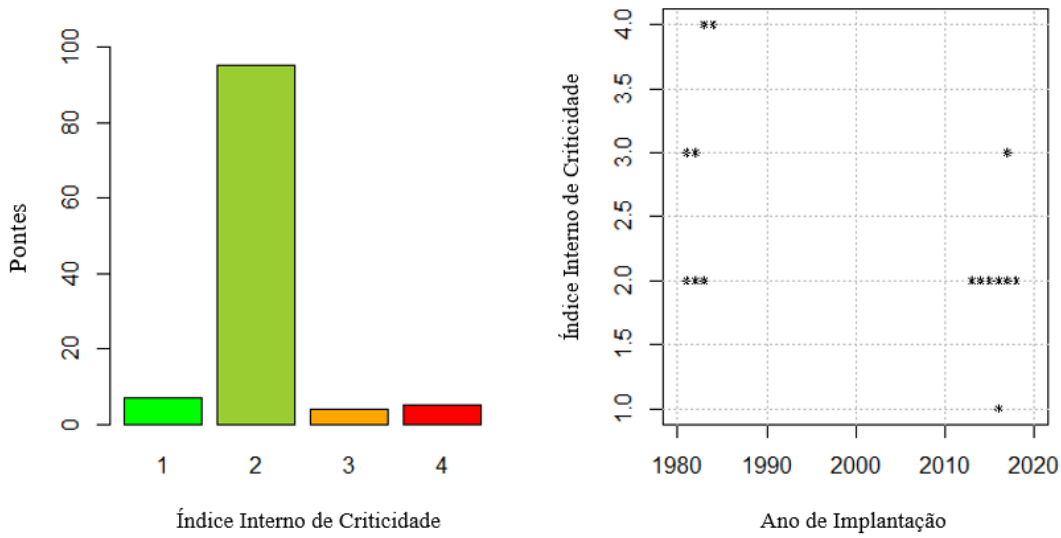


Figura 36 – Quantidade de pontes por classificação de criticidade e distribuição em função do ano de implantação.

para simulação estão detalhados em descrição, tipo e relação com a NBR 9452 na Tabela 2, sendo os percentuais apresentados relativos ao total de pontes.

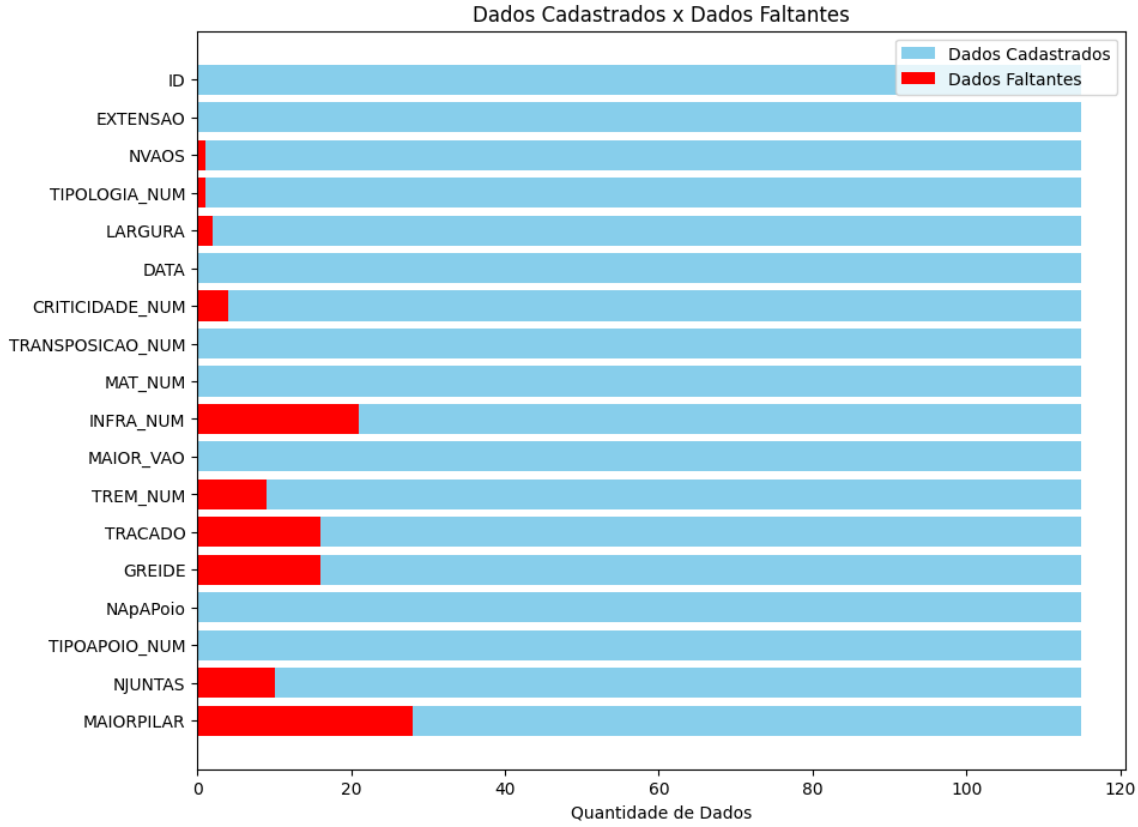


Figura 37 – Dados Faltantes

A Tabela 3 contém os percentuais mais expressivos de dados faltantes nos campos utilizados nas simulações. Pode-se observar que os campos com maior ausência de informações

Nome	**Descrição**	**Tipo**	**NBR9452**
km	Localização	*float*	Tabela A.1
EXT	Extensão total da ponte	*float*	Tabela A.1 e D.1
NVAOS	Número de vãos	*integer*	Tabela A.1 e D.1
TIPOLOGIA	Tipo da Superestrutura	*string*	Tabela A.2
LARGURA	Largura da Superestrutura	*float*	Tabela A.1 e D.1
DATA	Data de Implantação	*integer*	Tabela A.1
CRITICIDADE	Criticidade interna	*integer*	-
TRANSPOSICAO	Natureza da transposição	*string*	Tabela A.4
MAT	Material da Superestruturas	*string*	Tabela A.5
INFRA	Tipologia da Infraestrutura	*string*	Tabela A.2
MAIOR_VAO	Maior vão	*float*	Tabela A.1
TREM	Trem tipo de projeto	*string*	Tabela A.1
TRACADO	Traçado horizontal	*string*	Tabela A.1-C
GREIDE	Perfil longitudinal	*float*	Tabela A.1-C
N_AP_APOIO	Quantidade de aparelhos de apoio	*integer*	Tabela A.1
TIPO_APOIO	Tipologia dos aparelhos de apoio	*string*	Tabela A.1
NJUNTAS	Número de juntas de dilatação	*integer*	Tabela A.1 e D.1
MAIOR_PILAR	Altura do maior pilar	*float*	Tabela A.1

Tabela 2 – Dados utilizados do Banco de Dados I

podem ser tratados com ajustes dos valores em simulações posteriores. A princípio, portanto, foram realizadas simulações para um total de 65 registros de cadastros completos das pontes a fim de se obter os agrupamentos. Na segunda fase de simulação, os dados foram tratados a fim de se obter resultados relativos ao total de pontes cadastradas. Os campos de dados faltantes foram preenchidos com valores médios após a conversão dos campos categóricos para tipo numérico e padronização dos valores.

Campos	**% dados faltantes**
Largura	1,7
Traçado	13,9
Maior Pilar	17,6
Infraestrutura	18,3
Greide	13,9
Nº de Juntas	9,6
Trem Tipo	7,8

Tabela 3 – Valores percentuais de dados faltantes

A quantidade de *outliers* observada nos campos de interesse do banco de dados não é percentualmente relevante, como pode ser observado na Figura 35 e 34. Contudo, esses valores extremos foram substituídos pelas médias (μ) das colunas às quais pertencem. Para aplicação do algoritmo K-means os dados foram padronizados com o uso da função *scale()* do R, que consiste na razão da diferença dos valores em relação à média μ pelo desvio padrão dos registros.

3.2.2 Banco de Dados II

A segunda base de dados utilizada neste trabalho, doravante chamada banco de dados II, contém um total de dados de cadastro de 3292 pontes ferroviárias de variadas tipologias. Os dados são baseados no itens de cadastro da NBR 9452 e nos registros de inspeções rotineiras das pontes. Os critérios de filtragem a serem estabelecidos são baseados na abordagem *top down*, a fim de priorizar os conjuntos de dados com mais registros históricos de inspeções. Os dados de distribuição das idades das pontes do banco de dados estão apresentados na Figura 38. Observa-se que a concessionária possui algo em torno de 23% (753 pontes) dos dados referentes ao ano de construção dos seus ativos e que, desse percentual, mais de 80% foram contruídas há mais de 40 anos. Ressalta-se que essa informação talvez seja a mais relevante no contexto do estudo de deterioração das pontes e o quadro encontrado reflete bem a realidade das informações das ferrovias brasileiras.

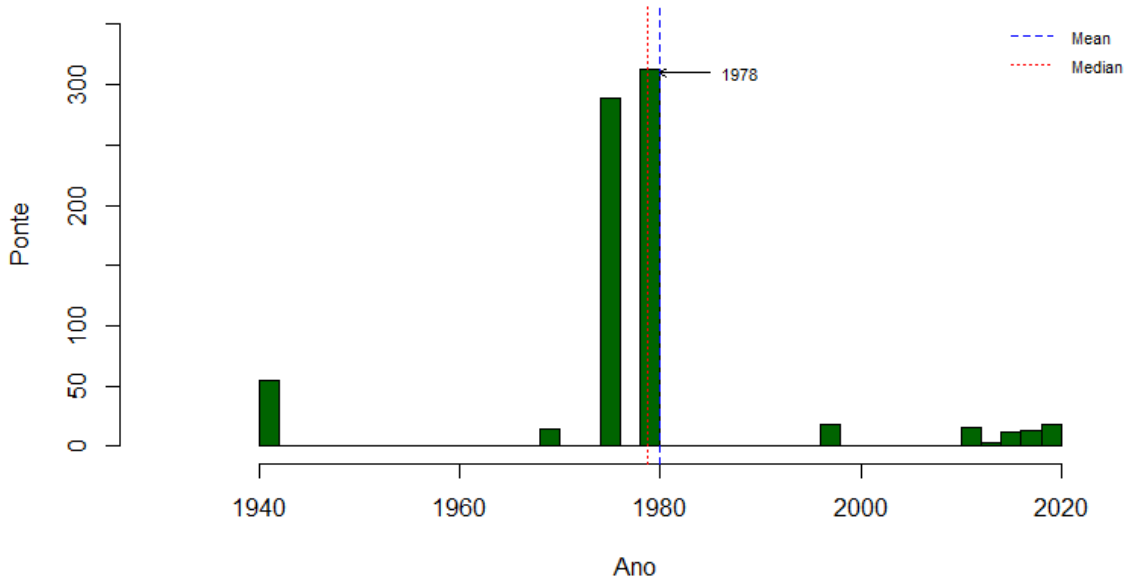


Figura 38 – Distribuição de pontes por ano de implantação

Os valores de extensão em relação ao ano de construção das pontes estão apresentados na Figura 39 e a distribuição do número de vãos das pontes na Figura 40

O banco de dados conta com um total de 69805 itens de cadastro de anomalias de diversos elementos estruturais considerando os parâmetros da NBR 9452 (Estrutural, Funcional e Durabilidade). Para o ano de 2021 contabiliza-se 46082 registros de anomalias, sendo 2717 para anomalias classificadas como notas 1 ou 2 (casos mais críticos). Essas anomalias de maior severidade estão localizadas em 132 estruturas do conjunto de pontes. A Figura 41 apresenta um percentual pouco inferior a 6% para anomalias mais críticas no ano

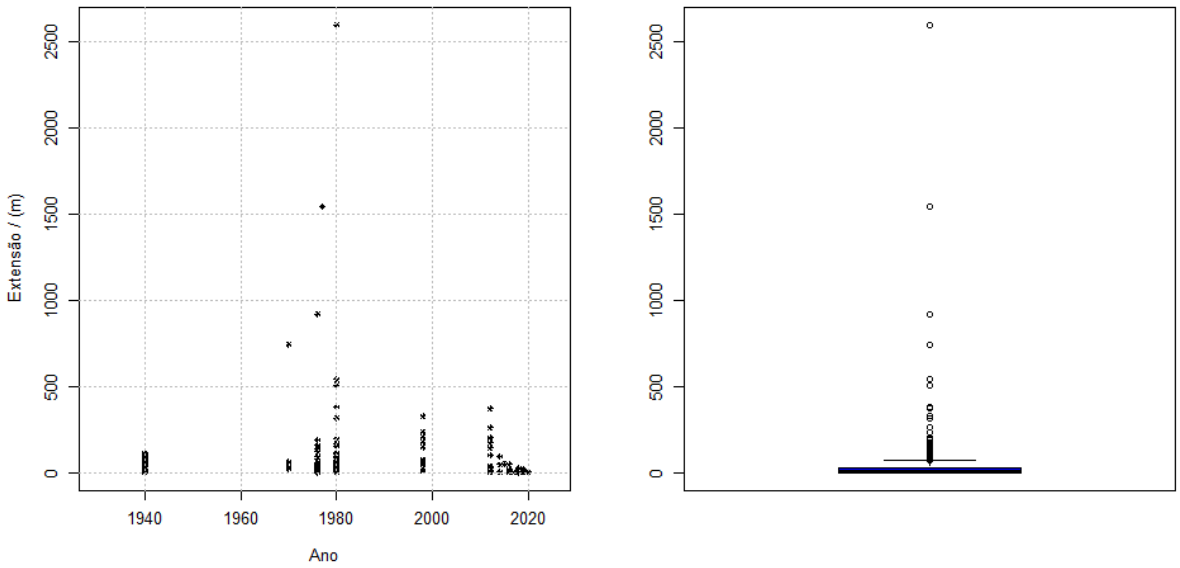


Figura 39 – Distribuição dos valores de extensão em função do ano de implantação

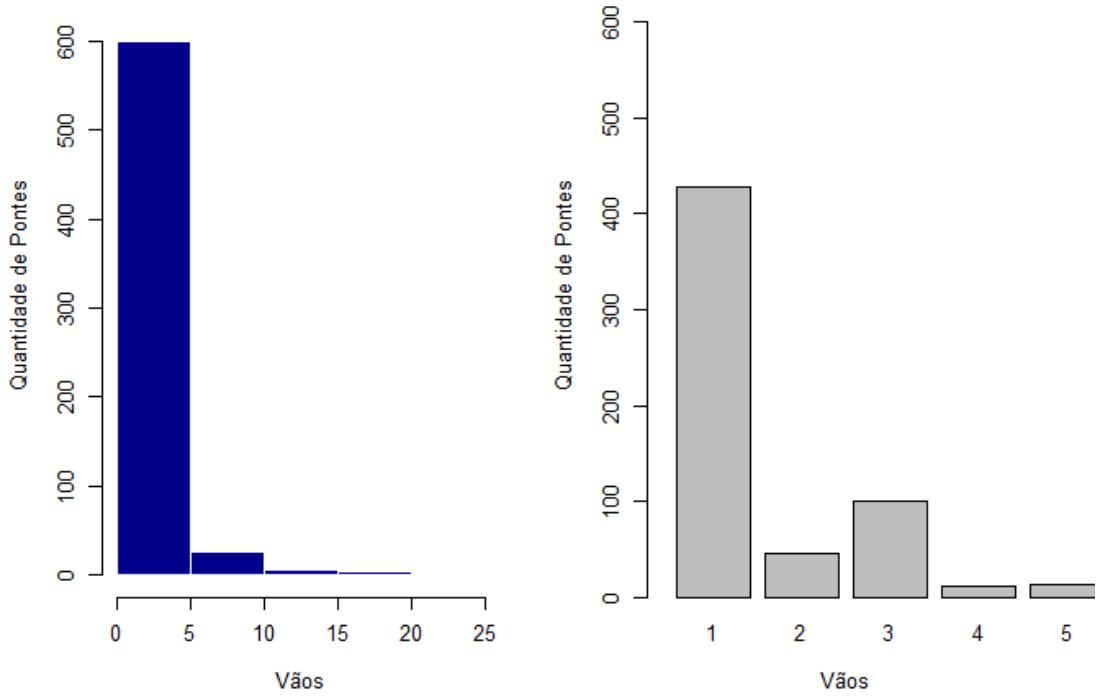
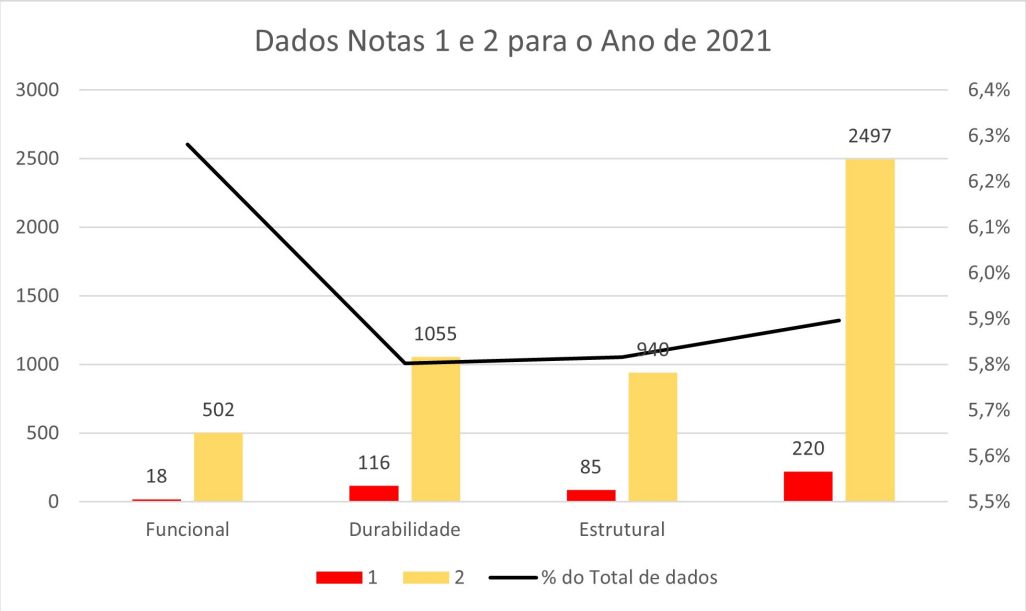


Figura 40 – Distribuição de Vãos

de 2021. Os dados fornecidos pela concessionária dependem ainda de maior entendimento de certos campos e formas de registros. Principalmente nos formatos definidos para anomalias,

Figura 41 – Anomalias classificadas como nota 1 e 2 para o ano de 2021



apresentando metodologia individualizada e tratamento mais refinado para relacionar os dados coletados com cada ativo do conjunto de pontes. Contudo, neste trabalho apenas os dados relacionados a cadastro serão utilizados a fim de se permitir um comparativo da aplicação da metodologia aos dois bancos de dados utilizados.

Os campos do banco de dados II utilizados neste estudo estão detalhados na Tabela 4 quanto a descrição, tipo e presença na NBR 9452.

Nome	**Descrição**	**Tipo**	**NBR9452**
Ponte	Identificação	*integer*	Tabela A.1
Ferrovia	Código do trecho	*integer*	Tabela A.1
NVAOS	Número de vãos	*integer*	Tabela A.1 e D.1
TIPOLOGIA	Tipo da Superestrutura	*string*	Tabela A.2
Comprimento	Extensão da Ponte	*float*	Tabela A.1 e D.1
DATA	Data de Implantação	*integer*	Tabela A.1
Idade	Tempo de utilização	*integer*	-
Estrado	Posição do estrado	*string*	-
MAT	Material da Superestruturas	*string*	Tabela A.5
INFRA	Tipologia da Infraestrutura	*string*	Tabela A.2
MAT_ENCONTROS	Material dos encontros	*string*	Tabela A.1
TREM	Trem tipo de projeto	*string*	Tabela A.1
CONTRATRILHOS	Existência de contratrilhos	*string*	Tabela A.1-B.1
BITOLA	Tipo de bitola	*string*	Tabela A.1
N_AP_APOIO	Quantidade de aparelhos de apoio	*integer*	Tabela A.1
TIPO_APOIO	Tipologia dos aparelhos de apoio	*string*	Tabela A.1
GUARDA_CORPO	Existência de guarda-corpo	*string*	Tabela A.1 e D.1
N_PILAR	Número de Pilares	*integer*	Tabela A.1
MAT_PILAR	Material dos pilares	*string*	Tabela A.1

Tabela 4 – Dados utilizados do Banco de Dados II

O banco de dados apresenta um extrato de dados faltantes bem mais deficitário, Figura 42, em relação ao banco de dados I. Essa característica, em geral, é originada por vários fatores relacionados à gestão de ativos. Desde trechos ferroviários concessionados em períodos distintos, ampliação de atividade, alterações na forma de registro de dados, perda de arquivos e outros. Pela consideração dos campos íntegros de idade das pontes os percentuais de dados faltantes são apresentados na Tabela 5, sendo esses os percentuais tratados com base no total de 753 pontes. Os valores de *outliers* observados e a padronização utilizada para o banco de dados I foi replicada também nessa base de dados. Ou seja, o mesmo procedimento foi mantido para o tratamento dos dados.

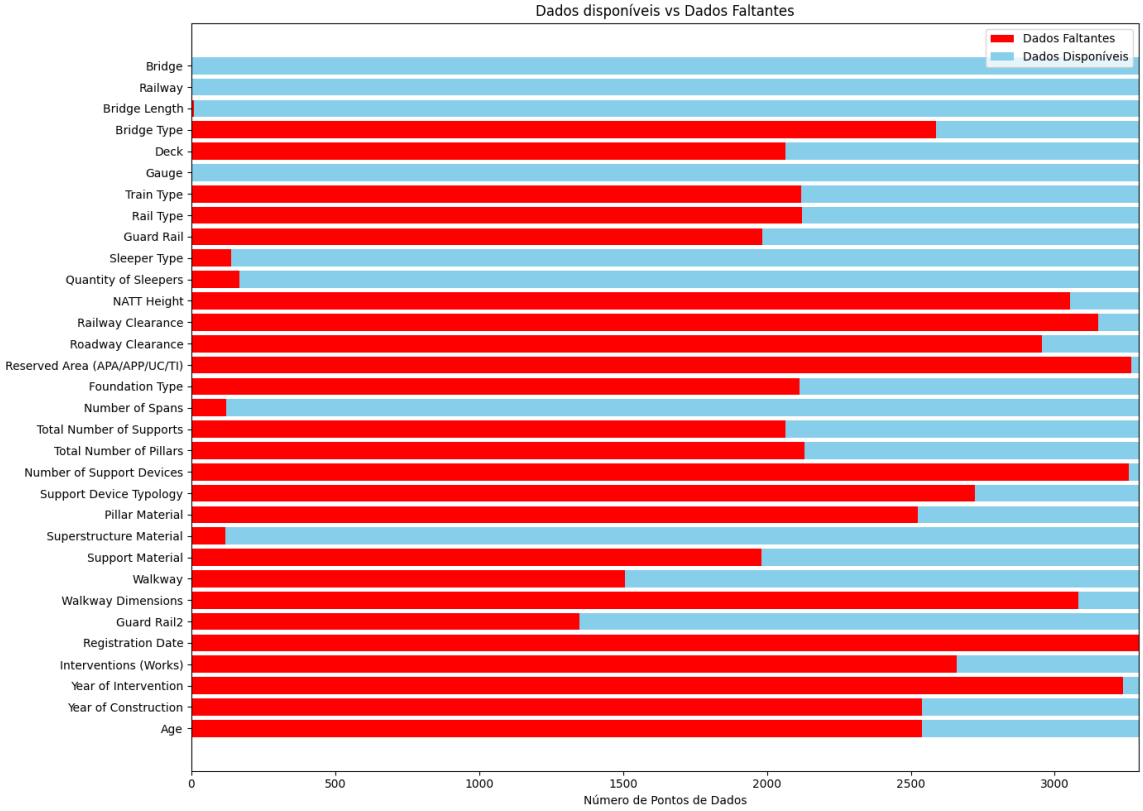


Figura 42 – Dados Faltantes

Campos	**% dados faltantes**
Número de Pilares	15,8
Guarda Corpo	20,8
Material dos Encontros	16
Material da Superestrutura	15
Tipo de Apoio	17,3
Contratrilho	15,8
Trem Tipo	17
Estrado	17,1
Tipologia da Ponte	16,5

Tabela 5 – Valores percentuais de dados faltantes

3.3 Análise de Agrupamentos

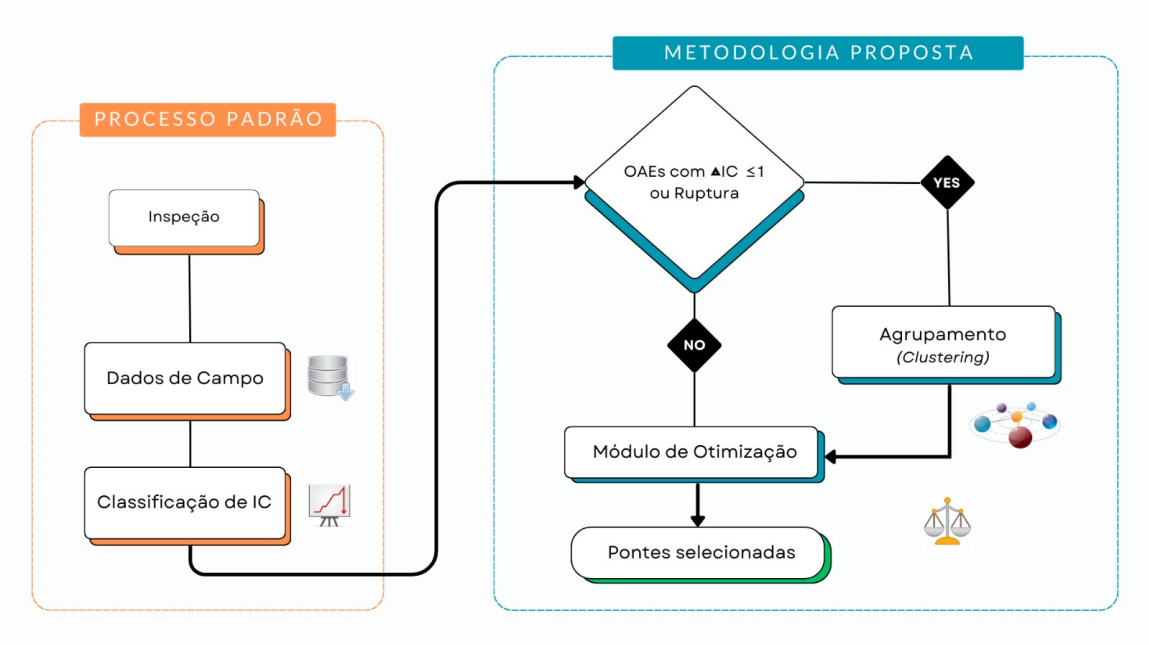
A abordagem de agrupamento proposta neste trabalho, incialmente, considerava os aspectos estáticos (ou quase estático) e dinâmicos dos dados das pontes ferroviárias obtidos via inspeções técnicas, sejam categóricos ou numéricos. Em geral, os dados de cadastro definidos na NBR 9452 são de natureza estática, pois em condições normais apenas se alteram em intervenções realizadas nas pontes para reforço, recuperação ou adaptação dos elementos classificados como principais, secundários e complementares (ABNT, 2023b).

Em cenário ideal, no qual os dados de IC são catalogados a cada ciclo de inspeção, a configuração formada de *clusters* pode se alterar em virtude das mudanças previstas de degradação identificadas após um ciclo de inspeções técnicas. Entendo-se que os valores de classificação são variáveis contidas nos campos da clusterização. Uma possível sugestão em condições adequadas de obtenção de dados seria o procedimento da Figura 43 para a realização completa de uma metodologia que promoveria a conexão entre as ferramentas utilizadas neste trabalho (clusterização e otimização) e a premissa básica de comportamento estrutural das pontes ao longo dos tempos de vida útil.

No entanto, em virtude das condições precárias dos dados, no contexto deste estudo ainda não é possível aplicar a metodologia em sua forma plena. Na qual, após a clusterização inicial, poder-se-ia realizar novas simulações após as atualizações da base de dados. Assim, a partir de novas configurações de *clusters*, rodar instâncias atualizadas da formulação de otimização.

Assim sendo, procurou-se manter o foco das simulações considerando os dados de cadastro disponíveis nos bancos de dados. Para os agrupamentos foram definidos dois tipos de simulação. O primeiro, sem uso de dados faltantes (*data missing*) e um segundo com tratamento dos dados citados anteriormente.

Figura 43 – Fluxograma de Metodologia Proposta.



3.3.1 Roteiro para simulação do tipo I

(I) Identificação dos campos presentes nos bancos de dados que estejam presentes ou sejam equivalentes aos campos de cadastro da NBR 9452 ABNT (2023b);
(II) Seleção de registros via critério de maior quantidade de dados considerando os registros de *Idade* ou *Tempo de Implantação* como base para o conjunto de dados presentes;
(III) Tratamento de valores extremos (*outliers*) e padronização dos dados (*scale*);
(IV) Definição do número k de *clusters* por meio dos métodos *Elbow, Silhoutte e Gap Statistic*;
(V) Obtenção dos *clusters* gerados pelo algoritmo K-Means para a faixa de valores de k definidos no passo anterior.

3.3.2 Roteiro para simulação do tipo II

(I) Identificação dos campos presentes nos bancos de dados que estejam presentes ou sejam equivalentes aos campos de cadastro da NBR 9452 ABNT (2023b);
(II) Seleção de registros via critério de maior quantidade de dados considerando os registros de *Idade* ou *Tempo de Implantação* como base para o conjunto de dados presentes;
(III) Identificação dos percentuais de dados faltantes e complementação via valores médios obtidos para cada campo;
(IV) Tratamento de valores extremos (*outliers*) e padronização dos dados (*scale*);
(V) Definição do número k de *clusters* por meio dos métodos *Elbow, Silhoutte e Gap Statistic*;
(VI) Obtenção dos *clusters* gerados pelo algoritmo K-Means para a faixa de valores de k definidos no passo anterior.

3.3.3 Validação de *Clusters*

Neste trabalho a validação interna dos *clusters* será realizada com a aplicação dos índices disponíveis no pacote R*[clValid]*[1] por meio das respostas do índice Dunn, *Silhoutte Width* e Conectividade. Além desses métodos amplamente aplicados na bibliografia (JAIN, 2010; AKBARPOUR; AKBARI; MOTAMENI, 2023), decidiu-se avaliar o comportamentos de formação dos agrupamentos à medida que se aumenta os valores de k. Ou seja, pretende-se analisar a integridade dos grupos ao se modificar a formação com a variação do valor de k. É de se esperar que *clusters* de qualidade devam manter a coesão de seus elementos sem perder a sua composição inicial de forma acentuada.

[1] Contéudo disponível em: https://cran.r-project.org/web/packages/clValid/vignettes/clValid.pdf

3.4 Formulações de Otimização

Inicialmente propõe-se duas formulações básicas para a tratativa de seleção de pontes, faz-se paralelo com dois trabalhos de referências. Almeida et al. (2023) com a abordagem de *scores* aplicados à função objetivo e o trabalho de otimização multicritério para pontes de Jaafaru e Agbelie (2022). Assim, estabeleceu-se as formulações com os parâmetros de custos unitários de manutenção/inspeção e níveis de prioridade com base nas premissas seguintes:

- ✓ O gerenciamento é de um conjunto heterogêneo de ativos;
- ✓ Os recursos financeiros são menores que a demanda total para atender as necessidades de manutenção/inspeção de todas as pontes;
- ✓ O limite orçamentário é definido por natureza dos critérios de engenharia;
- ✓ O conjunto a ser inspecionado deve atender aos limites mínimos da classificação de prioridade técnica;
- ✓ O objetivo é inspecionar o maior número possível de pontes dadas as restrições.

Em virtude da representação dos resultados e da maior integridade dos dados, o banco de dados I foi priorizado par as simulações. Sendo que para tal foi estabelecido, *a priori*, que a lógica de otimização deveria seguir um aspecto cumulativo dos conceitos aplicados. Dessa forma, na primeira formulação é aplicada a prioridades internas hipotéticas (P1, P2 e P3). Na segunda formulação os índices de condição (IC) são utilizados nos vetores de ganhos das funções objetivos. Nas simulações os parâmetros foram utilizados como expoentes dos valores individuais de IC .

3.4.1 **Formulação I**

- Nessa formulação insere-se restrições que contêm a estratificação das limitações orçamentárias que podem ser motivadas por diversas questões. Como localidade da ferrovia, relevância da ponte e o atendimento da quantidade mínima de pontes a serem inspecionadas por planejamento de priorização. De forma geral, no planejamento de inspeções é comum se estabelecer quantidades mínimas de pontes que devem ser inspecionadas em certo período de atividade. Por exemplo, pode-se definir que todas as pontes com maior índice de prioridades devem ser inspecionadas durante o cronograma de atividades. Um exemplo de instância dessa formulação é apresentado no Apêndice C. Define-se, pois, os seguintes parâmetros e variáveis:

Parâmetros:

- a_i: custo de inspeção da ponte i de maior prioridade;
- c_j: custo de inspeção da ponte j de prioridade média;
- d_l: custo de inspeção da ponte l de menor prioridade;
- b: limite de orçamento disponível para inspeções;
- $N1$: Número mínimo de pontes com prioridade máxima (P1) a serem inspecionadas;
- $N2$: Número mínimo de pontes com prioridade média (P2) a serem inspecionadas;

- $N3$: Número mínimo de pontes com prioridade mínima (P3) a serem inspecionadas;
- (n, m, p): quantidades de pontes por prioridade.

Variáveis:

- x_i: indica se a ponte i de máxima prioridade será inspecionada;
- y_j: indica se a ponte j de prioridade média será inspecionada;
- k_l: indica se a ponte l de mínima prioridade será inspecionada.

Para a função objetivo Φ:

$$maximimizar \quad \Phi(x_i, y_j, k_l) = \sum_{i=1}^{n} \alpha x_i + \sum_{j=1}^{m} \beta y_j + \sum_{l=1}^{p} \gamma k_l \tag{53}$$

$$s.a.: \quad \sum_{i=1}^{n} a_i x_i + \sum_{j=1}^{m} c_j y_j + \sum_{l=1}^{p} d_l k_l \leq b \tag{54}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_i \geq N1 \tag{55}$$

$$\sum_{j=1}^{m} y_j \geq N2 \tag{56}$$

$$\sum_{l=1}^{p} k_l \geq N3 \tag{57}$$

$$x_i, y_j, k_l \in \{0, 1\} \tag{58}$$

A função objetivo (53) desta formulação estabelece que o vetor de ganhos da função objetivo seja unitário, pois o interesse é gerar maior quantidade de pontes sem associar a outro parâmetro do problema, mas com a estratificação em três níveis de prioridade. A restrição (54) trata do custo total por prioridade limitada a b. As restrições (55), (56) e (57) garantem que as quantidades mínimas/obrigatórias de pontes com as devidas priorizações sejam atendidas. Nesta formulação, os casos nos quais os coeficientes dos termos da função objetivo são iguais a 1 tem-se um caso de ordenação. No qual as pontes com menores valores de custos na restrição (54) são selecionadas até que as quantidades P_i sejam atendidas e, posteriormente, as demais pontes de menores custos do conjunto.

3.4.2 Formulação II

A fim de se propor critérios que possam atender às demandas mais comuns e possíveis das ferrovias, foram realizadas simulações nas quais os benefícios da função objetivos sejam relacionados a certo dado de interesse. Por obviedade, os valores registrados da classificação

das pontes, conforme NBR 9452, são os de maior interesse quando se busca estabelecer critérios de manutenção. Contudo, outros critérios internos podem ser utilizados para atender demandas específicas das realidades práticas de engenharia. Neste estudo os valores de referência serão índices de condição ou prioridades denominados IC. Em semelhança à escala de notas proposta na NBR 9452 serão utilizados valores equivalentes em cardinalidade e conceituação. Ou seja, valores menores indicam elevada necessidade de manutenção. Assim, define-se a equivalência para $\gamma = \{1,2,3,4,5\}$ citada em Almeida et al. (2023) aos IC individuais das pontes. Os índices λ utilizados são relativos a $n = 3$.

Nesta simulação propõe-se o uso mais direto do campo decisório utilizado na função objetivo, $\Phi(x_i)$. Para tal, o vetor de ganhos p_i é constituído pelas potências $\lambda = \{1,2,3\}$ dos índices de condições das n pontes, conforme Equação (59).

$$p_i = \sum_{i=1}^{n} IC_i^{\lambda} \tag{59}$$

Dessa forma, a fim de se priorizar a seleção das pontes associadas a menores valores de IC (em virtude da escala da NBR 9452), têm-se:

$$minimizar \quad \Phi(x_i) = \sum_{i=1}^{n} p_i x_i \tag{60}$$

$$s.a.: \quad \sum_{i=1}^{n} c_i x_i \leq b \tag{61}$$

Pela formulação proposta a minimização da função objetivo ($\Phi(x_i)$) engendrará seleções de pontes com menores valores de IC. Essa tendência é vantajosa sob a ótica de se priorizar as pontes que, por meio das inspeções e definições de engenharia, apresentam níveis de desempenho distantes do ideal das estruturas. A princípio, essa formulação procura atender e resguardar o caráter técnico oriundo dos gestores de pontes. Espera-se, pois, que as instâncias dos diferentes valores de λ produzam seleções de pontes que sejam compostas por menores valores de IC. No entanto, apresentem certo grau de distinção para que permitam a possibilidade de se aplicar a diferentes contextos de manutenção. Podendo atender demandas gerais e específicas por meio do entendimento dos resultados das ferramentas utilizadas neste trabalho (agrupamento e otimização). Nos resultados apresentados, as comparações das pontes selecionadas são relativas aos resultados de clusterização para $k = 5$.

4 Análise e Discussão dos Resultados

4.1 Agrupamento

Nesta seção os resultados relativos à clusterização do banco de dados I são apresentados considerando as premissas citadas na Seção 3.3. Buscou-se avaliar os resultados em função da formação dos clusters para diferentes valores de k propostos e definidos a partir dos métodos para determinação do número de clusters. Os resultados gráficos são gerados pela análise de componentes principais (Subseção 2.7.4).

4.1.1 Resultados do Banco de Dados I

4.1.1.1 Simulação I

Os resultados da aplicação dos métodos de determinação do número ótimos de *clusters* (Elbow, Silhouette e Gap Statistic) sugerem que para o conjunto de dados o número de *clusters* deve ser entre 2 e 5, Figura 44. Contudo, o resultado obtido para o método *Gap statistic* denota que há elevado grau de ruído nos dados e, portanto, não foi considerado nessas simulações. A partir disso, definiu-se que as simulações para os valores de $k = 2, 3, 4, 5$, Figura 45 a 49.

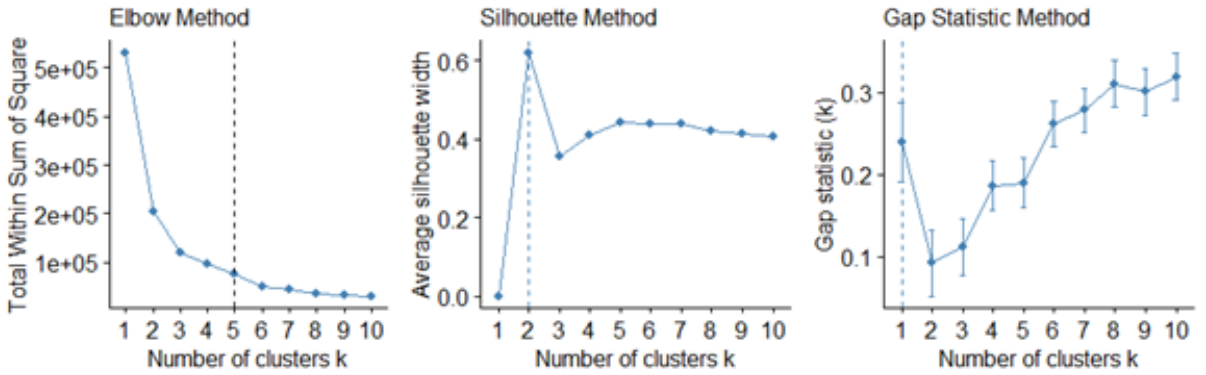


Figura 44 – Resultados dos métodos para determinação de *k clusters*

Os resultados para os diferentes números de *clusters* instanciados sem tratamento de dados faltantes são apresentados em conjunto nas Figuras Figura 45 a 55. As pontes representadas nos gráficos com suas numerações estão distribuídas e associadas aos centroides resultantes em cada simulação.

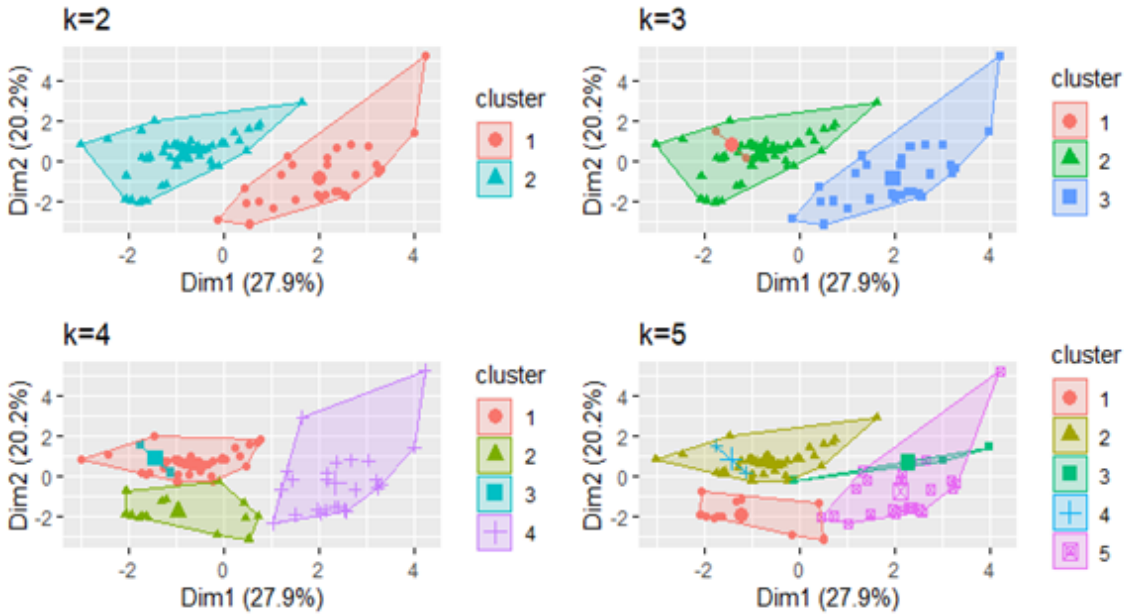


Figura 45 – Clusterização com dados faltantes

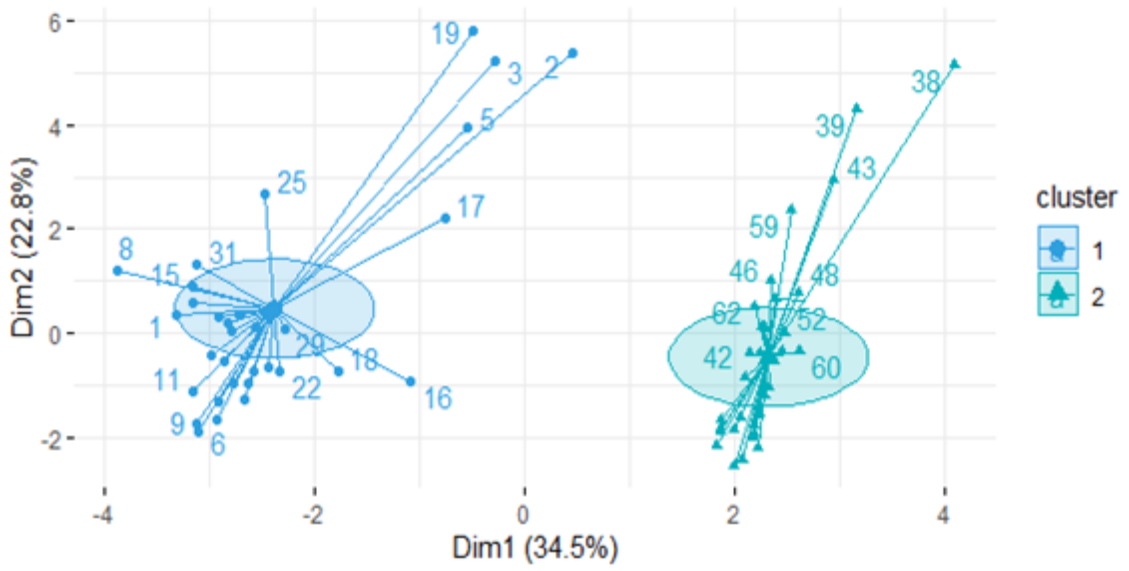


Figura 46 – Resultado da clusterização para k = 2.

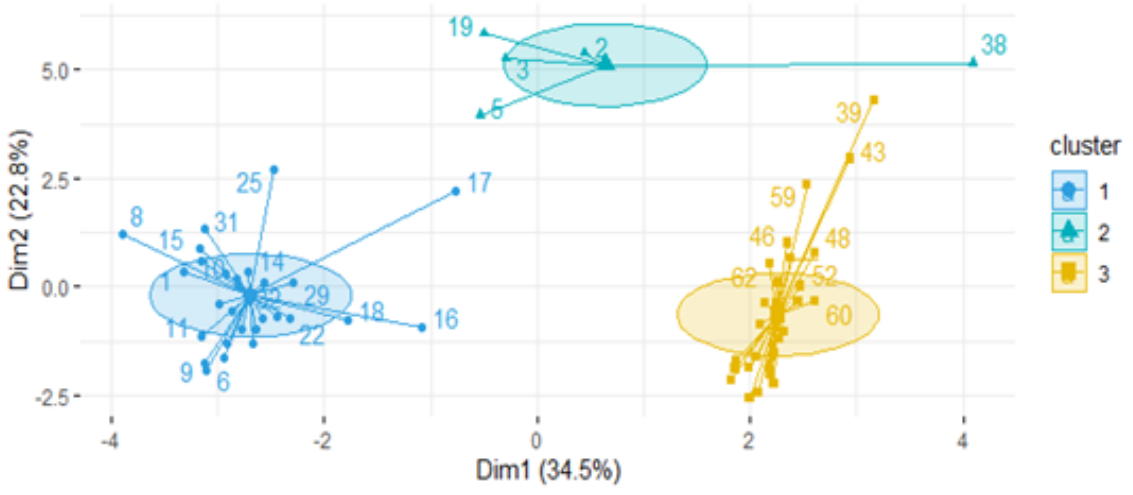


Figura 47 – Resultado da clusterização para k = 3.

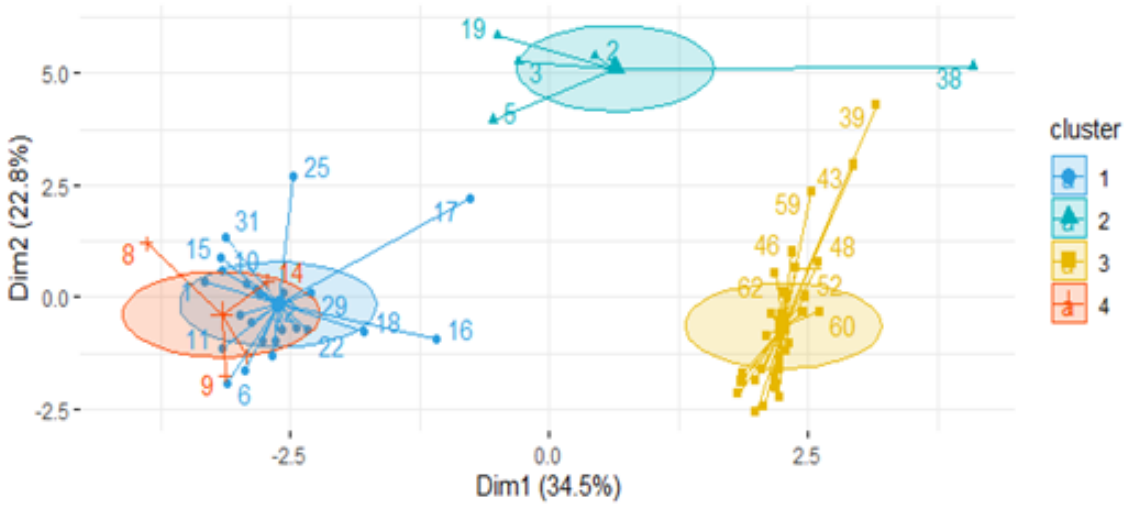


Figura 48 – Resultado da clusterização para k = 4.

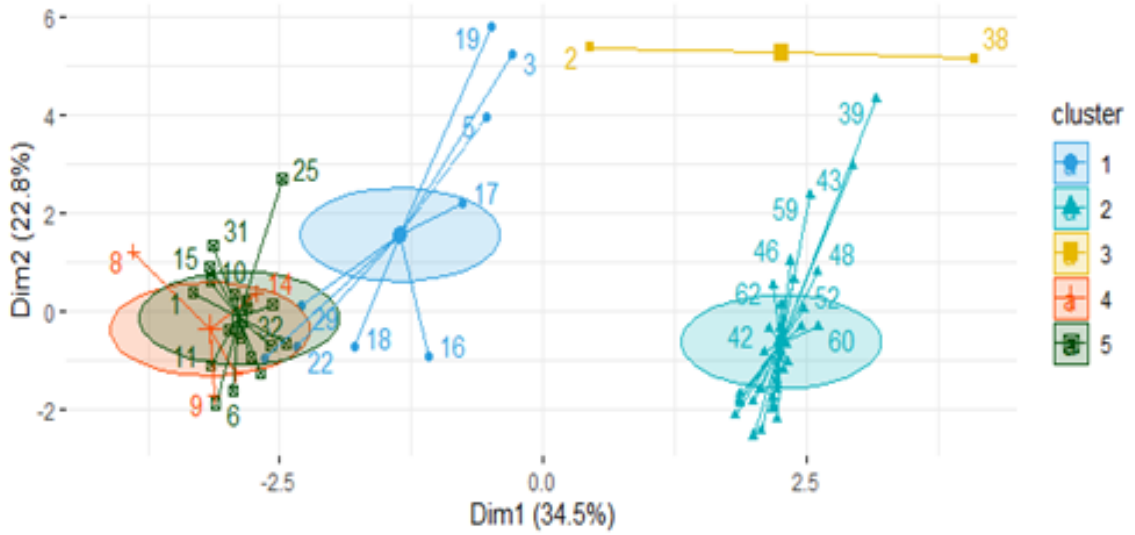


Figura 49 – Resultado da clusterização para k = 5.

Os resultados da instância (I) denotam coerência na formação dos *clusters*. Observa-se que a quantidade de pontes que são associadas a novos centroides ocorre de forma cadenciada. Indicando que as formações anteriores não são fortemente alteradas após a mudança do parâmetro k e que indica uma resposta adequada ao nível de coesão/dispersão dos dados.

4.1.1.2 Simulação II (com Tratamento de Dados)

Na instância que considera o tratamento dos dados por meio de ajustes dos campos, realizou-se uma adequação aos dados de forma que todos os registros pudessem ser utilizados nas simulações de clusterização. Para tal, utilizou-se procedimentos típicos de tratamento dos dados. No caso, o uso de valores médios dos campos para os registros faltantes, (BRUCE; BRUCE, 2019). Os métodos para determinação de k apresentaram valores superiores aos realizados anteriormente, Tabela 6. Os resultados da aplicação dos métodos de determinação do número ótimos de *clusters* (*Elbow, Silhouette e Gap Statistic*) sugerem que para o conjunto com tratamento de dados faltantes o número de *clusters* deve ser entre 6 e 10, Figura 50. Indicando coerência pela diferença na quantidade de registros na simulação II ($\simeq$ 43% maior) em relação à simulação I, partindo-se do pressuposto que os dados apresentam naturezas análogas.

Método	K
Elbow	5
Silhouette	6
Gap Statistic	10

Tabela 6 – Resultados para o número ótimo de k com dados tratados.

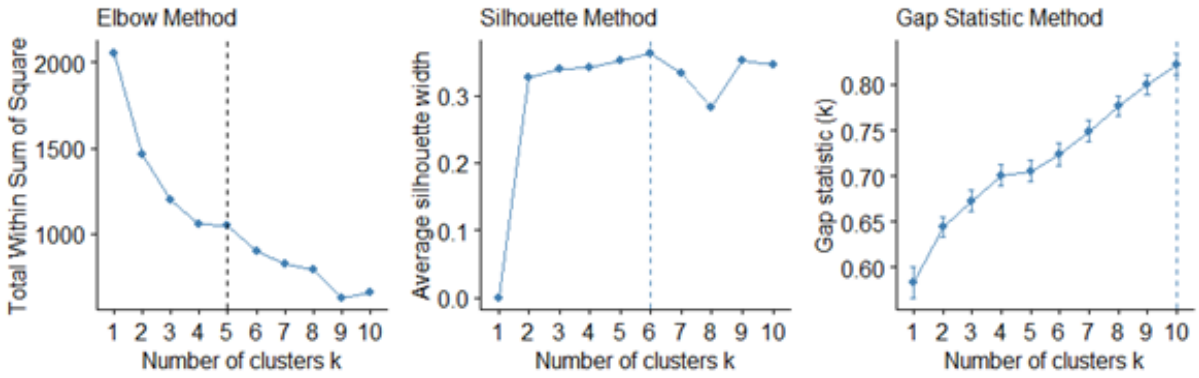


Figura 50 – Número ótimo de *clusters* com dados tratados.

Contudo, definiu-se por realizar também as simulações com os mesmos valores de $k = \{2, 3, 4, 5\}$ anteriores (simulação I) a fim de se comparar os comportamentos dos *clusters*. Além disso, embora os conjuntos de pontes ferroviárias sejam heterogêneos, Do ponto de vista prático, um número elevado de *clusters* torna a análise não aderente à realidade do processo de tomada de decisão (Carvalho Neto; Cruzeiro; Bittencourt, 2024). Pois, na maioria dos casos, os gestores estão interessados em identificar grupos que definam a qual agrupamento pertence certo ativo ou quais grupos de pontes devem ser priorizados para determinadas atividades de intervenção. Contudo, um número grande desses grupos pode dificultar as mobilizações e ações na realidade de campo. Os resultados para os números k realizados anteriormente são mostrados nos gráficos da Figura 51 a 55.

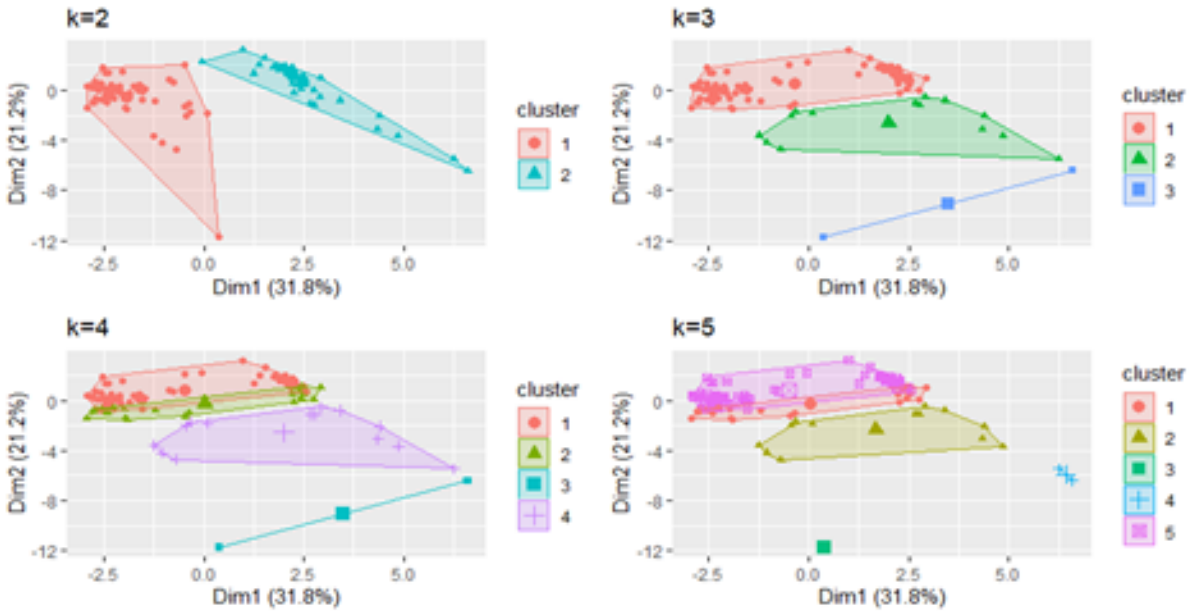


Figura 51 – Clusterização para k = 2, 3, 4, 5

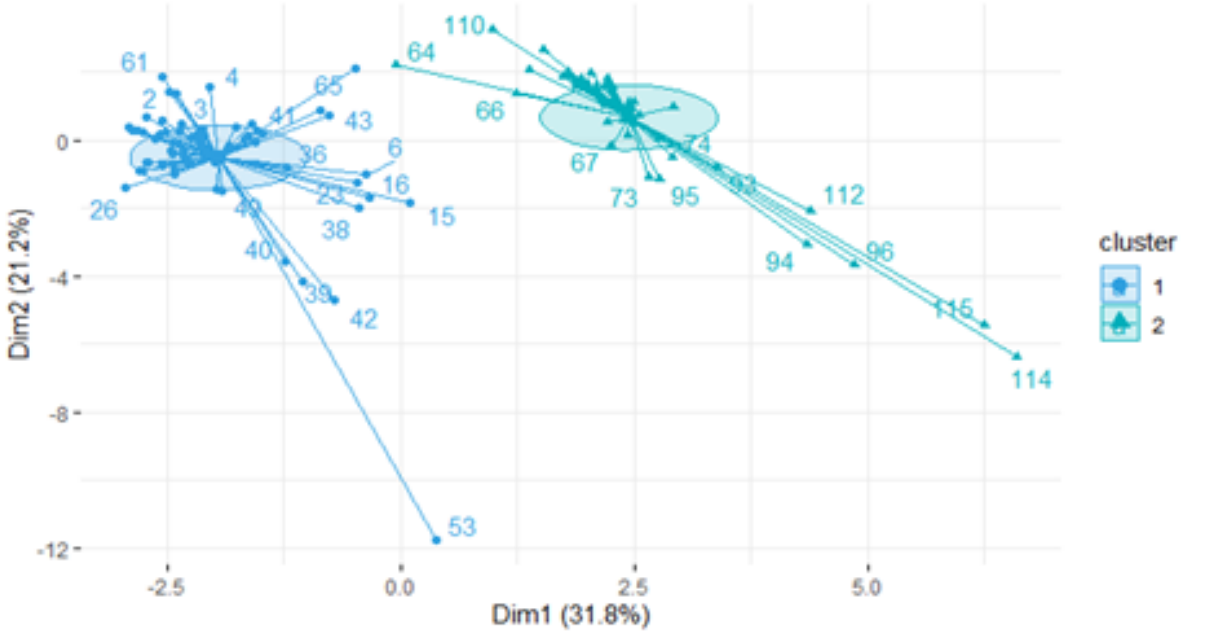


Figura 52 – Resultado da clusterização para k = 2.

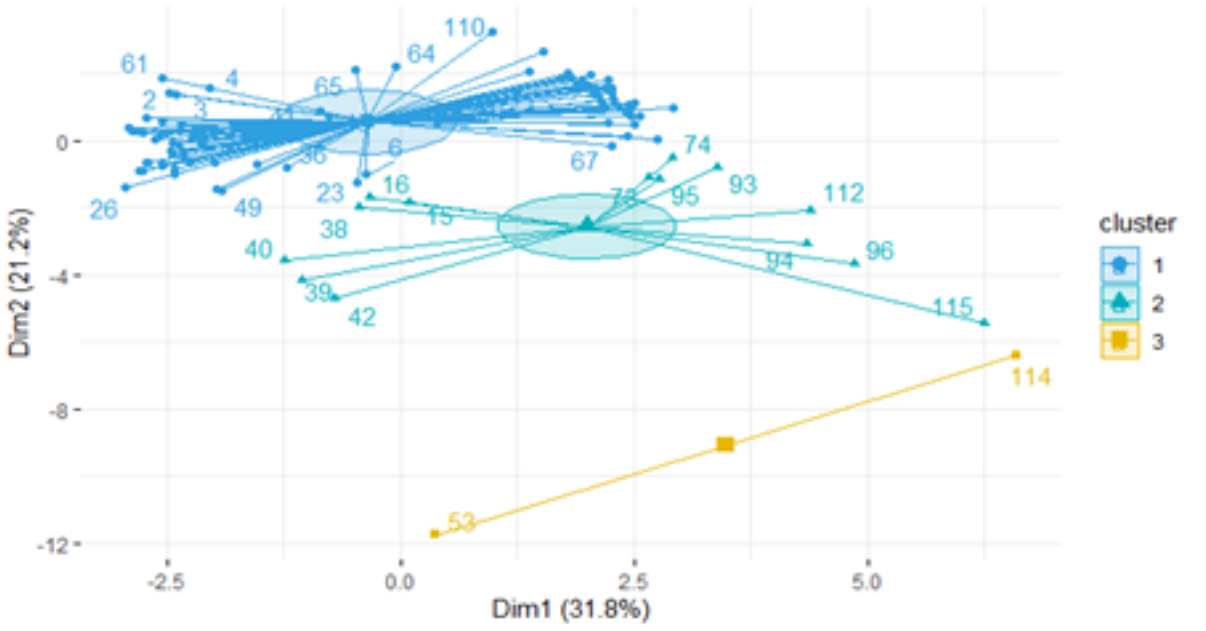


Figura 53 – Resultado da clusterização para k = 3.

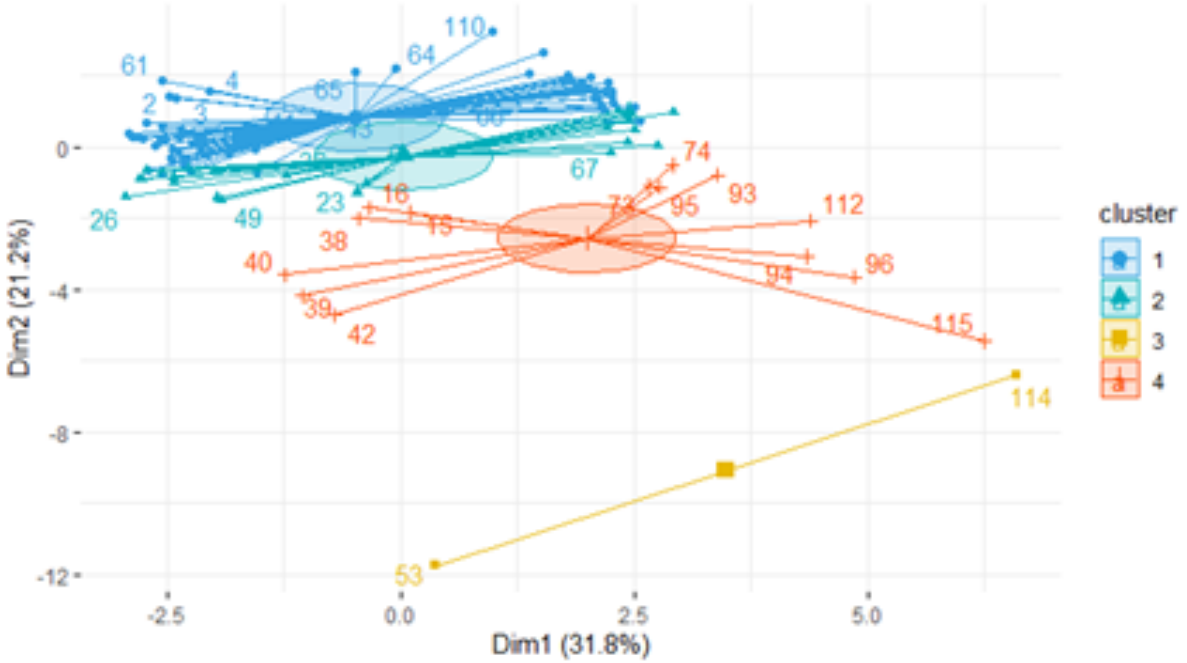


Figura 54 – Resultado da clusterização para k = 4.

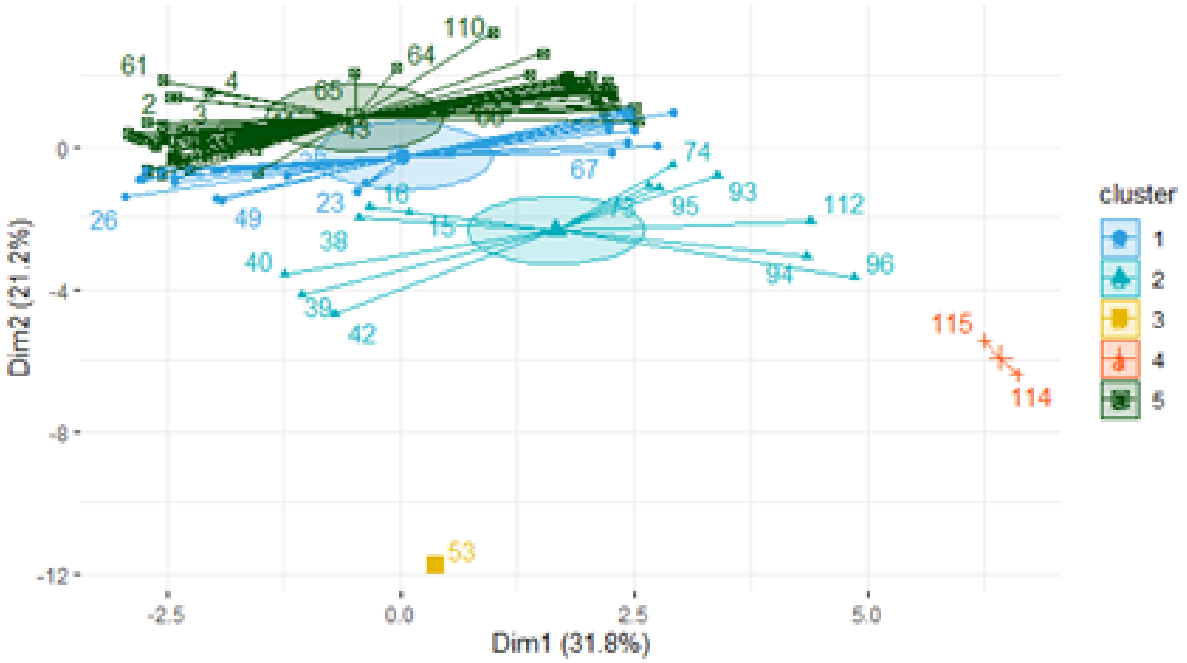


Figura 55 – Resultado da clusterização para k = 5.

Nesta simulação observa-se comportamento equivalente aos resultados da simulação I. Alterações suaves com o aumento de *k*, formação de *clusters* de dados mais extremos e partição dos *clusters* já definidos nas instâncias anteriores. Há, pois, um padrão visual bastante aceitável de agrupamento em relação à coesão/dispersão dos dados. Esse padrão

pode ser observado em instâncias com valores de $k = \{9, 10\}$, da Figura 56 a 57. As formações dos *clusters* para as instâncias com valores de $k = \{6,7,...,10\}$, são apresentadas na Figura 58. Nas quais se alumia o desmembramento dos agrupamentos formados na diversas instâncias para valores maiores de k.

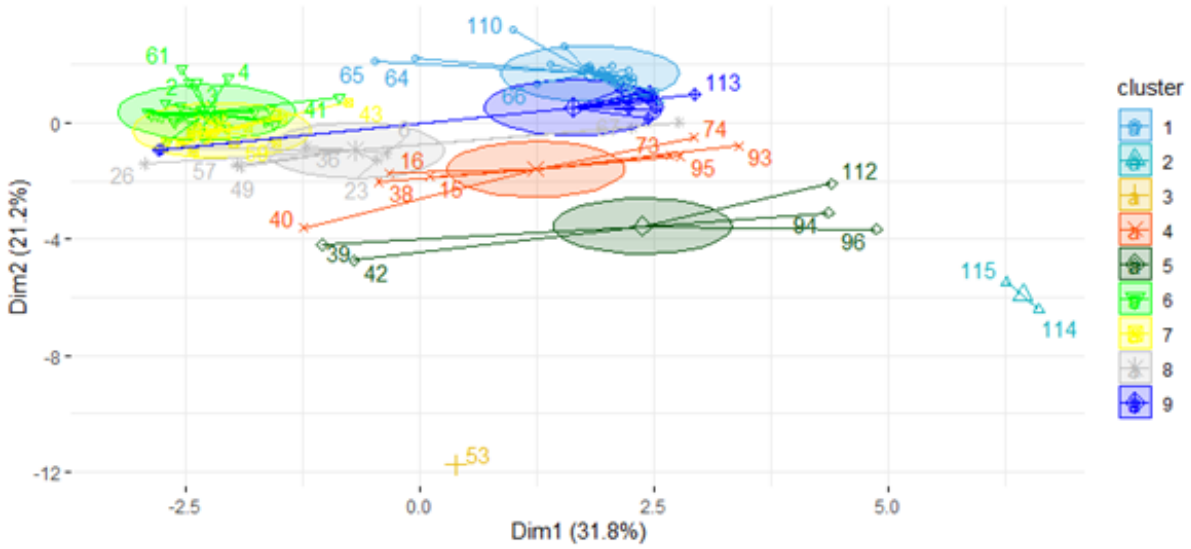


Figura 56 – Resultado da clusterização para k = 9.

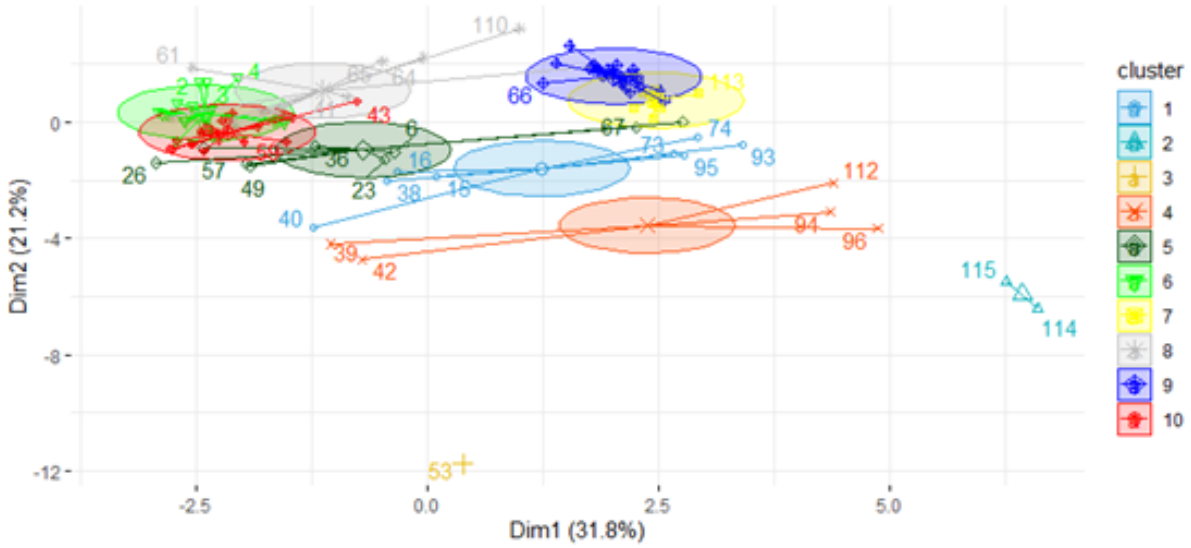


Figura 57 – Resultado da clusterização para k = 10.

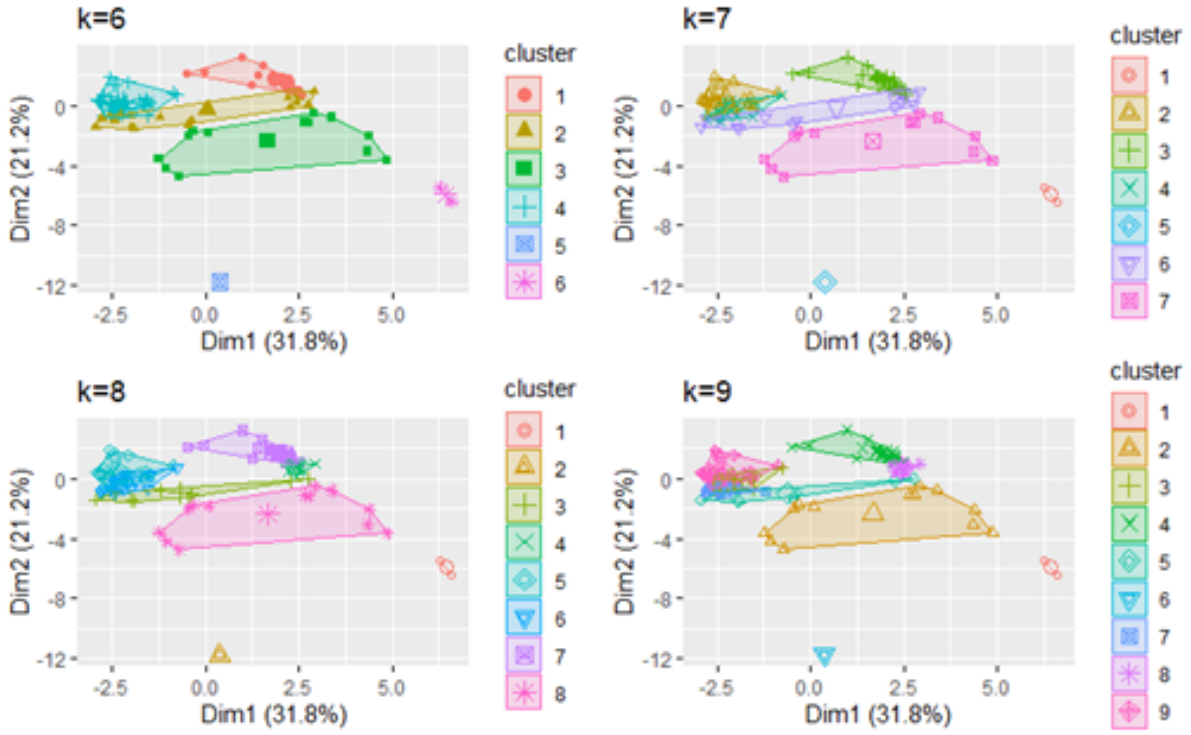


Figura 58 – Resultado da clusterização para k = 6,7,8,9.

O comportamentos dos elementos internos dos *clusters* foram avaliados a partir dos dois primeiros agrupamentos formados ($k = 2$). Observa-se na Figura 59 e na Figura 60 a quantidade de elementos presentes e sua variação à medida que novas configurações são formadas pelo aumento no valor de k. Há uma tendência decrescente na quantidade de elementos em ambos os *clusters* e comportamento correlato para os dois grupos inicialmente formados, Figura 61. Nessa análise observou-se que há preponderante permanência dos elementos inicialmente constituintes e em casos de variações positivas nos valores de elementos (*e.g*, simulação 7 da Figura 61 do *cluster* 2), as pontes que foram adicionadas pertenceram ao *cluster* anteriormente. O que indica um comportamento aderente dos elementos em relação ao centróide estabelecido.

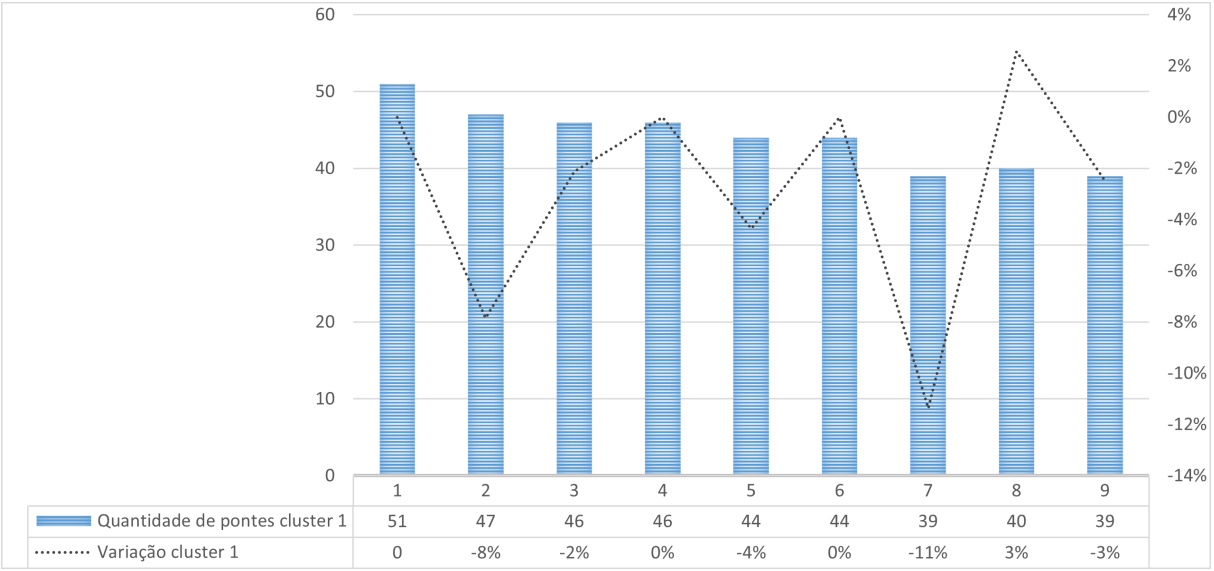


Figura 59 – Comportamento do agrupamento (*cluster 1*) com o aumento do valor de *k*

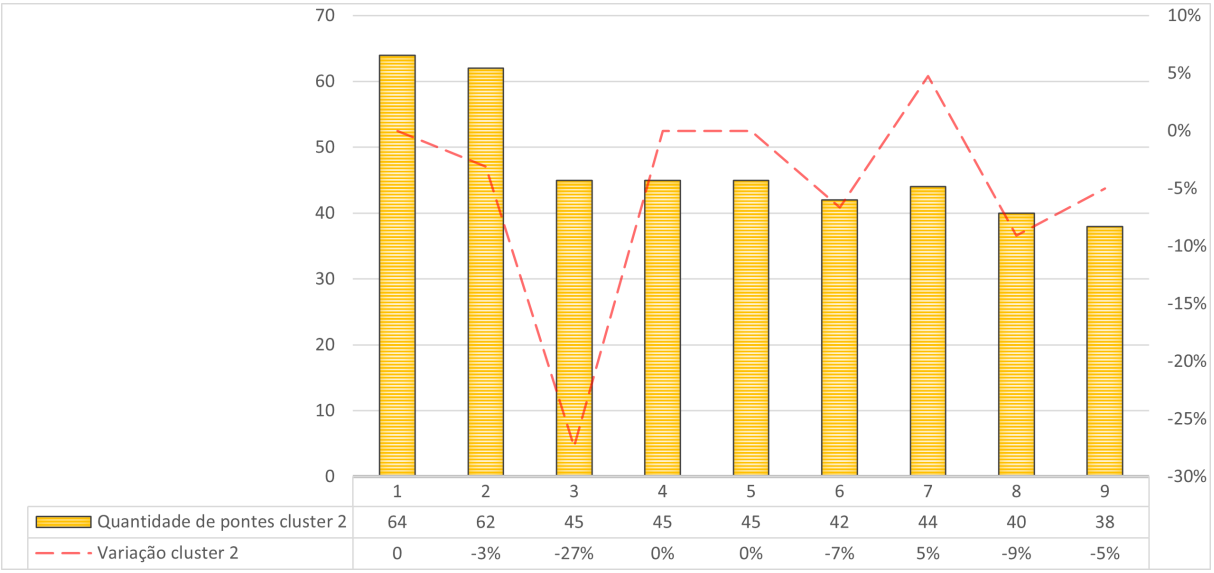
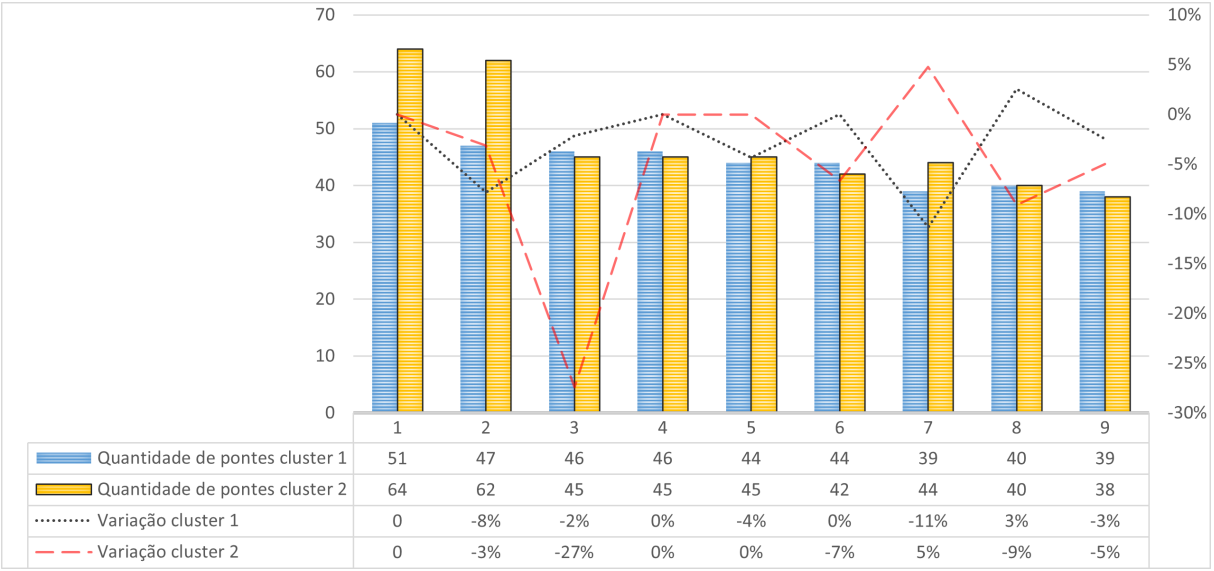


Figura 60 – Comportamento do agrupamento (*cluster 2*) com o aumento do valor de *k*



	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Quantidade de pontes cluster 1	51	47	46	46	44	44	39	40	39
Quantidade de pontes cluster 2	64	62	45	45	45	42	44	40	38
Variação cluster 1	0	-8%	-2%	0%	-4%	0%	-11%	3%	-3%
Variação cluster 2	0	-3%	-27%	0%	0%	-7%	5%	-9%	-5%

Figura 61 – Comparativo dos agrupamentos (*clusters 1 e 2*) com o aumento do valor de *k*

Confirmando esse comportamento, os resultados da validação com dados tratados indicam valores aceitáveis para os *clusters* formados, Figura 62 e Figura 63. Os valores ótimos para os métodos utilizados são apresentados na Tabela 7. Outras informações mais gráficas e dendogramas estão contidas no Apêndice D.

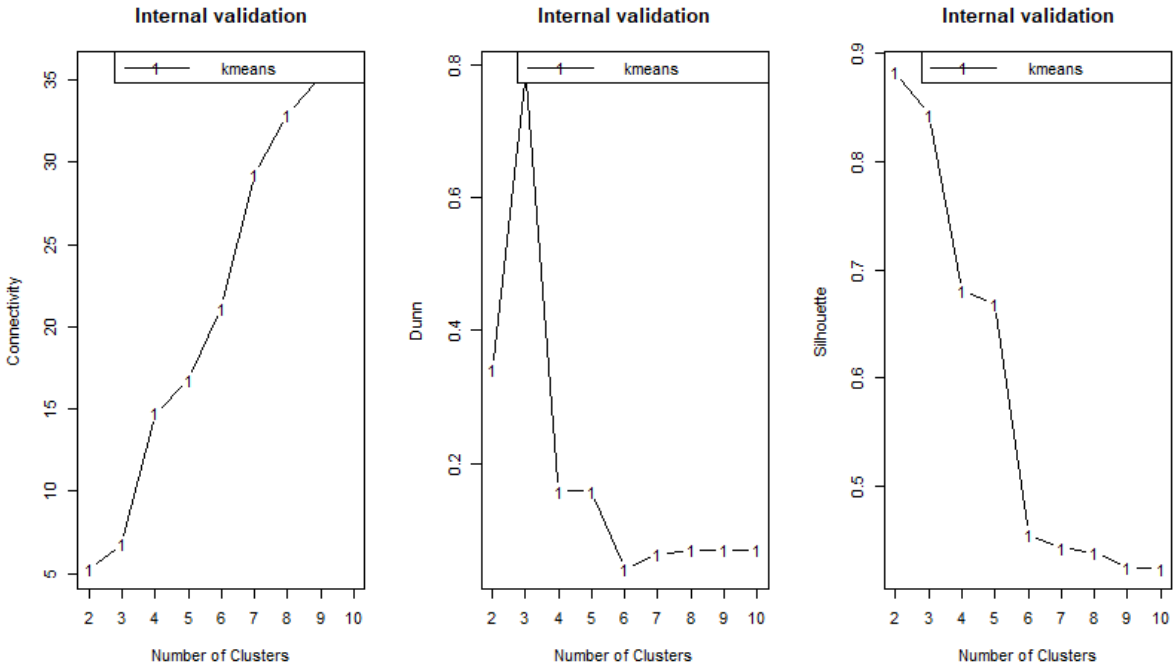


Figura 62 – Gráficos dos índices de validação interna (função *[clValid]*).

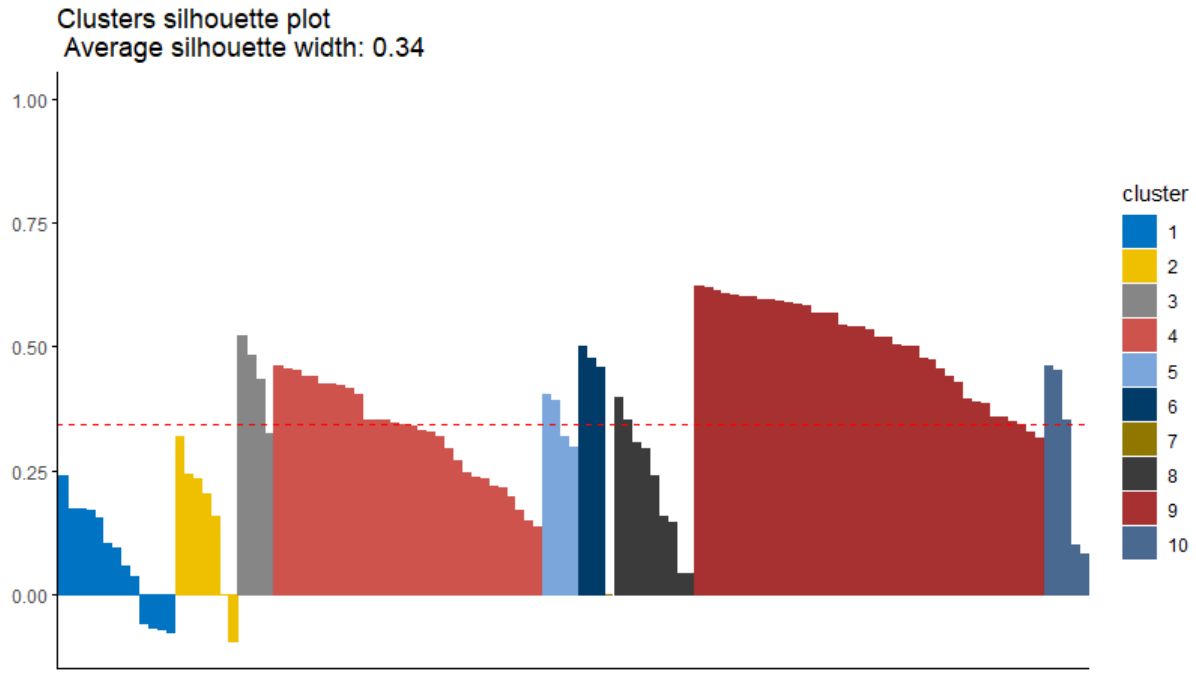


Figura 63 – Resultado da validação de *cluster* para $k = 10$.

Método	Resultado	*Cluster*
Connectivity	5,2869	2
Silhouette	0,7886	3
Dunn	0,8827	2

Tabela 7 – Resumo da validação interna para k = 10.

4.1.2 Resultados do Banco de Dados II

4.1.2.1 simulação I

Para a simulação sem dados faltantes, de forma semelhante ao descrito nas simulações para o banco de dados I, apresenta-se os resultados na Figura 64 para os valores ótimos de *clusters* considerando os métodos citados na Subseção 2.7.3. A quantidade de pontes para essa instância corresponde a $\approx$ 17% do total de pontes (3292 ativos) do inventário da concessionária.

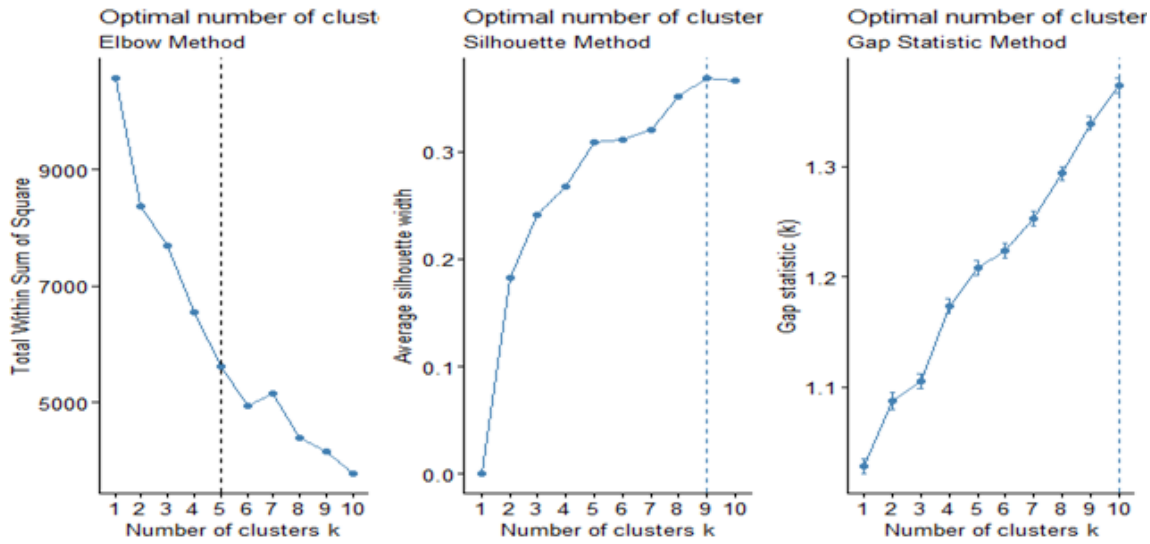


Figura 64 – Número ótimo de *clusters*

Os resultados gráficos dos *clusters* formados para os valores de $k = \{1,2,3 \cdots ...10\}$ estão apresentados na Figura 65 a Figura 76, cujos valores dos índices numéricos das pontes (ID) foram omitidos em virtude da quantidade de pontes em comparação ao banco de dados I.

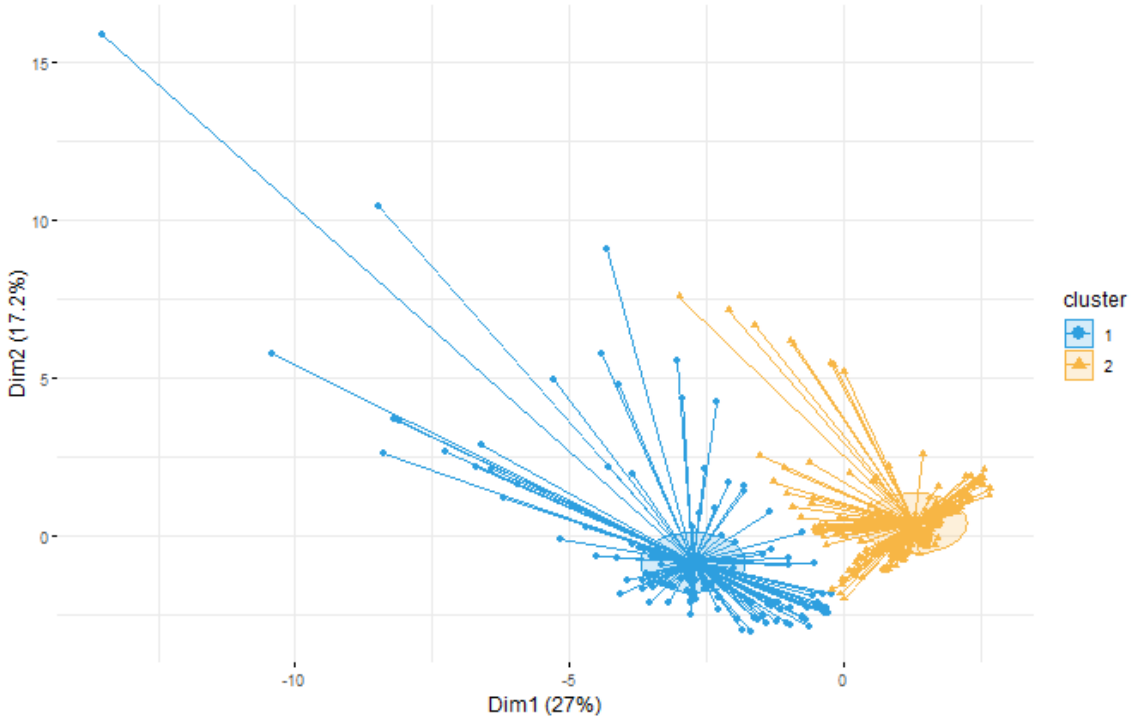


Figura 65 – Resultado da clusterização para k=2

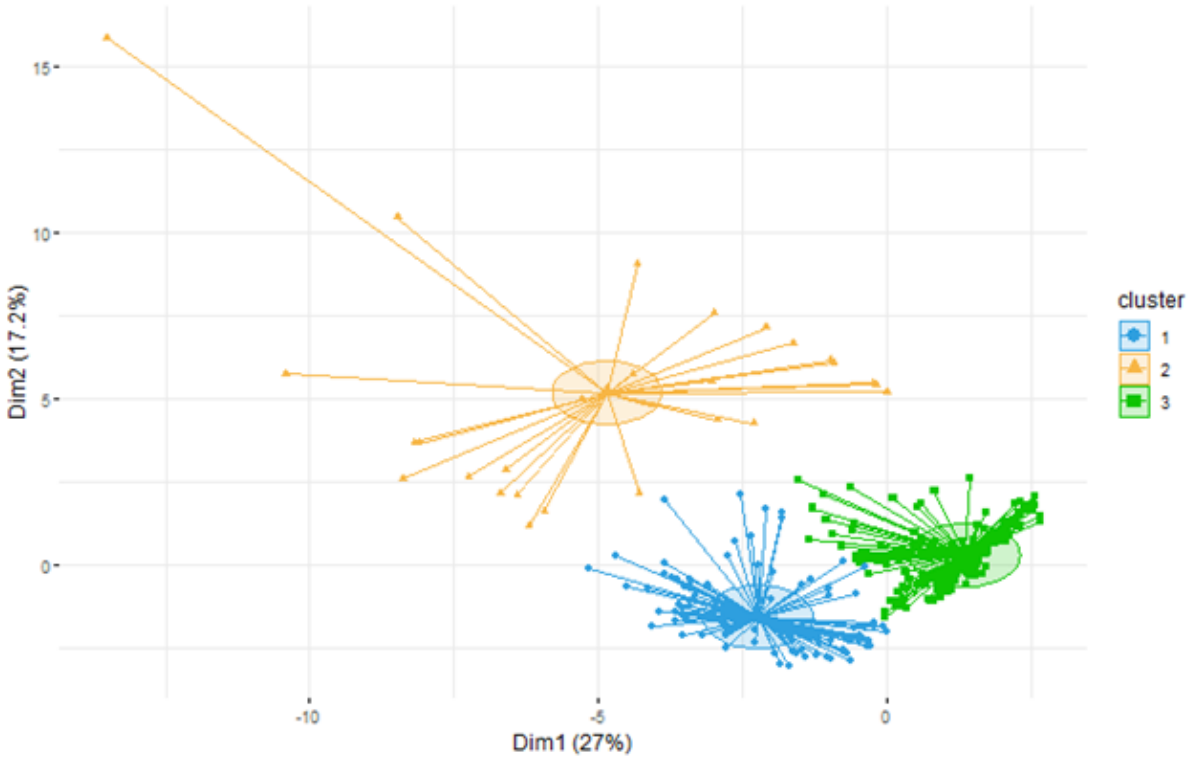


Figura 66 – Resultado da clusterização para k=3

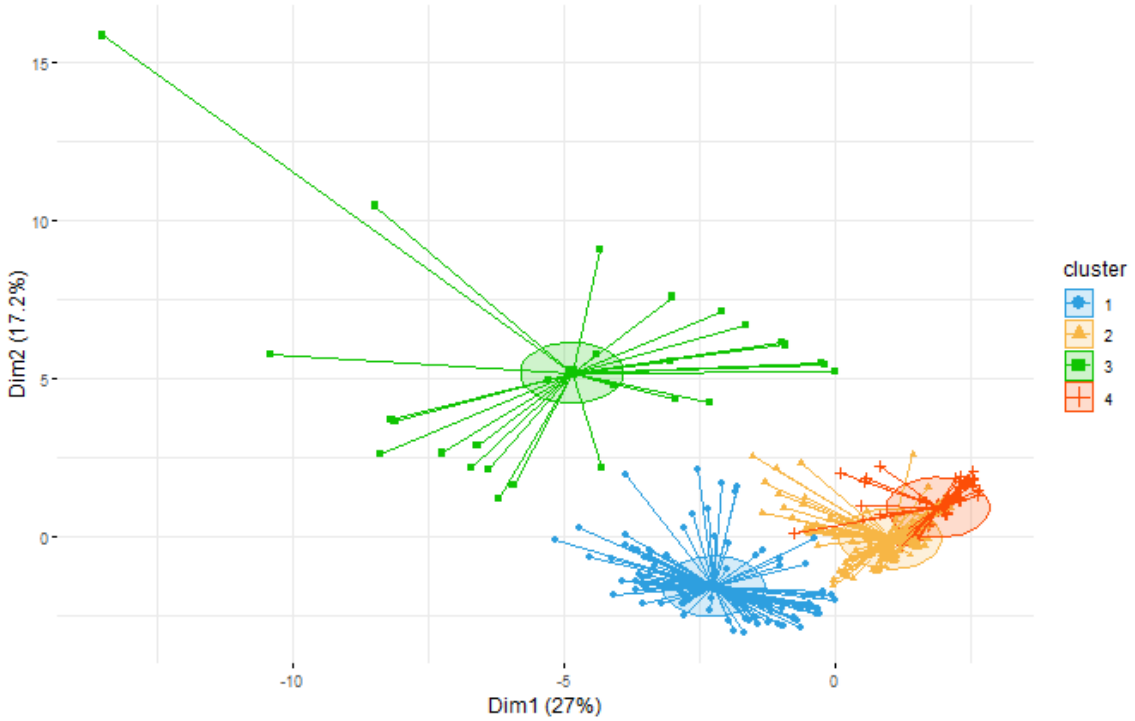


Figura 67 – Resultado da clusterização para k=4

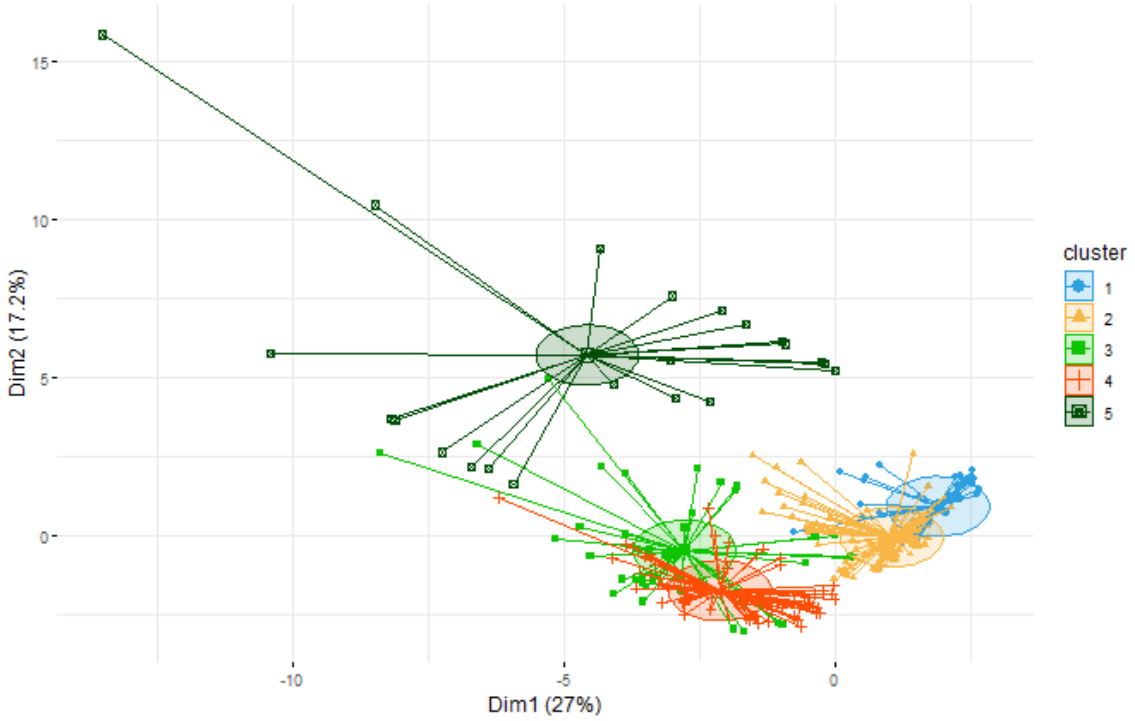


Figura 68 – Resultado da clusterização para k=5

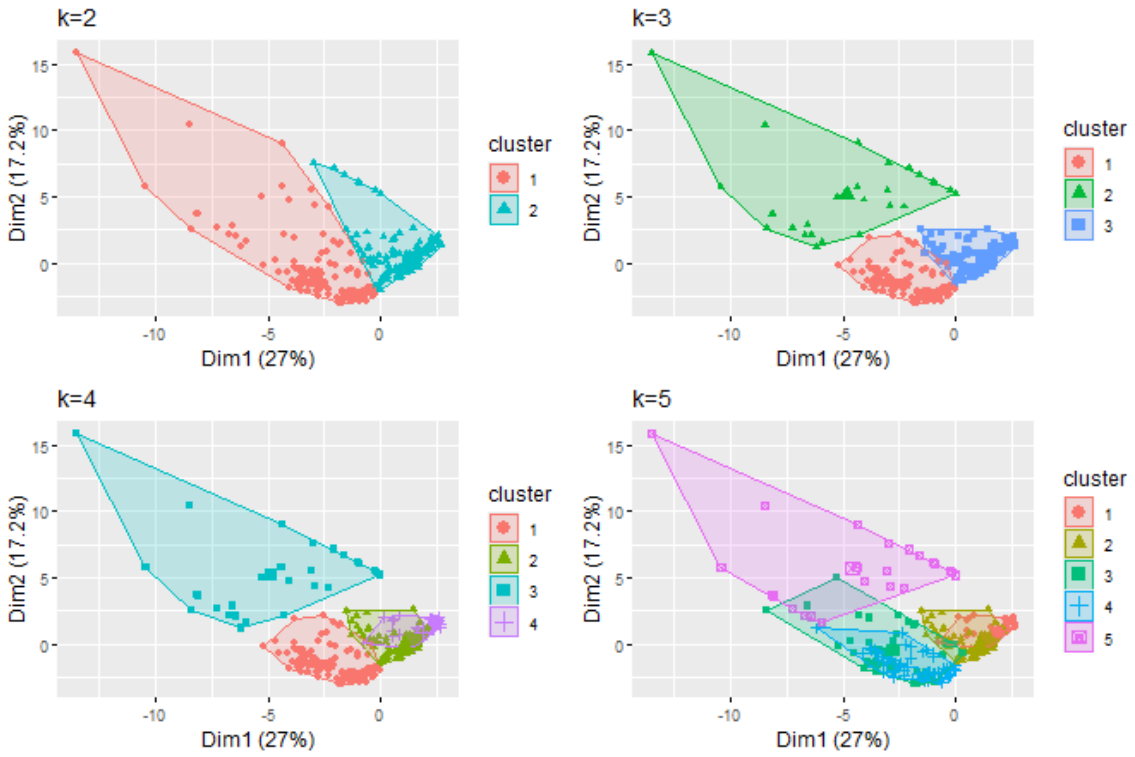


Figura 69 – Clusterização para k = 2,3,4,5.

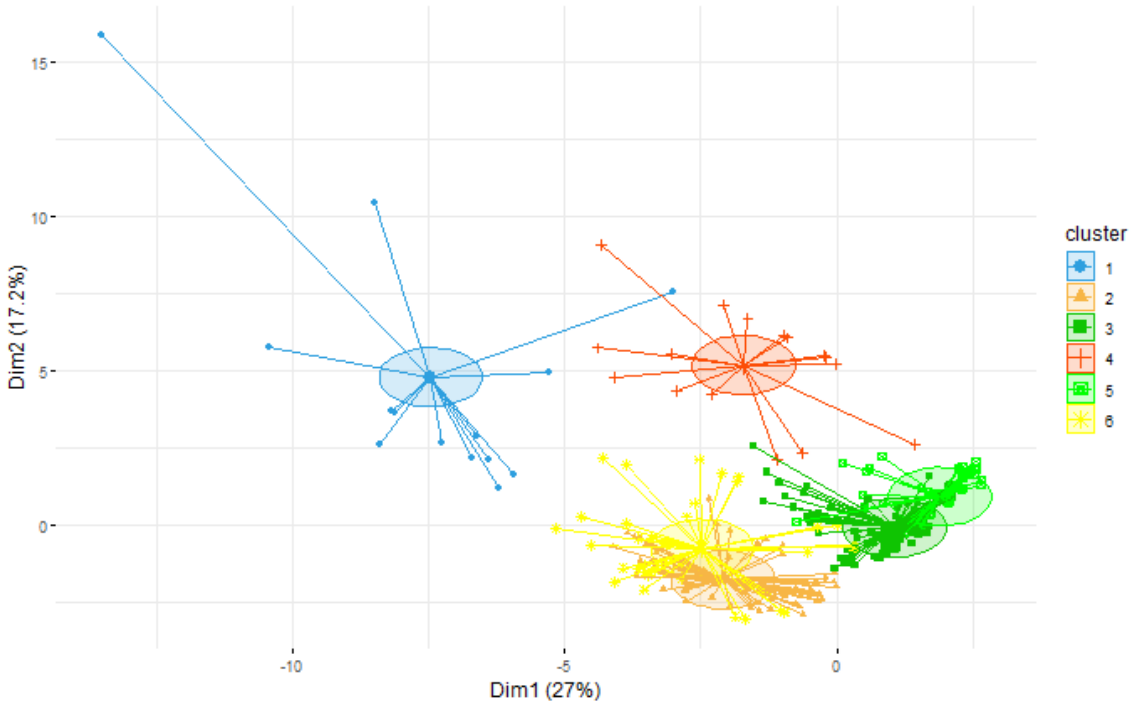


Figura 70 – Resultado da clusterização para k=6

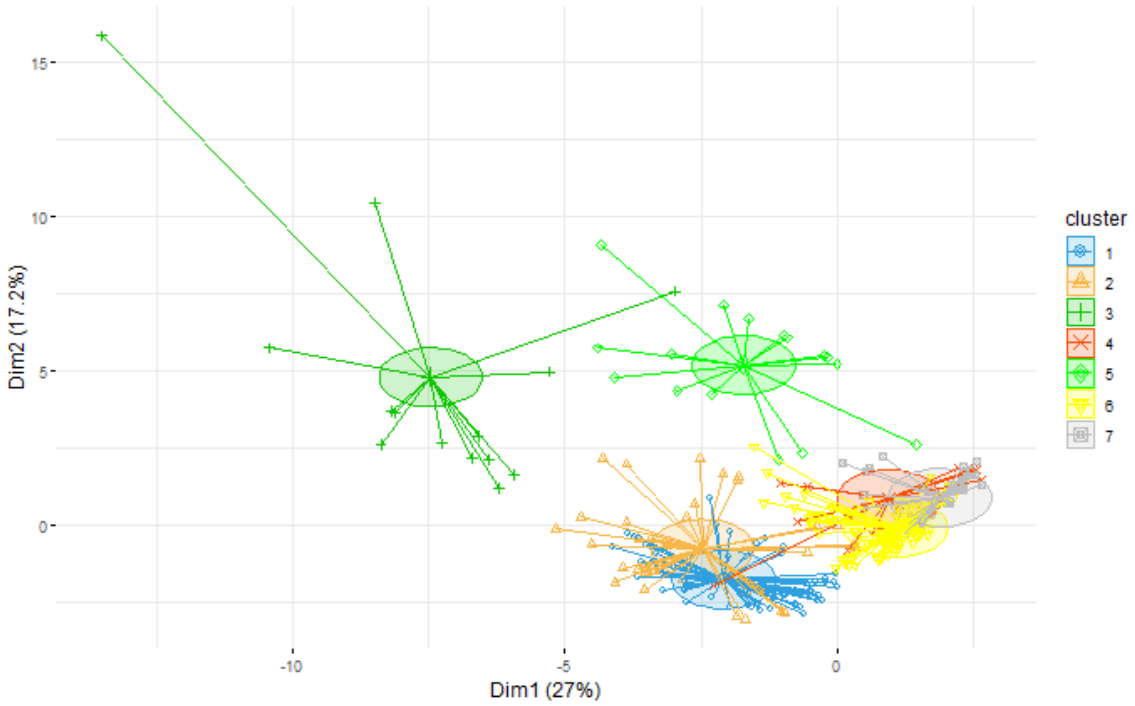


Figura 71 – Resultado da clusterização para k=7

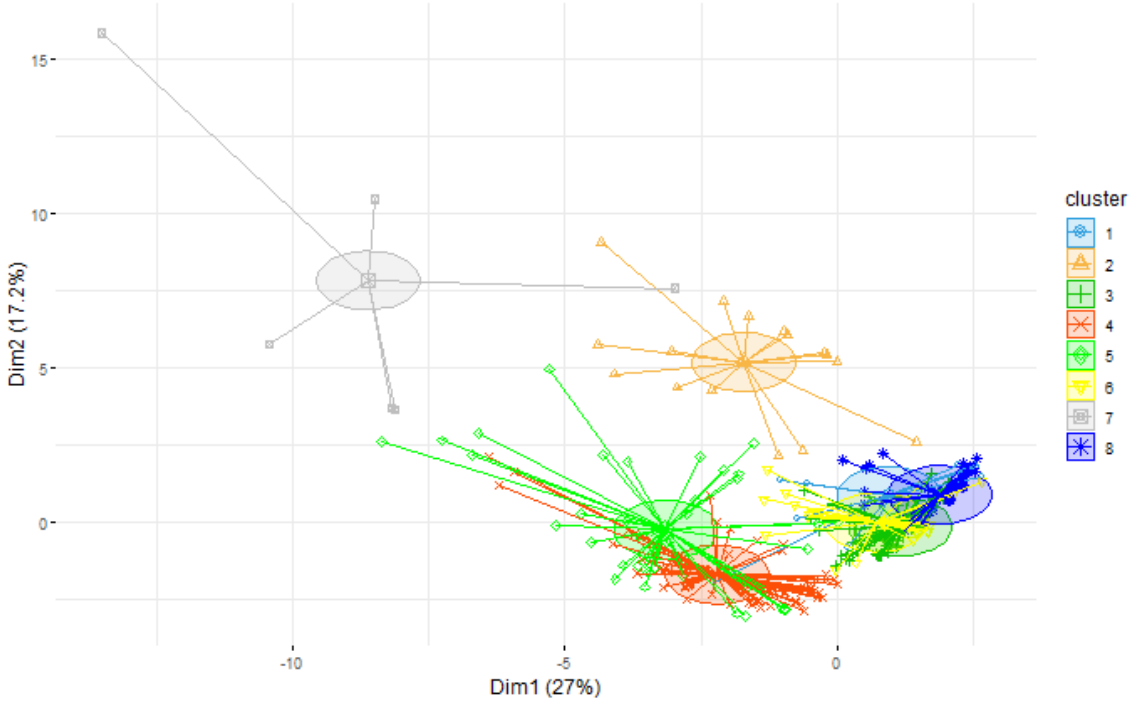


Figura 72 – Resultado da clusterização para k=8

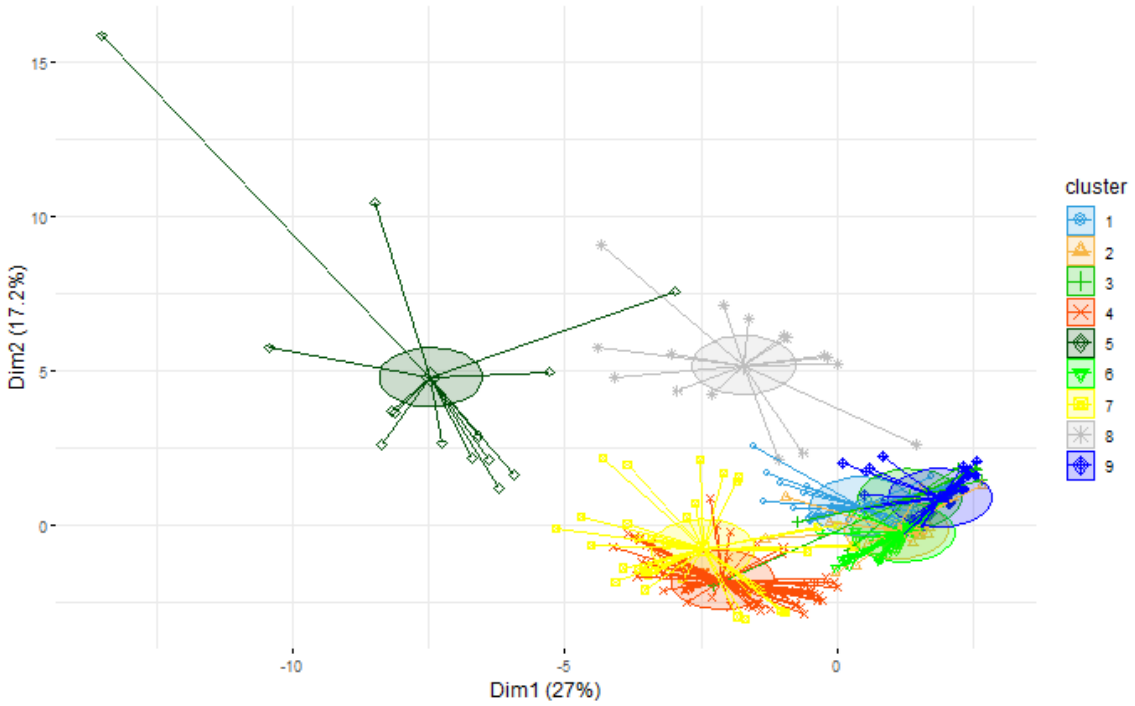


Figura 73 – Resultado da clusterização para k=9

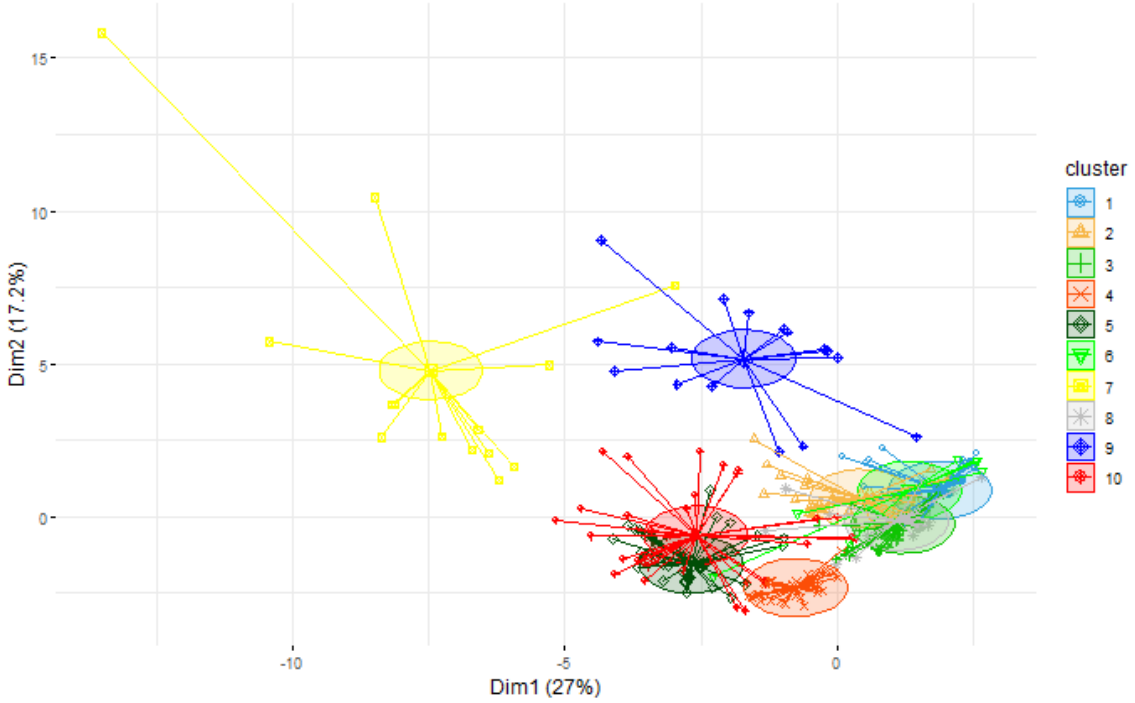


Figura 74 – Resultado da clusterização para k=10

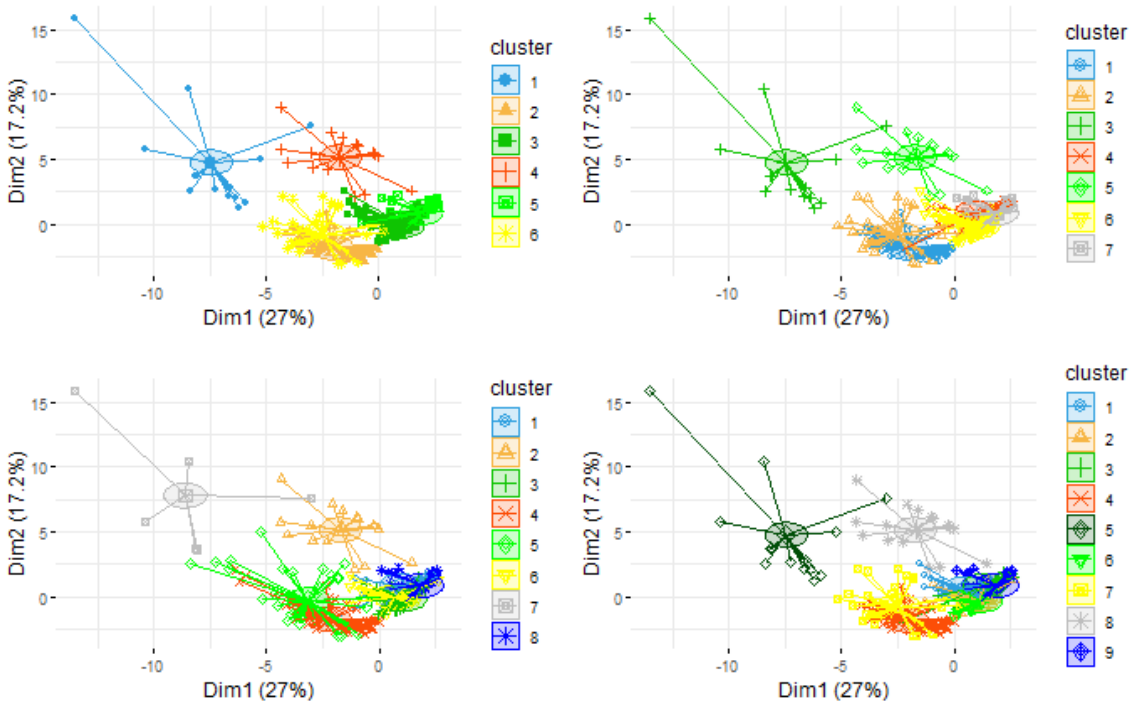


Figura 75 – Resultado da clusterização para k = 6,7,8,9.

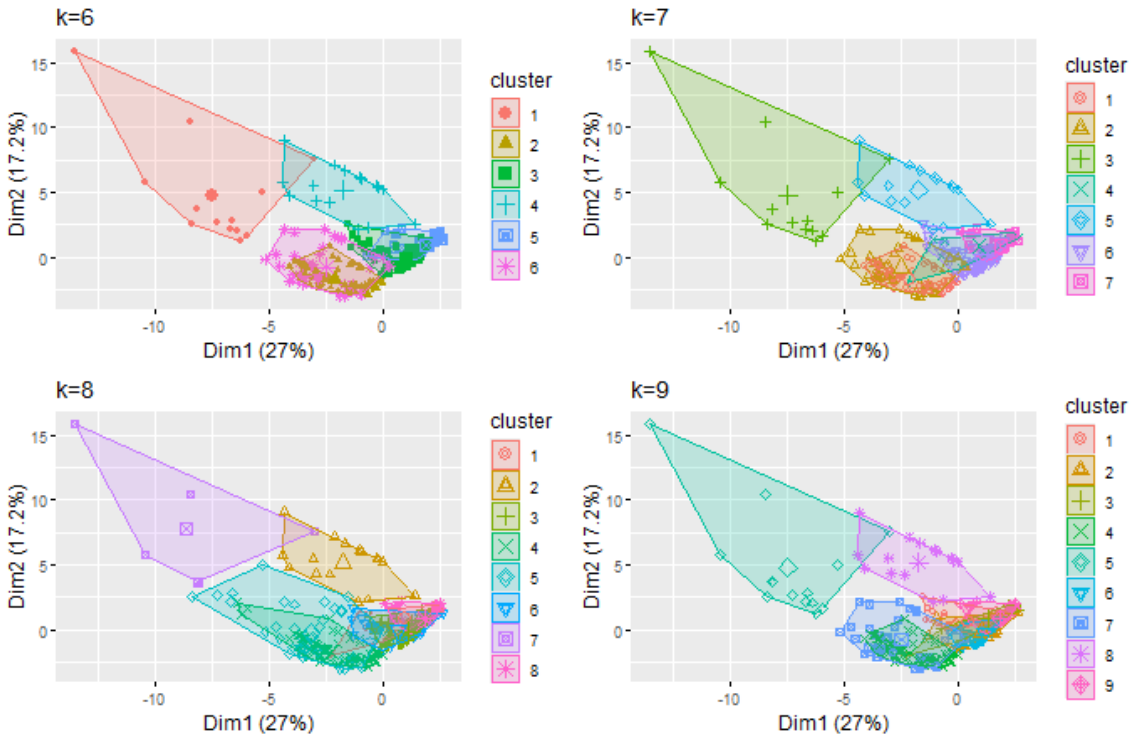


Figura 76 – Resultado da clusterização para k = 6,7,8,9.

Os dois *clusters* iniciais, assim como no caso anterior, apresentam comportamento decrescente da quantidade e aderência em relação à presença de seus elementos à medida que o valor de k aumenta, Figura 77 e 78. Nota-se que os resultados indicam a formação de dois *clusters* iniciais com quantidades consideralvemente distintas de elementos, diferentemente do que foi observado nos resultados da Subsubseção 4.1.1.2, conforme Figura 79, na qual as quantidades de pontes em cada *cluster* (para $k = 2$) eram mais equilibradas. Nessa simulação há, também, aderência quantitativa dos elementos constituintes dos *clusters* à medidade que se aumenta o valor de k.

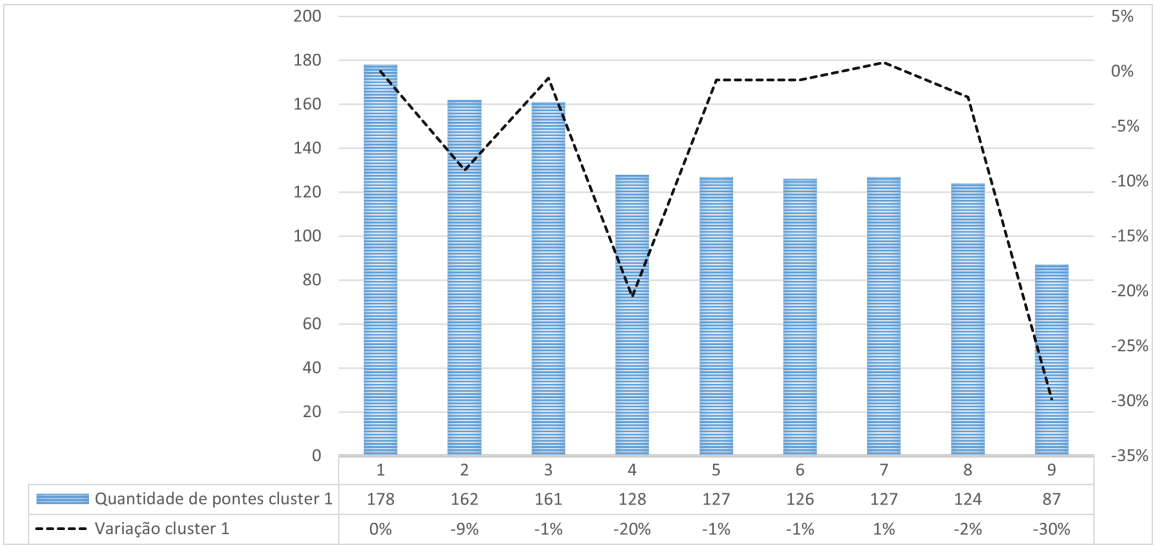


Figura 77 – Comportamento do agrupamento (*cluster*) 1 com o aumento do valor de k

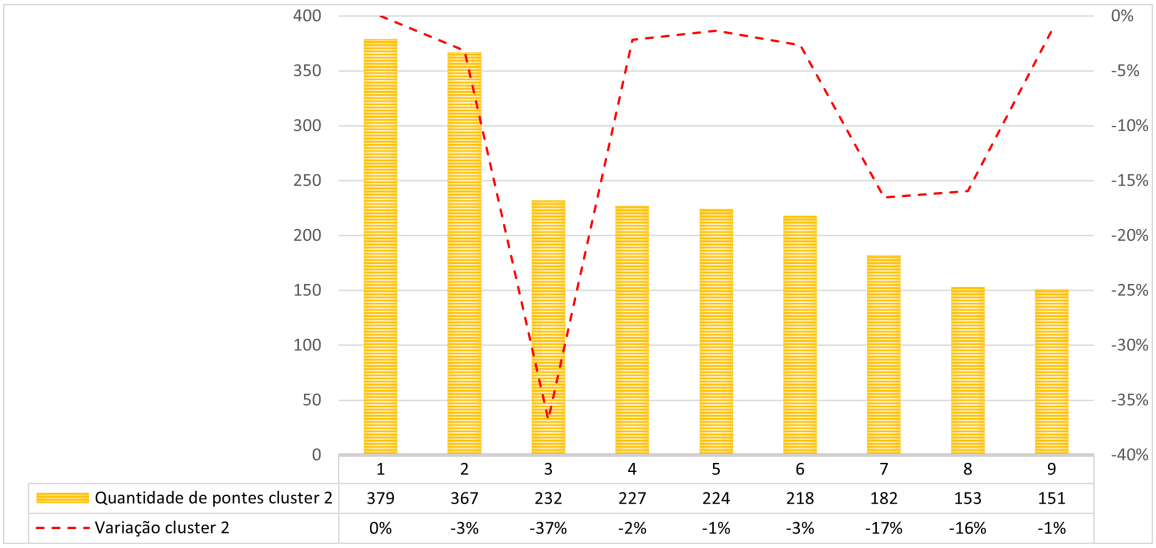
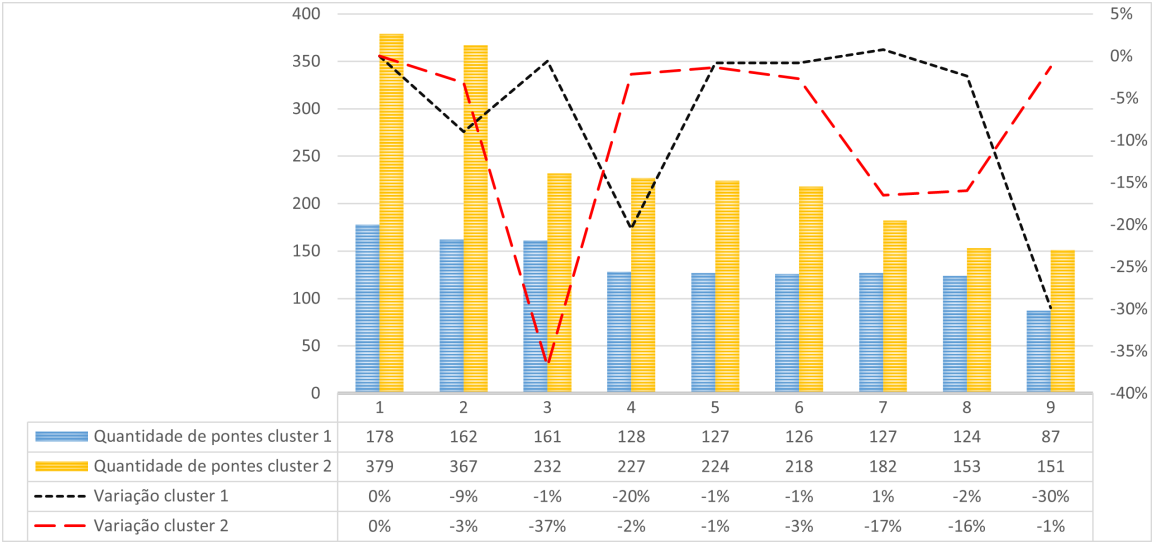


Figura 78 – Comportamento do agrupamento (*cluster*) 2 com o aumento do valor de k



	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Quantidade de pontes cluster 1	178	162	161	128	127	126	127	124	87
Quantidade de pontes cluster 2	379	367	232	227	224	218	182	153	151
Variação cluster 1	0%	-9%	-1%	-20%	-1%	-1%	1%	-2%	-30%
Variação cluster 2	0%	-3%	-37%	-2%	-1%	-3%	-17%	-16%	-1%

Figura 79 – Comparativo dos agrupamentos 1 e 2 com o aumento do valor de k

4.1.2.2 Simulação II (dados tratados)

Nessa instância os dados foram tratados para as variáveis de interesse por meio do uso de valores médios e os resultados são apresentados na Figura 80 a Figura 92, assim como no caso da Subsubseção 4.1.1.2. Tem-se, pois, os resultados para a simulação de um total de 753 pontes (≈ 23% do total de registros).

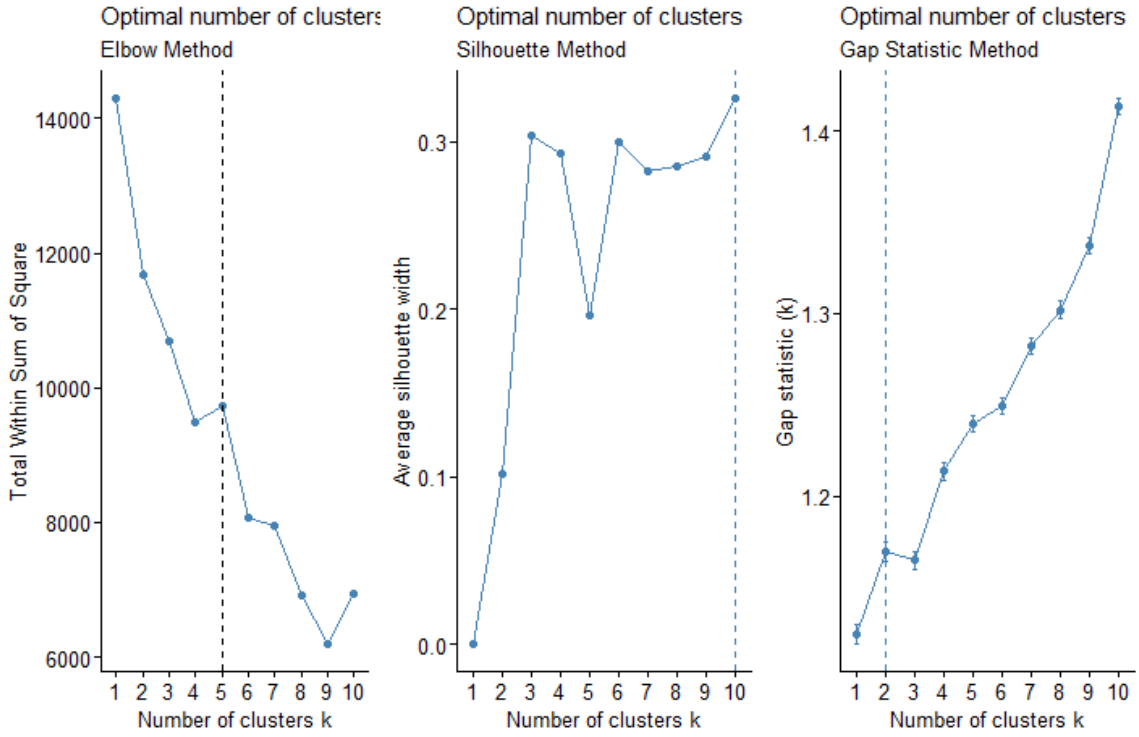


Figura 80 – Número de *clusters*.

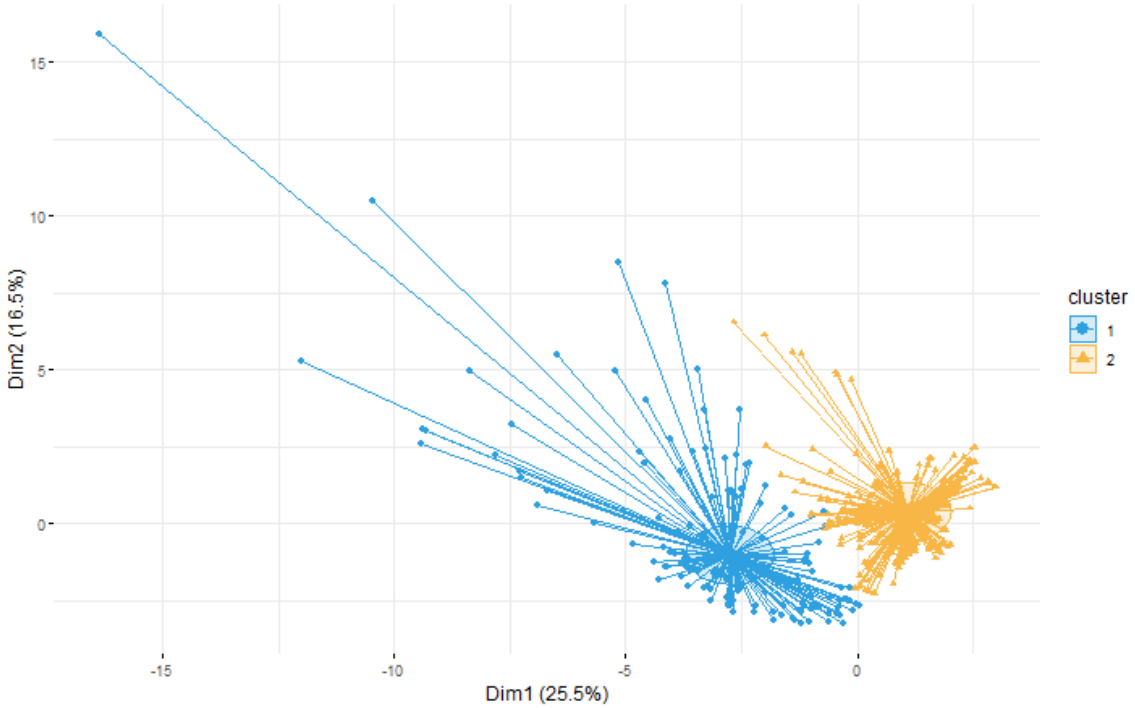


Figura 81 – Resultado da clusterização para k=2

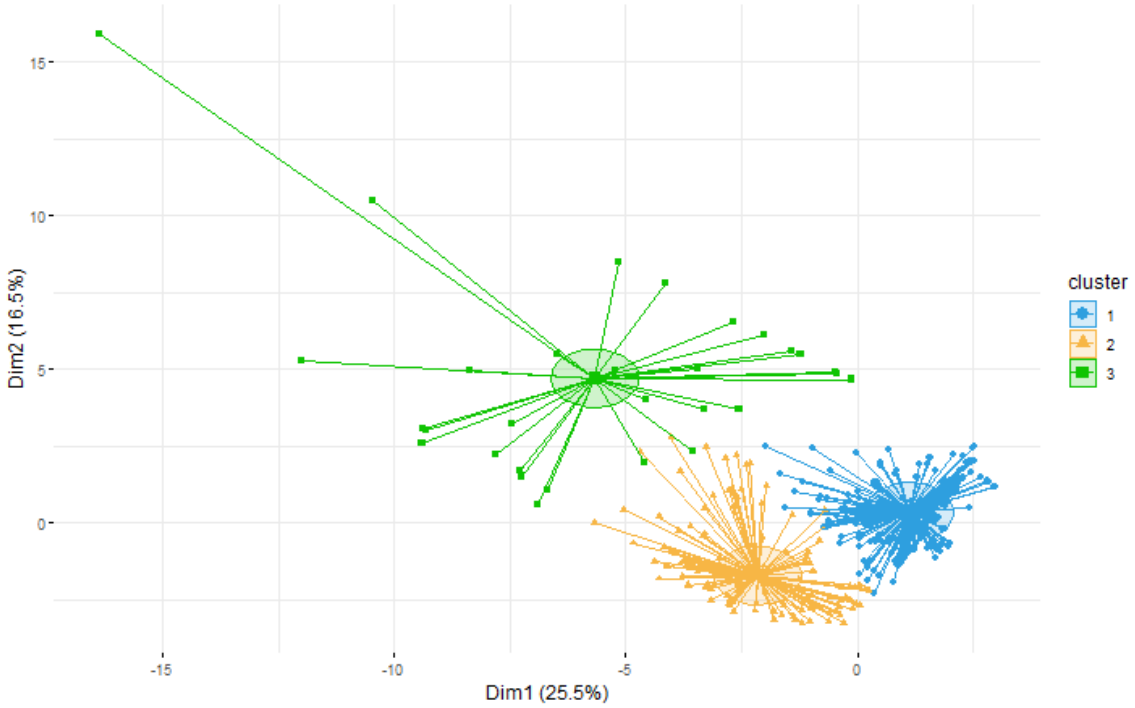


Figura 82 – Resultado da clusterização para k=3

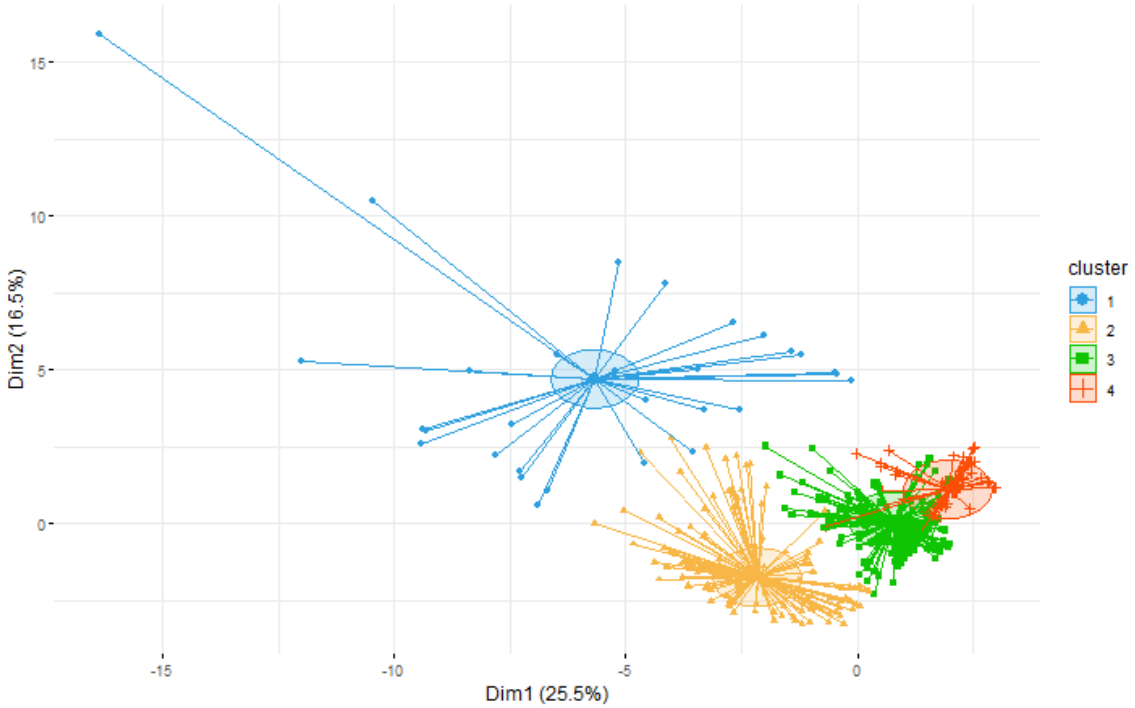


Figura 83 – Resultado da clusterização para k=4

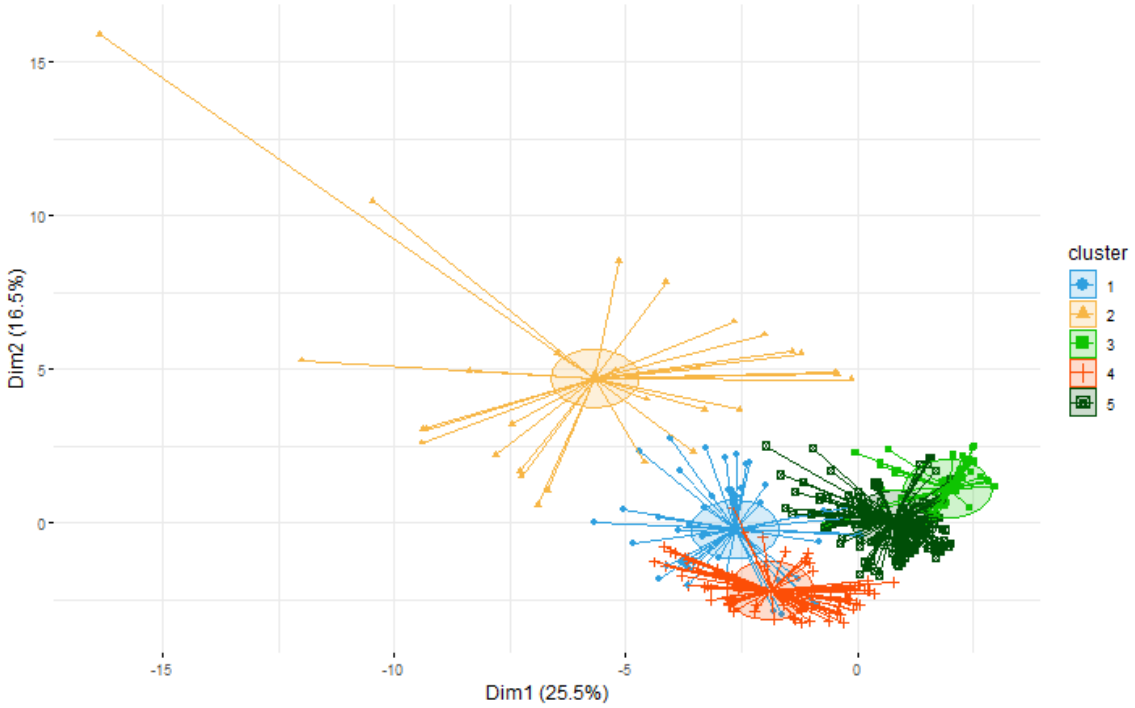


Figura 84 – Resultado da clusterização para k=5

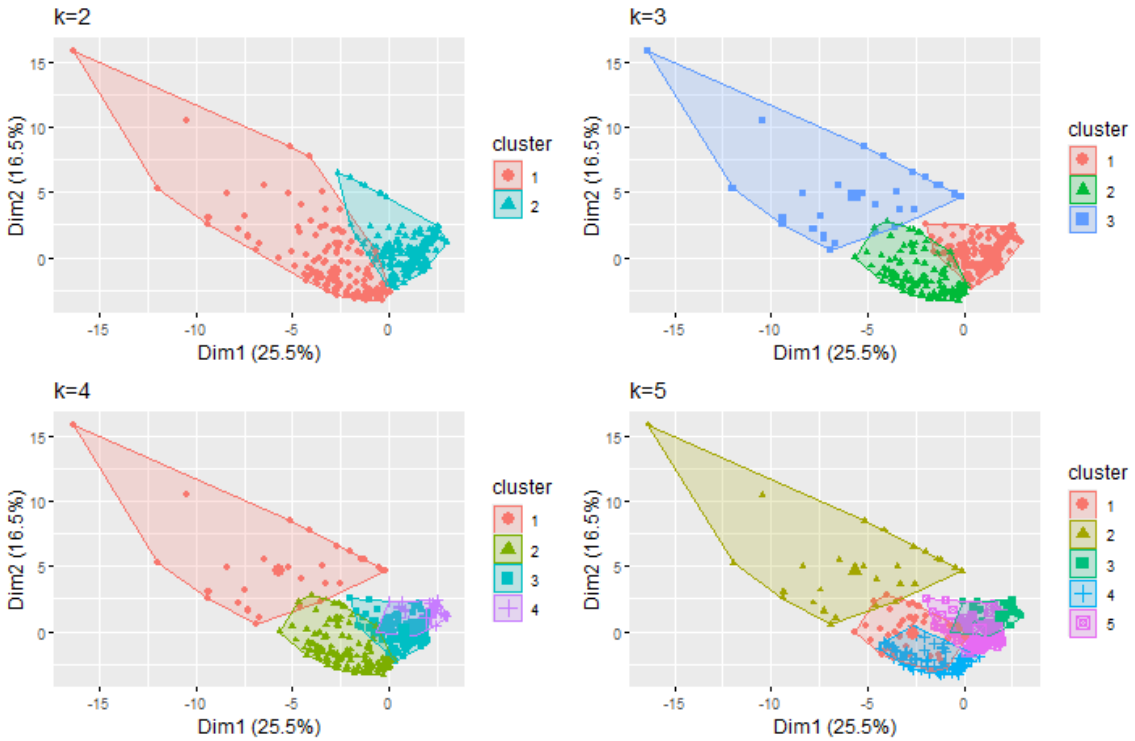


Figura 85 – Clusterização para k = 2, 3, 4, 5.

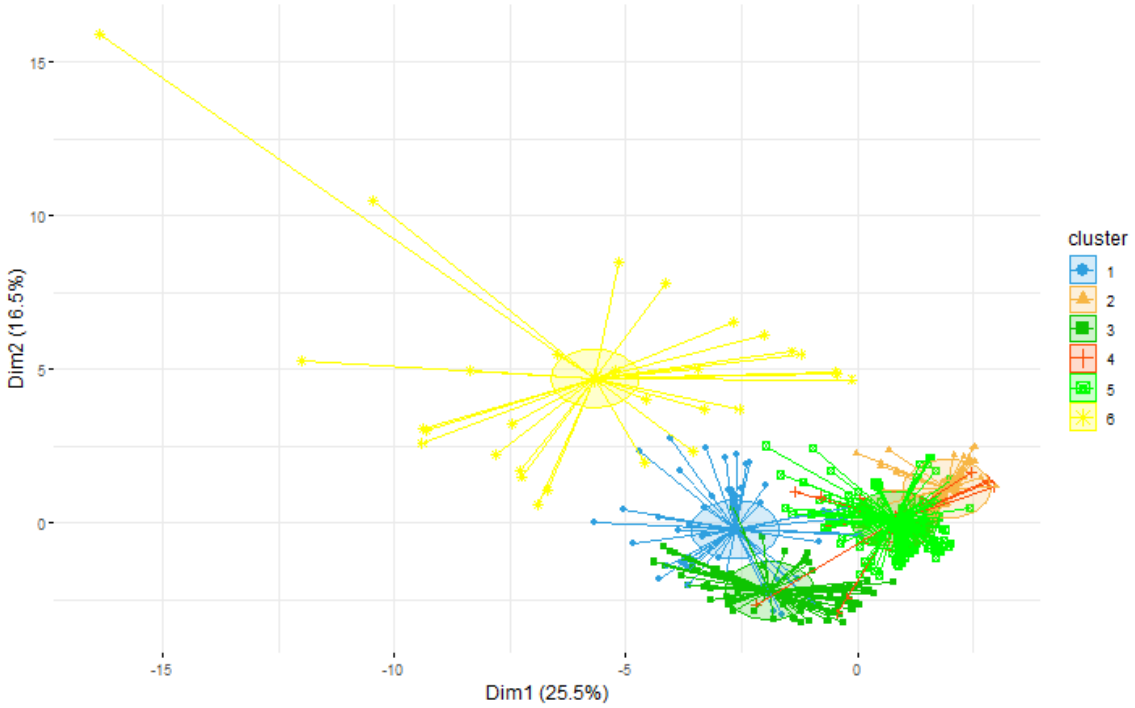


Figura 86 – Resultado da clusterização para k=6

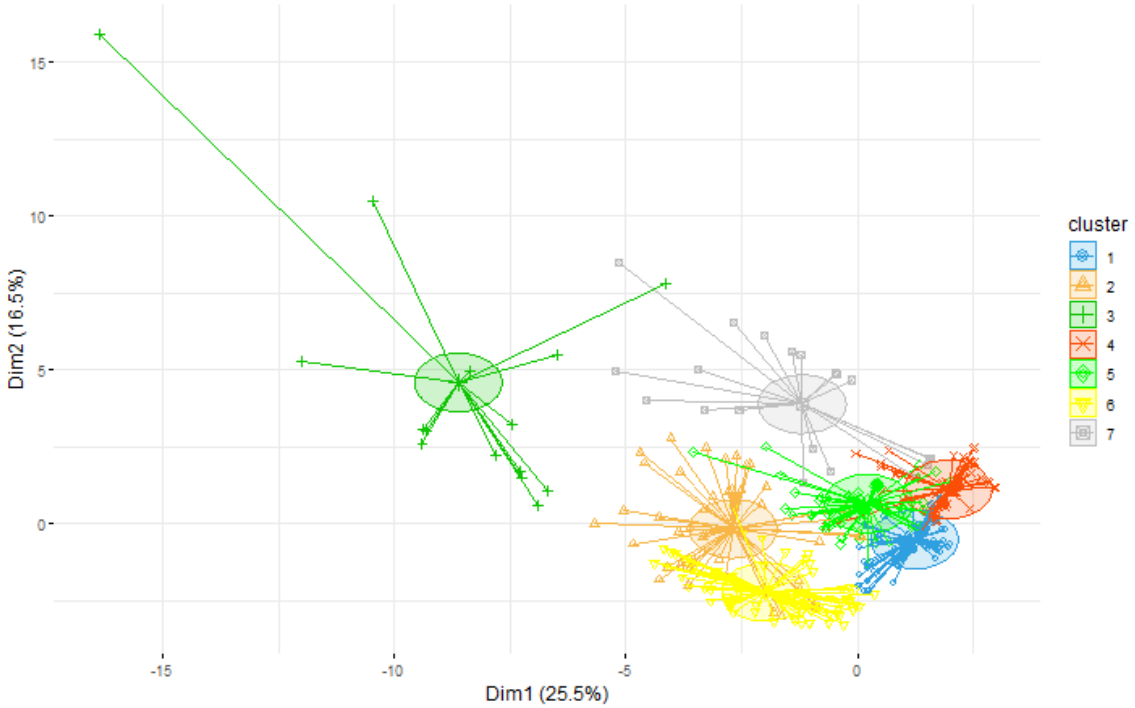


Figura 87 – Resultado da clusterização para k=7

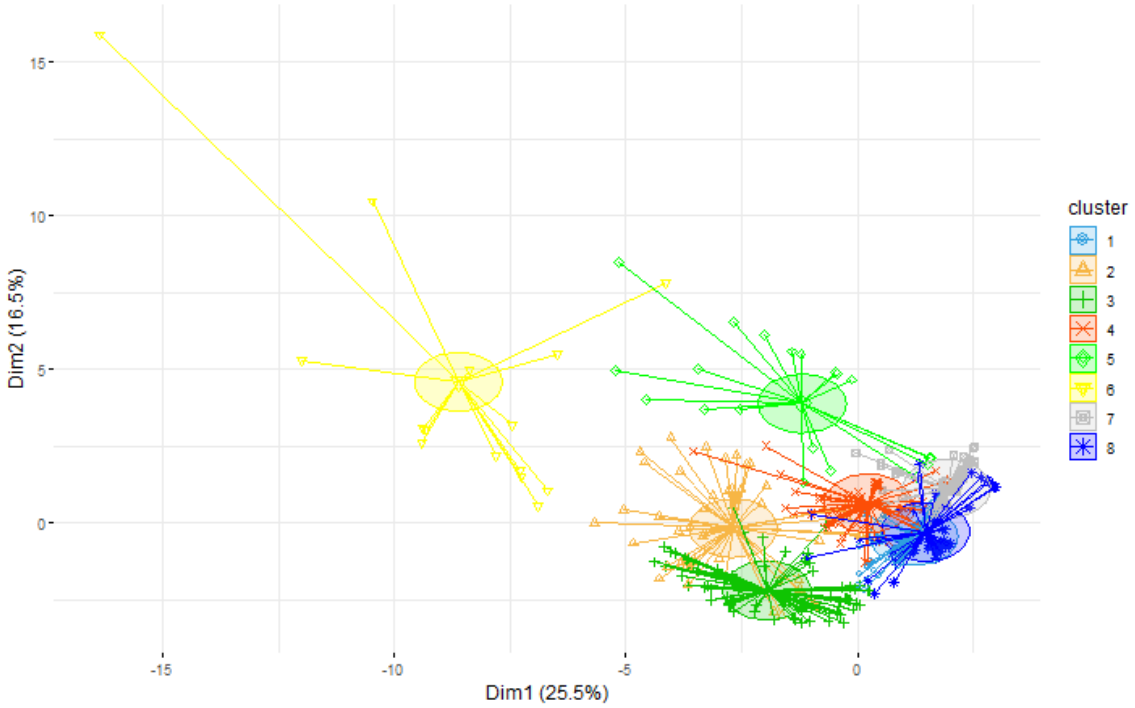


Figura 88 – Resultado da clusterização para k=8

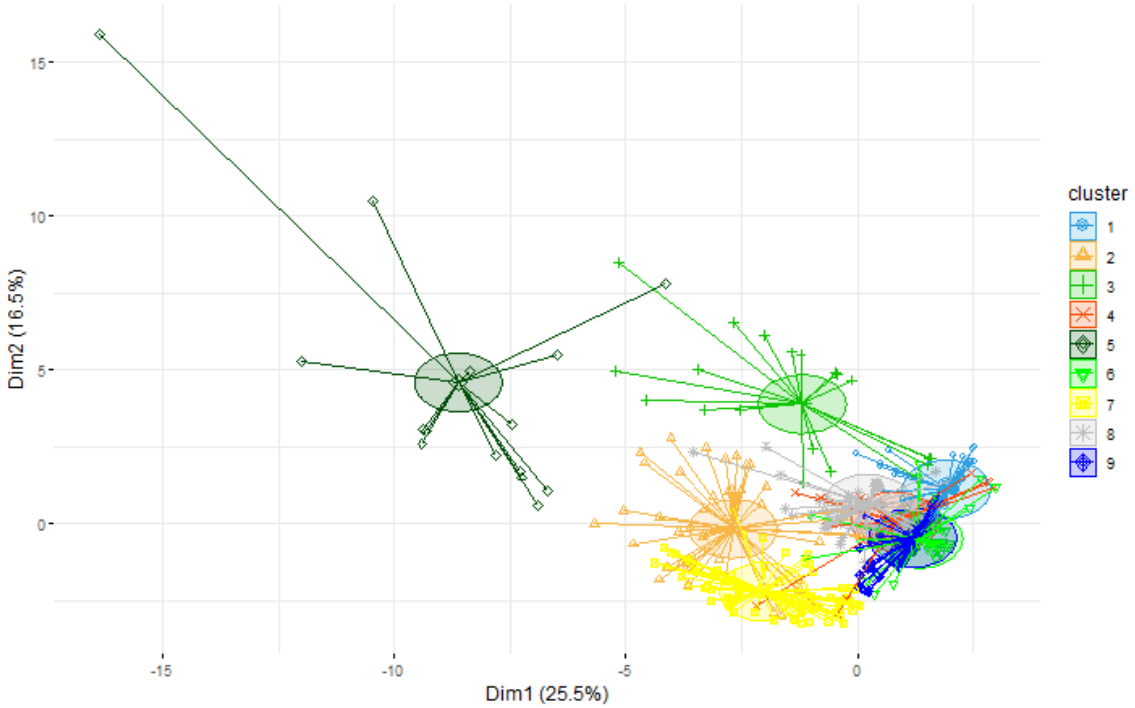


Figura 89 – Resultado da clusterização para k=9

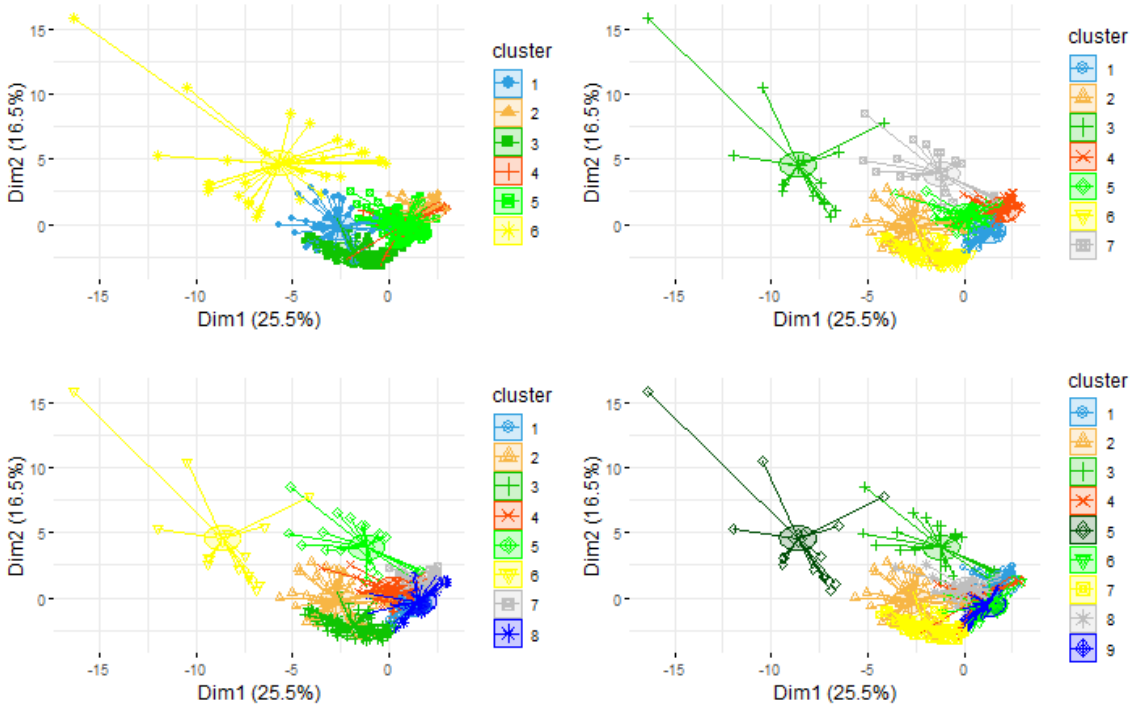


Figura 90 – Clusterização para k= 6, 7, 8, 9.

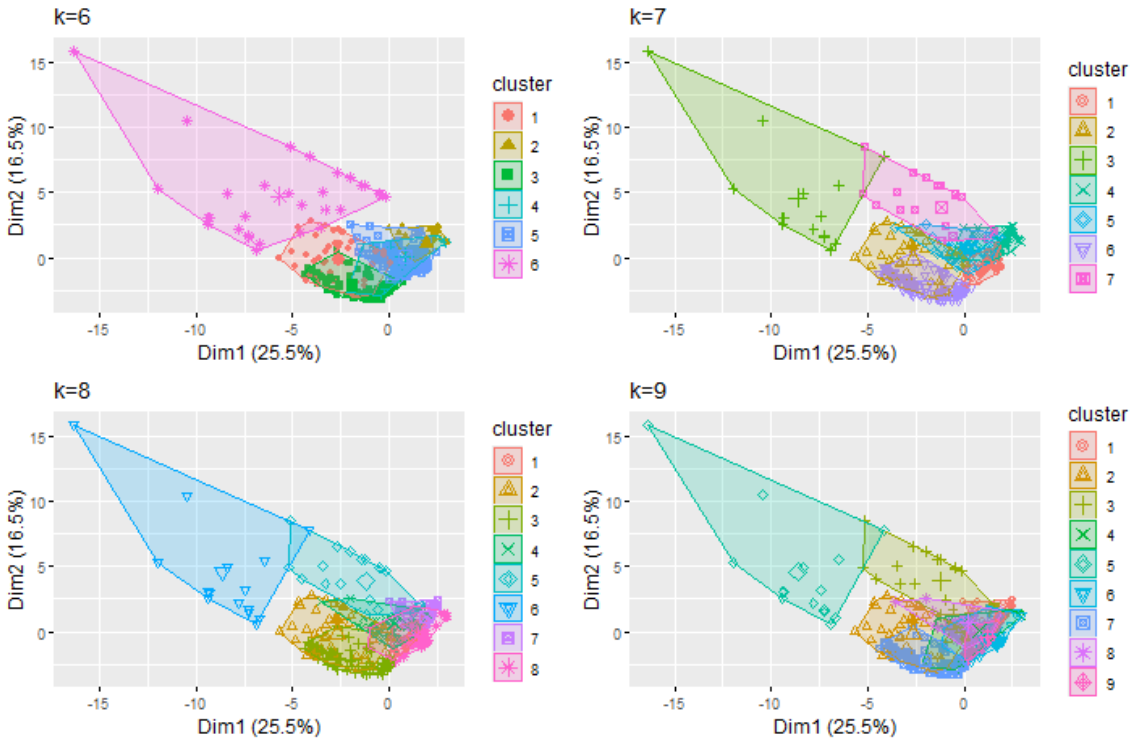


Figura 91 – Clusterização para k= 6, 7, 8, 9.

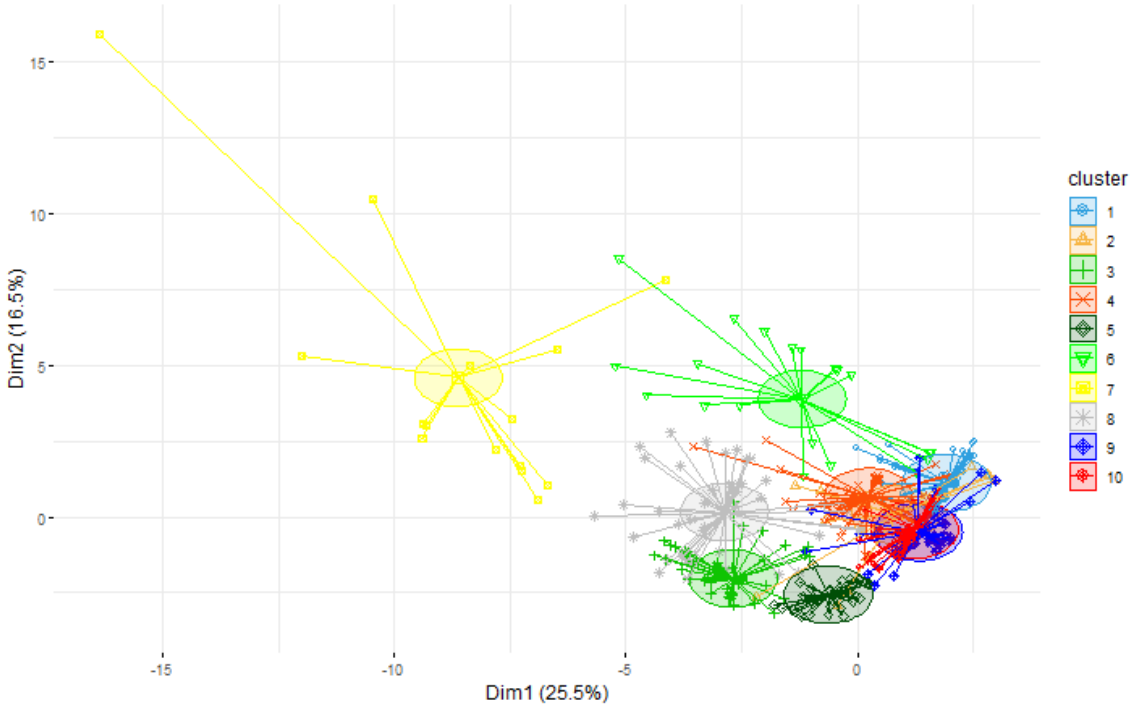


Figura 92 – Resultado da clusterização para k=10

Os resultados de validação dos *clusters* são apresentados na Figura 93 e 94. Assim como na simulação anterior, os agrupamentos formados são validados pelos métodos utilizados.

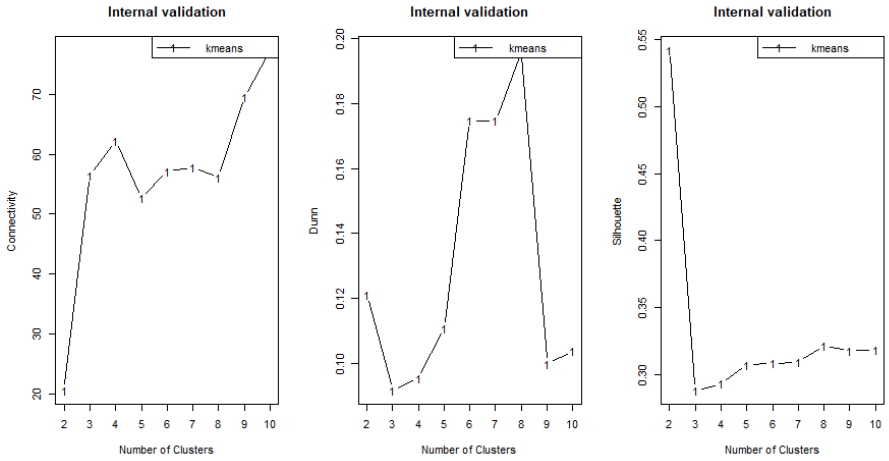


Figura 93 – Gráficos dos índices de validação interna.

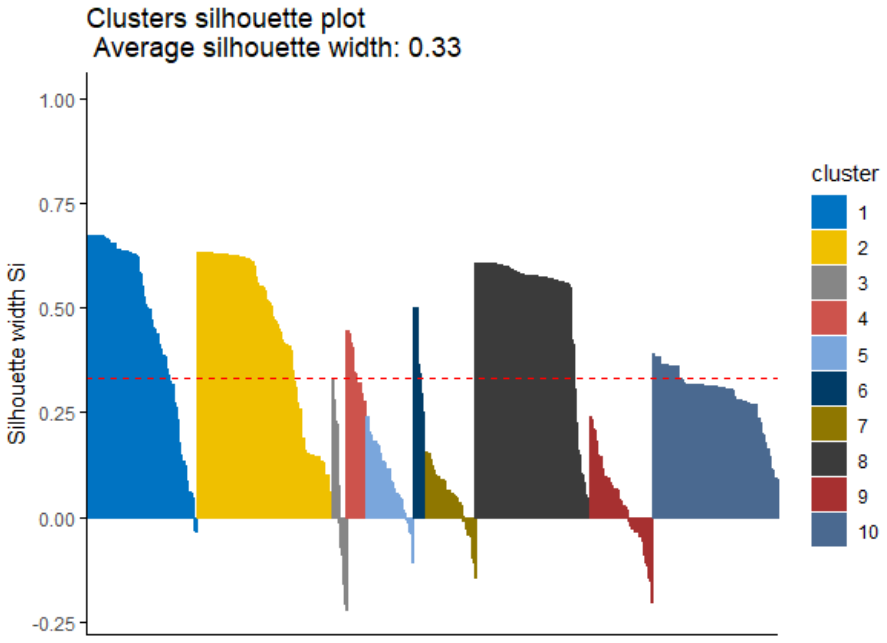


Figura 94 – Enter Caption

Contudo, observa-se que há diferenças notáveis e que estão associadas à natureza do banco de dados II, com número de pontes muito maior. Isso potencializa aspectos relativos a *outliers* e ruídos dos dados como visto na Subseção 2.7.3. Os valores ótimos dos métodos utilizados, para $k = 10$, são apresentados na Tabela 8. Demais informações e dendogramas estão contidos no Apêndice D.

Método	Resultado	*Cluster*
Connectivity	20,256	2
Silhouette	0,5418	8
Dunn	0,1963	2

Tabela 8 – Resumo da validação interna para k = 10.

4.2 Otimização

4.2.1 Resultados da Formulação I

Simulações baseadas nas formulações desenvolvidas (formulação I da Seção 3.4) neste trabalho foram realizadas considerando-se valores de parâmetros que se aproximam do que é comumente utilizado no campo prático. Inicialmente, buscou-se gerar resultados baseados no limite orçamentário e custos individuais de inspeção/manutenção de cada ativo. Portanto, a título de teste, foram gerados valores de custos para as quantidades totais de pontes em três níveis de priorização ($P1$, $P2$ e $P3$) e quantidades mínimas de pontes a serem selecionadas em cada nível ($N1$, $N2$ e $N3$). Para o conjunto de 115 pontes do banco de dados I foi definido que 20 dessas são classificadas como P1, 50 como P2 e as demais 45 como P3. Os custos individuais para atendimento das pontes e o limite orçamentário desta instância foram deliberados em um vetor com distribuição normal ($N(\mu; 1/4\mu)$ e descritos no Seção C.1. Nas figuras seguintes as pontes estão organizadas nos eixos das abscissas agrupadas em ordem crescente de prioridade.

As parcelas das pontes classificadas em determinadas prioridades foram definidas com base em valores comumente praticados. Para o primeiro caso, definiu-se que deveriam ser atendidas:

- N1 = 80% das pontes P1;
- N2 = 50% das pontes P2;
- N3 = 33% das pontes P3.

Este caso, em especial, trata da cobertura trienal das pontes consideradas mais conservadas e bienal para as classificadas como P2. A Figura 95 apresenta o resultado dessa simulação.

A Figura 96 apresenta o resultado para a cobertura de:

- N1 = 90% das pontes P1;
- N2 = 60% das pontes P2;
- N3 = 33% das pontes P3.

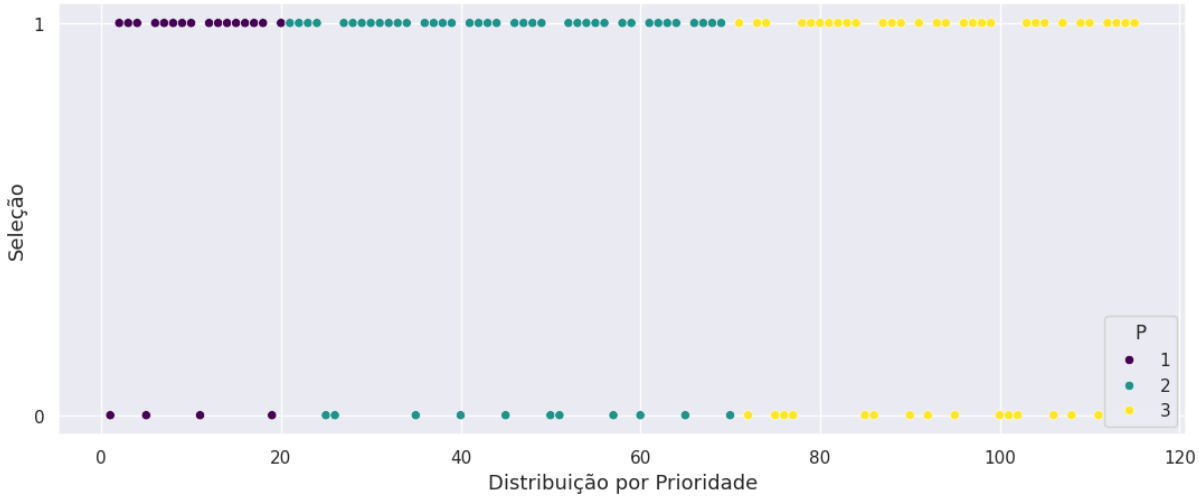


Figura 95 – Instância da Formulação I (80% de P1, 50% de P2 e 33% de P3).

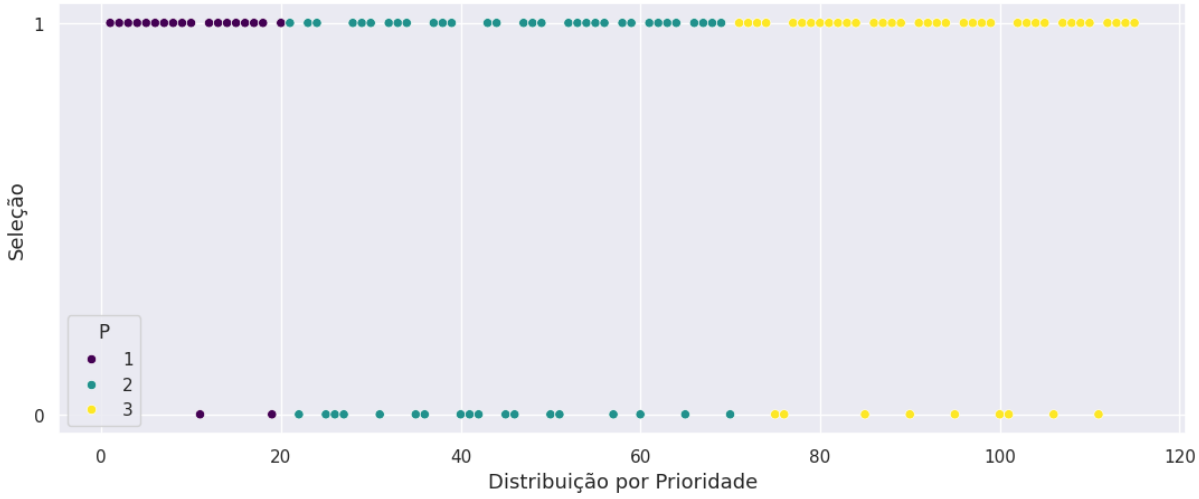


Figura 96 – Instância da Formulação I (90% de P1, 60% de P2 e 33% de P3).

O caso seguinte contempla a situação de cobertura de:

- N1 = 100% das pontes P1;
- N2 = 50% das pontes P2;
- N3 = 33% das pontes P3.

Essa distribuição percentual dos valores paramétricos é bastante usual nos casos de inspeções anuais das pontes de maior prioridade e, em geral, classificadas com nota 3 pelos parâmetros estrutural, funcional e de durabilidade da NBR 9452 (ABNT, 2023b). Inspeções rotineiras bienais para as pontes P2 e trienais para as P3, naturalmente se preservando a rotatividade nas seleções de ativos.

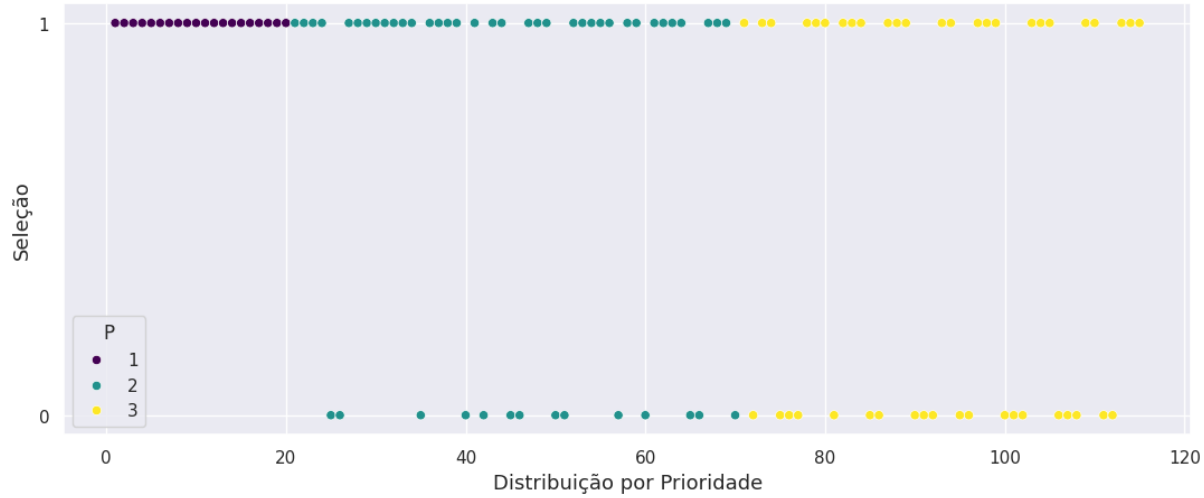
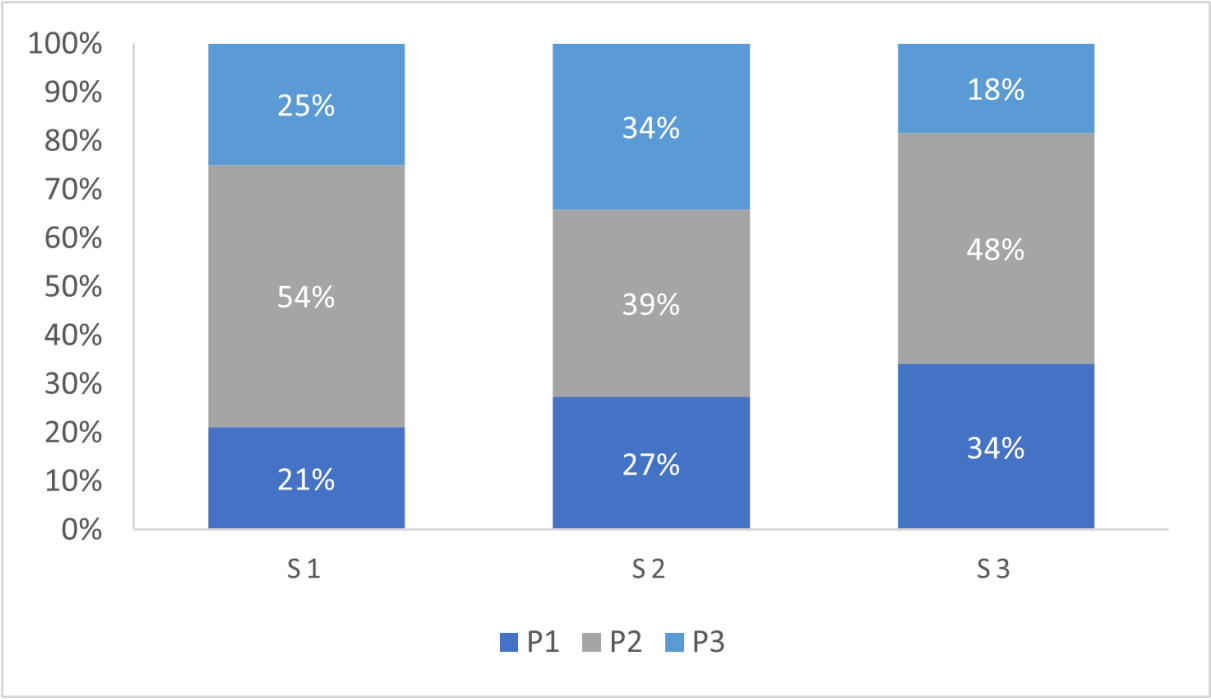


Figura 97 – Instância da formulação I (100% de P1, 50% de P2 e 33% de P3).

A Figura 98 apresenta os percentuais do montante financeiro disponibilizado para cada nível de prioridade em cada simulação. Observa-se o crescimento dos valores até se contemplar a totalidade das pontes P1 (conforme restrições do modelo) e diferentes composições de recursos para os demais níveis em função dos diferentes valores de custos individuais de cada ativo.

Figura 98 – Montante de recurso orçamentário destinado a cada nível de prioridade em cada simulação.



Os resultados obtidos são coerentes e demonstram que a implementação da formula-

ção baseada no problema da mochila pode auxiliar no desenvolvimento da proposta inicial de combinação com as ferramentas de agrupamento.

4.2.2 Resultados da Formulação II

Para a segunda formulação proposta foram considerados valores de parâmetros que fossem associados ao conceito de classificação por meio do índice de condição (IC), que foram obtidos. Para tal, definiu-se um vetor de custos de distribuição normal ($N(\mu; 1/4\mu)$ e o valor total disponibilizado para manutenções (capacidade da mochila) atendendo parcelas dos grupos das pontes classificadas, Tabela 9. A partir disso, é necessário conhecer o valor financeiro disponibilizado para manutenção. Dessa forma, determina-se a ordem de grandeza do limite orçamentário total em virtude dos custos de manutenção das pontes de maior prioridade. No caso, em paralelo à NBR 9452, os menores valores de IC são referentes às pontes com maiores necessidades de manutenção.

Índice de Condição	% do custo atendido
1	100
2	50
3	50
4	20
5	0

Tabela 9 – Percentagem dos custos individuais para composição do valor total.

4.2.2.1 Resultados da Simulação

A Figura 99 apresenta o resultado da seleção de pontes para o caso de $\lambda = 1$ com as pontes ordenadas em função do *cluster* aos quais pertencem, para um valor de $k = 5$. Na Figura 99 pode-se identificar na solução as pontes selecionados em função do IC. Nesta instância o valor da função objetivo $\Phi(\lambda = 1) = 84.9$. Na Figura 100 as pontes estão, também organizadas no eixo das abscissas em ordem relativa aos *clusters* aos quais pertencem. Porém, as cores agora utilizadas são relativas à classificação do IC. As pontes selecionadas em cada cluster são apresentadas na Figura 101, indicando elevada presença de pontes com menores valores de IC. Esse padrão gráfico doravante será utilizado nas demais instâncias.

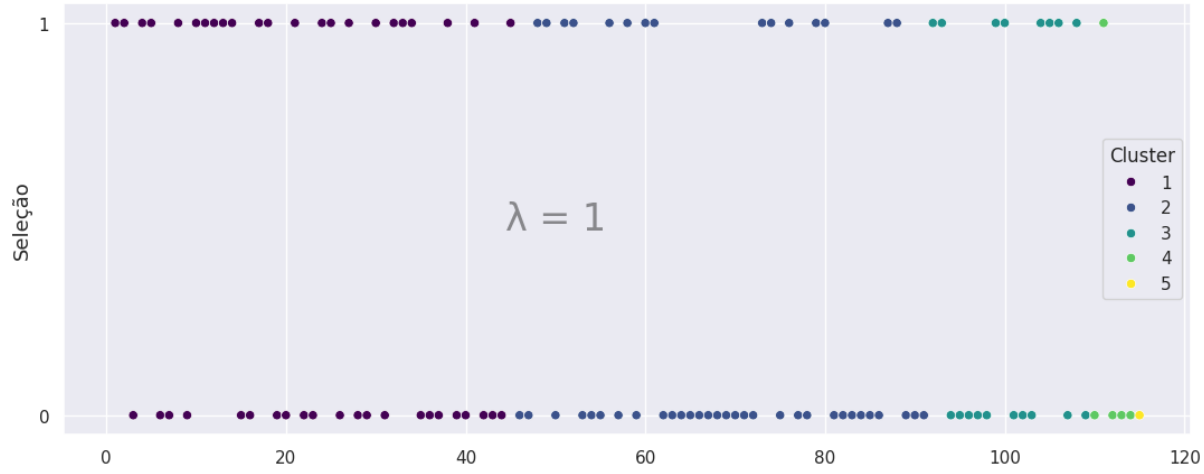


Figura 99 – Seleção de pontes para $\lambda = 1$

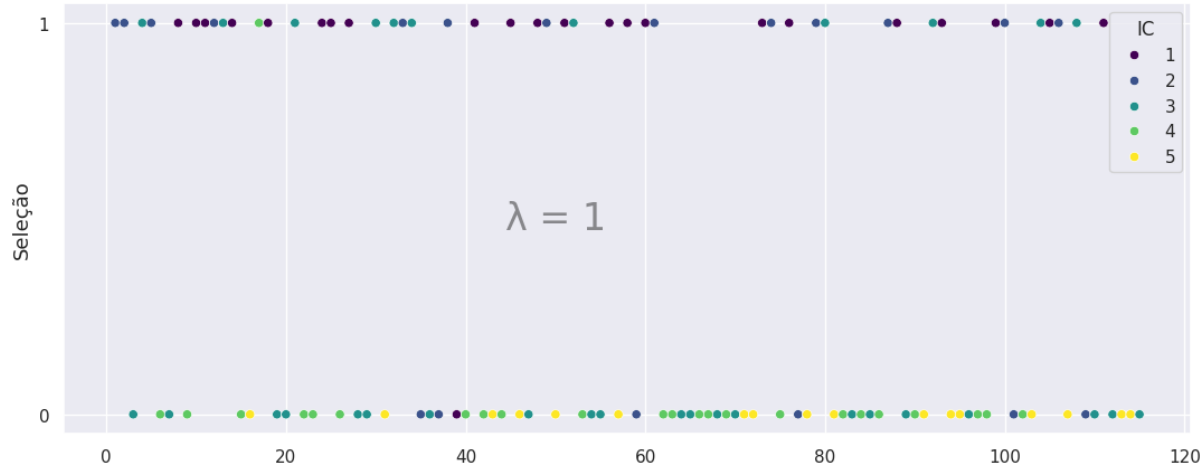


Figura 100 – Seleção de pontes em função do IC ($\lambda = 1$).

A Figura 102 a 106 apresentam os resultados para $\lambda = \{2,3\}$. Nestas instâncias os valores da função objetivo $\Phi(\lambda = 2) = 180.0$ e $\Phi(\lambda = 3) = 428.9$, respectivamente.

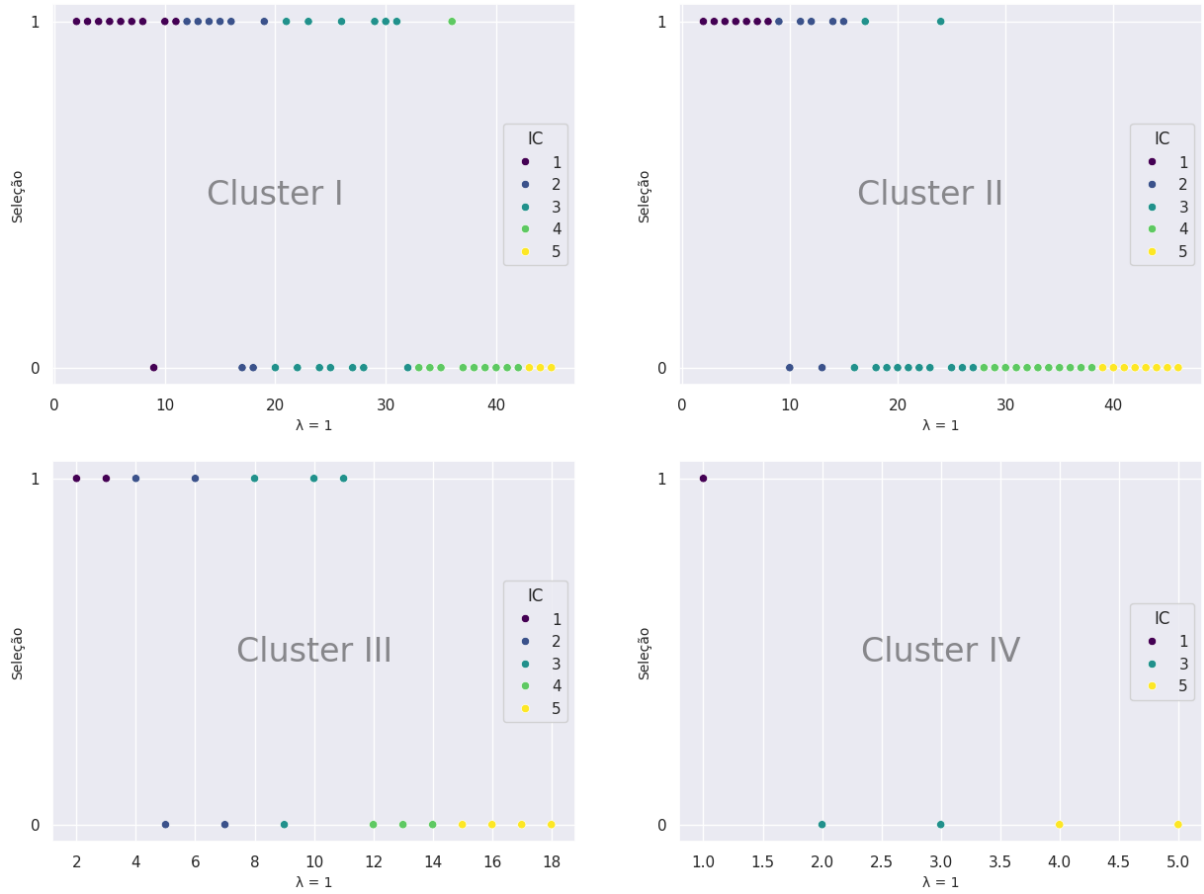


Figura 101 – Pontes selecionadas por cluster

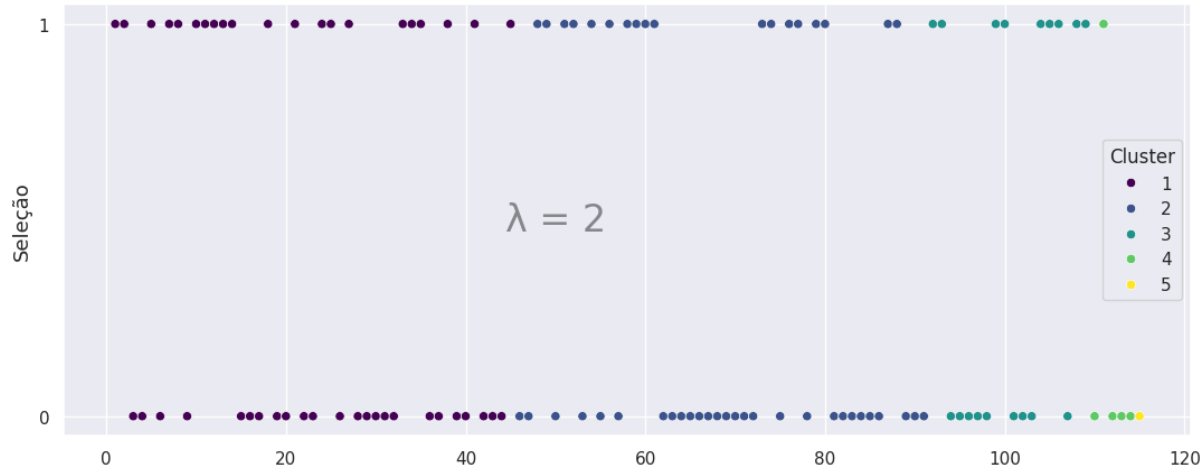


Figura 102 – Seleção de pontes para $\lambda = 2$

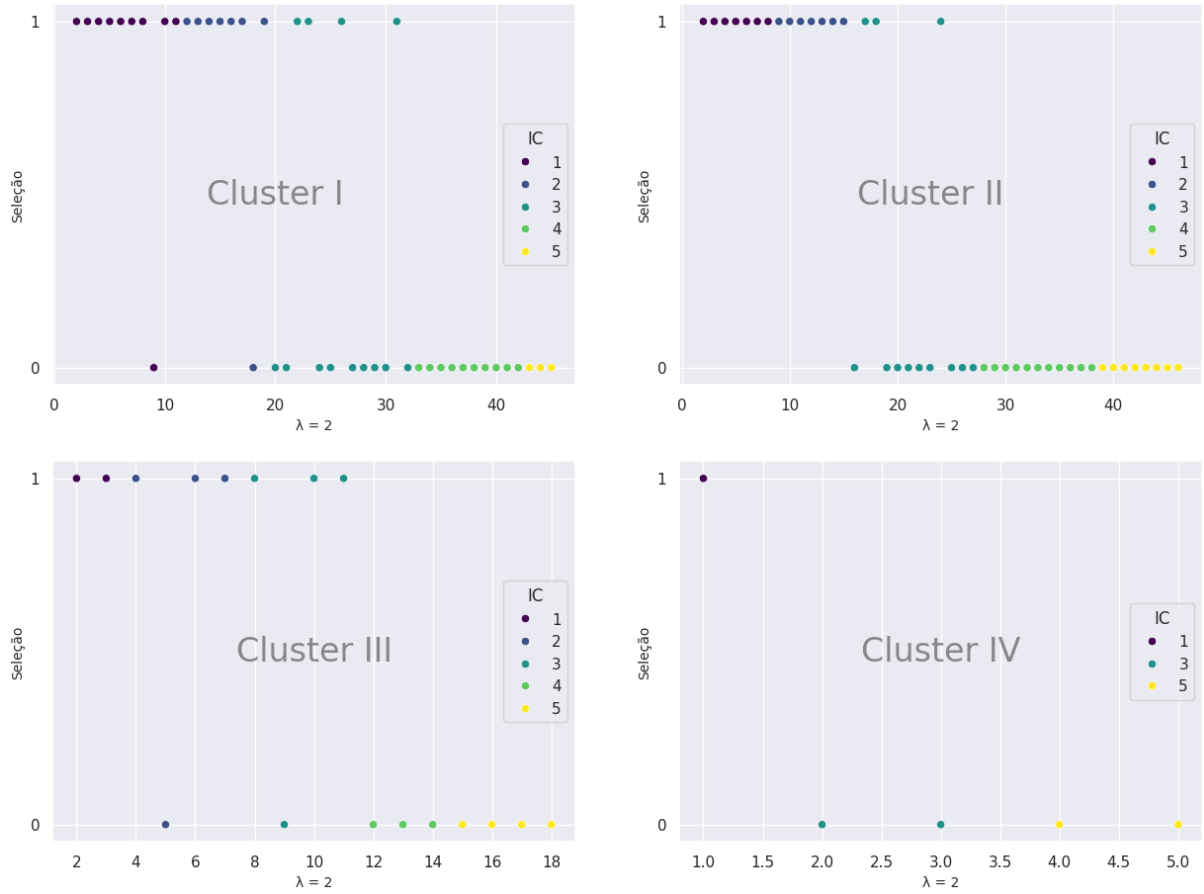


Figura 104 – Pontes selecionadas por cluster ($\lambda = 2$)

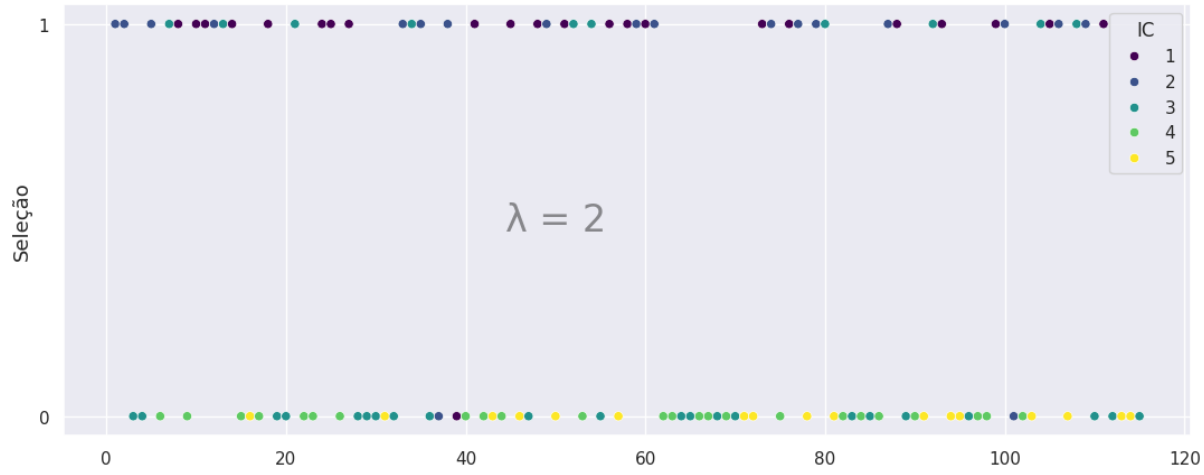


Figura 103 – Seleção de pontes em função do IC ($\lambda = 2$).

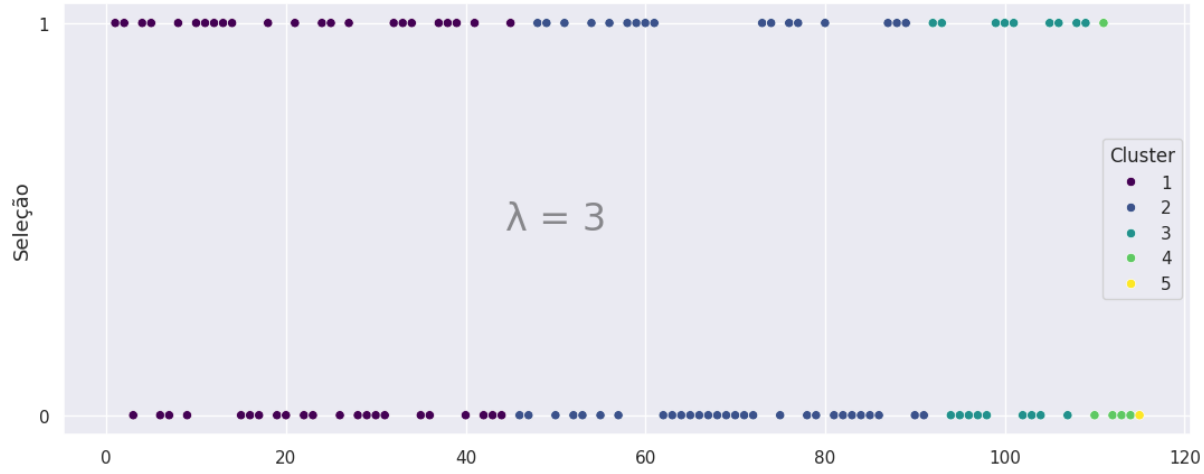


Figura 105 – Seleção de pontes para $\lambda = 3$

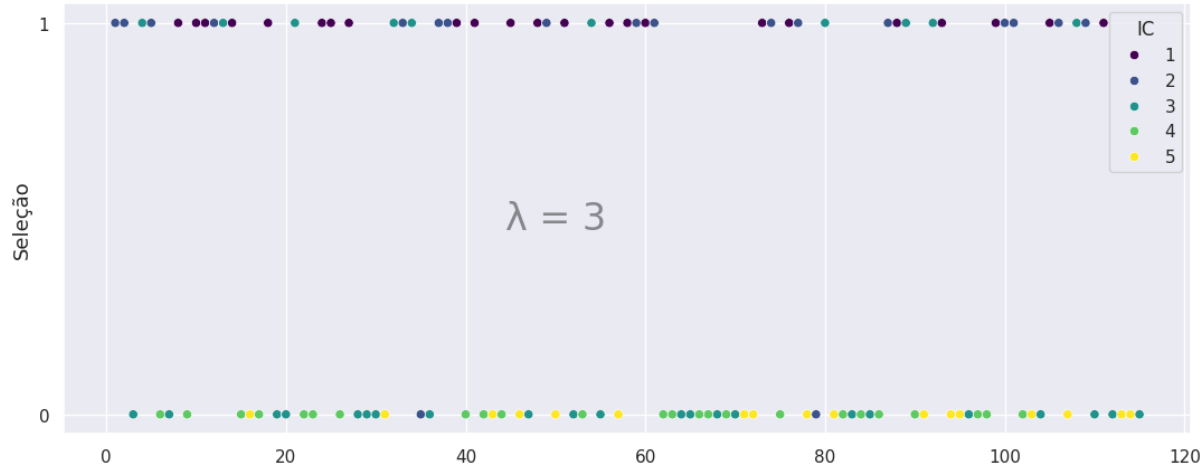


Figura 106 – Seleção de pontes em função do IC ($\lambda = 3$).

Os resultados das simulações podem ser avaliados sob a perspectiva do comportamento dos elementos em seus respectivos *clusters* e dos subconjuntos relativos aos índices de condição. Como esperado, as quantidades de pontes com valores de $IC = \{1,2\}$ permaneceram preponderantes nos resultados e representaram valores em torno de 70% do recurso total. Apenas para $\lambda = 1$ há presença das pontes com $IC = 4$. De forma geral, os resultados de seleção em função do IC apresentaram alterações inexpressivas para os diferentes valores de λ e um comportamento equivalente dos percentuais de financeiros que compõem os *clusters*, conforme Figura 108 a 110.

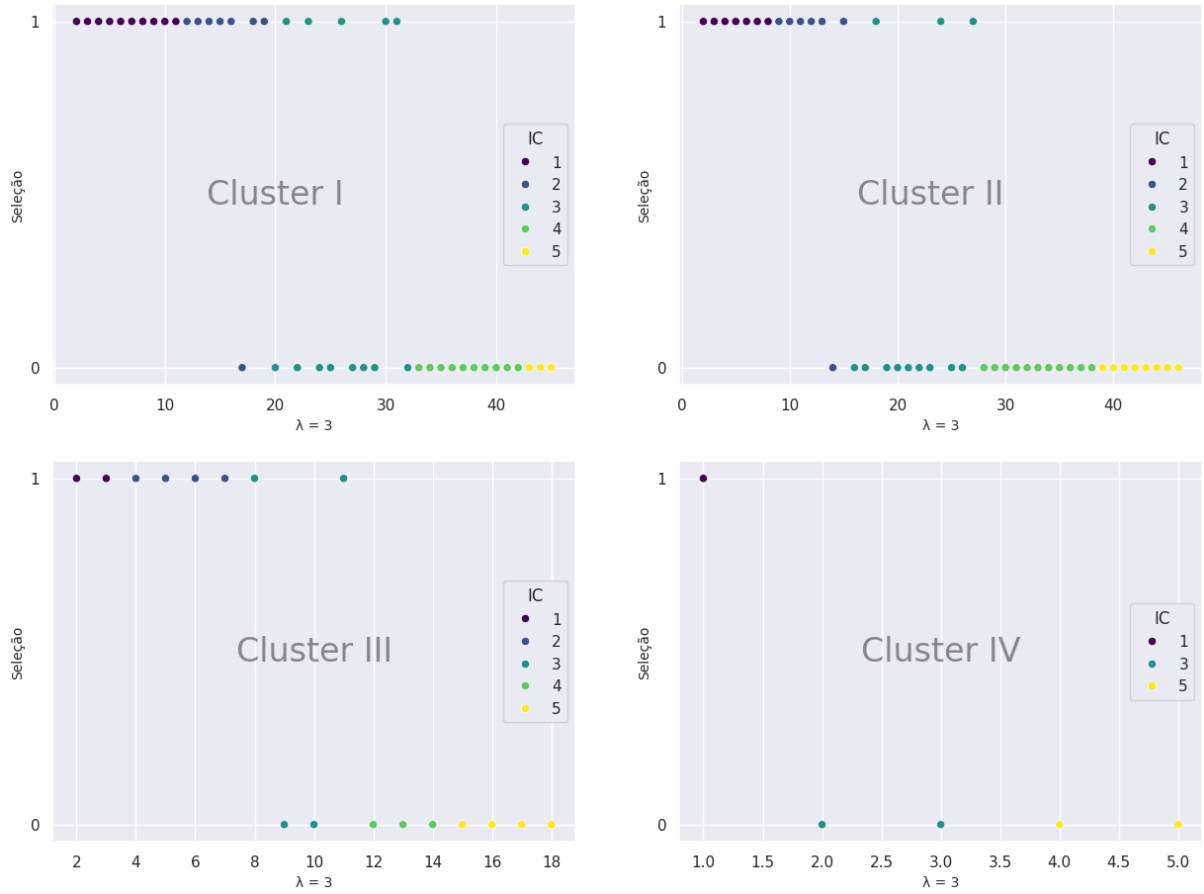
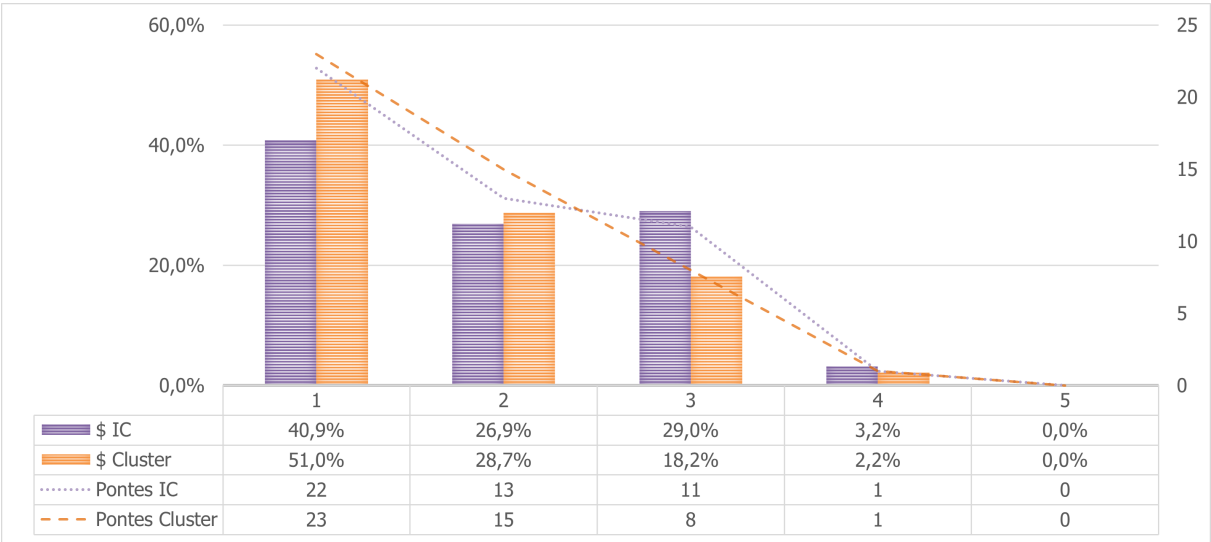
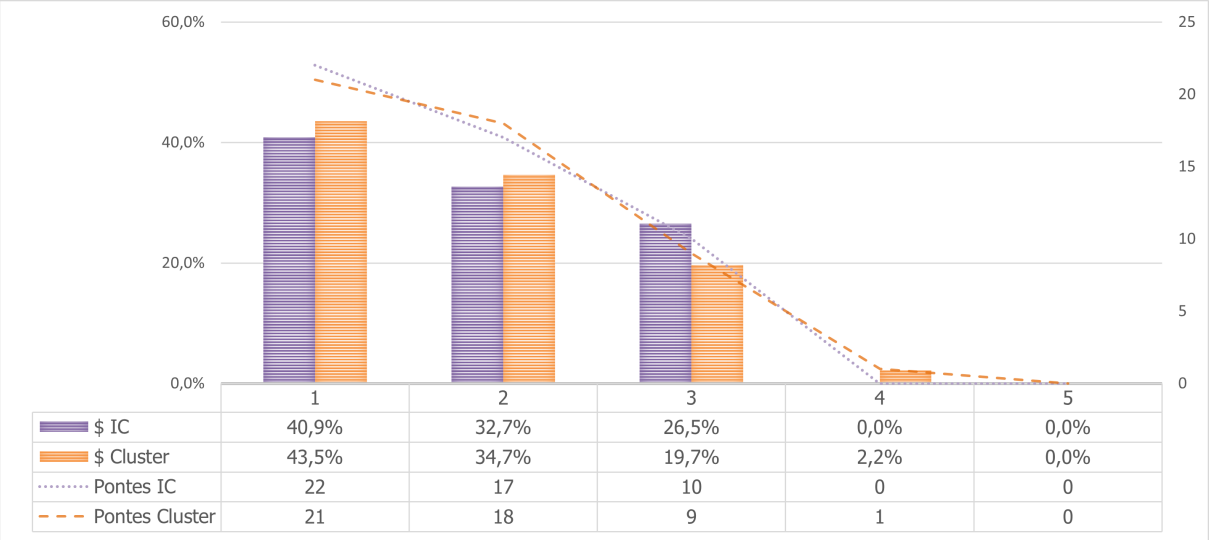


Figura 107 – Pontes selecionadas por cluster ($\lambda = 3$)



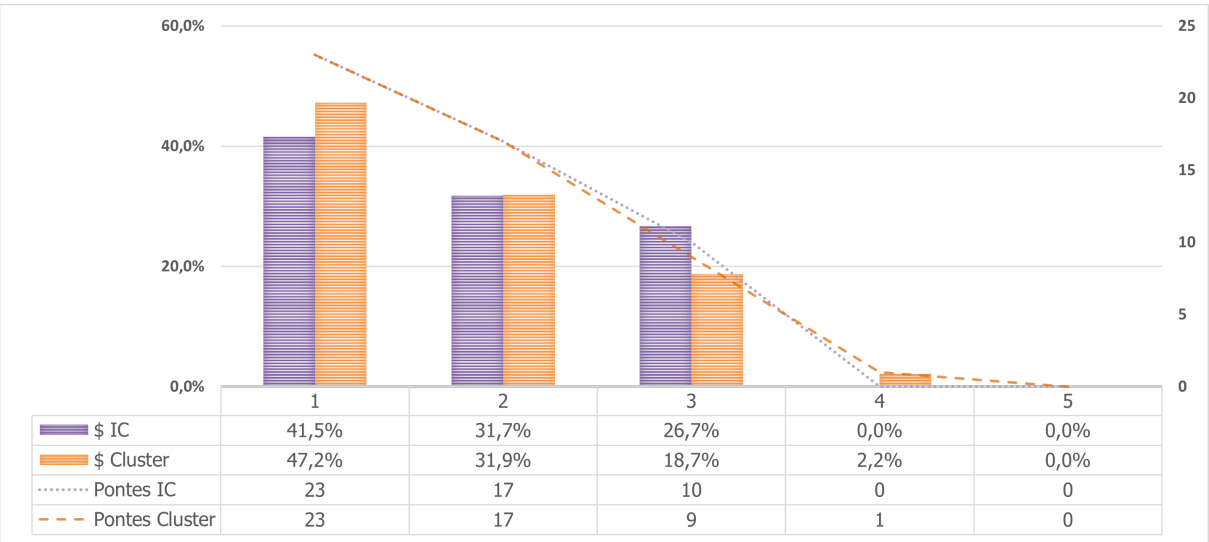
	1	2	3	4	5
$ IC	40,9%	26,9%	29,0%	3,2%	0,0%
$ Cluster	51,0%	28,7%	18,2%	2,2%	0,0%
Pontes IC	22	13	11	1	0
Pontes Cluster	23	15	8	1	0

Figura 108 – Distribuição dos valores percentuais orçamentários e quantitativos por IC e *clusters* ($\lambda = 1$)



	1	2	3	4	5
$ IC	40,9%	32,7%	26,5%	0,0%	0,0%
$ Cluster	43,5%	34,7%	19,7%	2,2%	0,0%
Pontes IC	22	17	10	0	0
Pontes Cluster	21	18	9	1	0

Figura 109 – Distribuição dos valores percentuais orçamentários e quantitativos por IC e *clusters* ($\lambda = 2$)



	1	2	3	4	5
$ IC	41,5%	31,7%	26,7%	0,0%	0,0%
$ Cluster	47,2%	31,9%	18,7%	2,2%	0,0%
Pontes IC	23	17	10	0	0
Pontes Cluster	23	17	9	1	0

Figura 110 – Distribuição dos valores percentuais orçamentários e quantitativos por IC e *clusters* ($\lambda = 3$)

Os resultados indicam que as pontes selecionadas atendem cada subconjunto de IC de acordo com a tabela Tabela 10. Ou seja, para $\lambda = 1$, uma parcela de 98% da demanda financeira prevista para esse subconjunto é atendida. Enquanto para os valores de $IC = \{4, 5\}$ não há seleção de pontes, exceto para $\lambda = 1$ em que foram atendidos 7% das demandas orçamentárias de $IC = 4$. Esses resultados permitem analisar o quanto das demandas individuais por IC foram atendidas em relação ao total de recursos disponibilizados para manutenção.

No caso simulado, os resultados parcialmente atenderam as condições previstas de direcionamento de recursos para o $IC = 1$ considerando a Tabela 10, principalmente no caso de $\lambda = 3$ (100% do recurso previsto). Para $IC = 2$ os resultados foram superiores ao previsto de 50% para todos os valores de λ. Por fim, os resultados para $IC = 3$ foram pouco menores que o previsto de atendimento, também de 50%, mas estiveram acima dos dos 40% em todas as instâncias.

% de custos por IC			
IC	$\lambda = 1$	$\lambda = 2$	$\lambda = 3$
1	98	98	100
2	77	94	91
3	46	42	43
4	7	0	0
5	0	0	0

Tabela 10 – Percentagem dos custos individuais para composição do valor total em função do IC.

De forma equivalente, a composição dos resultados em relação aos *clusters* não apresenta alterações significativas para os diferentes valores de λ testados. Observa-se elevada presença de pontes dos *clusters* {1,2} e, portanto, parcelas significativas dos recursos ($\approx 80\%$) são destinadas a esses dois agrupamentos. Os percentuais atendidos em relação aos *clusters* considerando-se as demandas previstas de recursos para cada agrupamento são apresentadas na Tabela 11. Esses resultados são relevantes pois permitem compreender em cenários reais o quão semelhantes são as classificações de engenharia (via IC) e a similaridade existente no conjunto de pontes. Neste contexto, há como se avaliar possíveis estratégias de atendimentos dessas duas formas de particionamento das pontes.

% de custos por *Clusters*			
Cluster	$\lambda = 1$	$\lambda = 2$	$\lambda = 3$
1	56	48	48
2	35	42	42
3	51	55	55
4	20	20	20
5	0	0	0

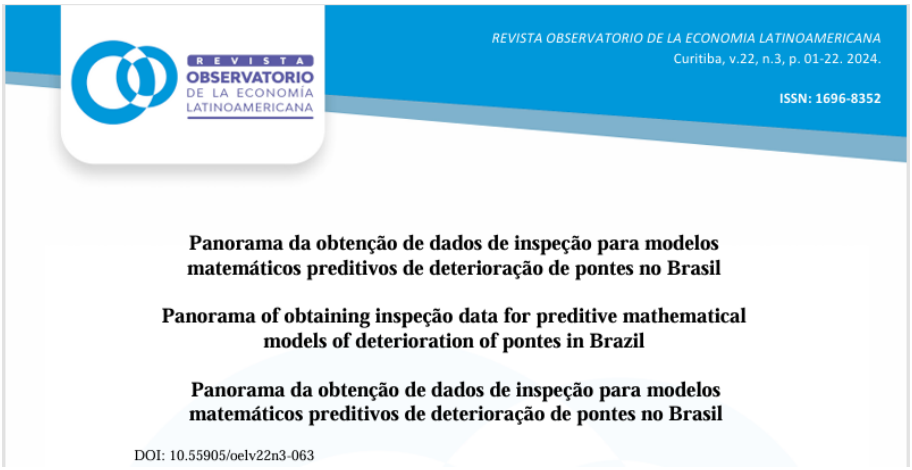
Tabela 11 – Percentagem dos custos individuais para composição do valor total em função dos *clusters*.

5 Atividades Desenvolvidas

No desenvolvimento dos estudos de tese foram produzidos trabalhos nos campos teóricos e experimentais relacionados ao tema. Publicações de diversas naturezas como artigos, manuais e relatórios técnicos e apresentação de trabalhos foram desenvolvidas. A participação do autor nesses trabalhos promoveu maior envolvimento no campo profissional com atores diretamente ligados à área de monitoramento e gerenciamento de pontes.

5.1 Produção Bibliográfica

1. Artigo submetido e publicado em 2023 junto à *Revista Observatório de la Economia Latinoamericana* com o título "**Panorama da Obtenção de Dados de Inspeção para Modelos Matemáticos Preditivos de Deterioração de Pontes no Brasil**" (Carvalho Neto; Cruzeiro; Bittencourt, 2023). Esse trabalho trata do levantamento qualitativo das condições de inspeção sob a ótica de profissionais de diferentes níveis envolvidos no processo (inspetores e gestores). No trabalho submetido abordou-se questões relativas a quatro tópicos principais: experiência profissional, metodologia de inspeção, perspectivas e tomadas de decisão (Item 1). Buscou-se identificar dentre esses fatores as limitações e peculiaridades da dependência dos modelos matemáticos com os dados oriundos das inspeções de campo.



Artigo publicado.

2. A participação do autor em comissão de estudos de revisão da NBR 9452 resultou no desenvolvimento (ainda em curso) do manual de inspeções de pontes e de relatórios de pesquisa sobre o estado da arte publicados em 2024 pelo IPR (Instituto de Pesquisas Rodoviárias) [1] com os títulos: Procedimentos Internacionais de Inspeções,

[1] https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/relatorios-de-pesquisa-1/

Sistema de Gerenciamento de Pontes - Módulo de Custos, Planejamento de Inspeções e Manutenções. Nestes relatórios o autor compõe a comissão de revisão como membro da Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (ABECE) Figura 111.

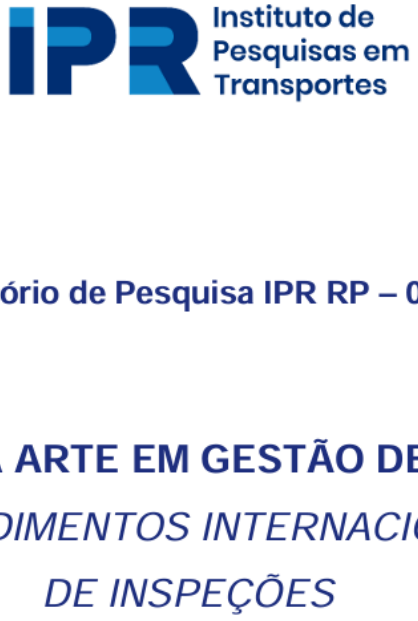


Figura 111 – Relatório de Pesquisa sobre o estado da arte do gerenciamento de pontes.

3. Em conjunto com pesquisadores da universidade do Minho de Portugal (UMinho) foram publicados dois trabalhos relacionados ao estado de pontes rodoviárias no Brasil. Os trabalhos foram submetidos à VI Jornada Portuguesa de Engenharia de Estruturas, sendo um relacionado à aplicação de redes neurais ("**Aplicação de Redes Neurais em Modelos Preditivos de Deterioração de Pontes Rodoviárias**")(BONATTE et al., 2022) e outro baseado em análise de confiabilidade ("**Avaliação da Segurança de Pontes Existentes por meio da Análise de Confiabilidade - Estudos de Caso**")(SANTOS et al., 2022a), Figura 112 e 113.
4. Apresentação de trabalho aplicado sobre clusterização de dados a conjunto de pontes ferroviárias no Brasil no ano de 2023 com a participação no Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas com a apresentação do (Figura 114 (Carvalho Neto; Cruzeiro; Bittencourt, 2023).
5. Ao final do ano de 2024 foi submetido ao periódico IBRACON *Structural and Material Journal* o artigo entitulado "***Clustering applied to data of railway bridges in Brazil***"para publicação de resultados relacionados a este estudo e atendimento aos requisitos de produção bibliográfica definidos pelo programa de pós-graduação em Modelagem Matemática e Computacional do CEFET-MG.

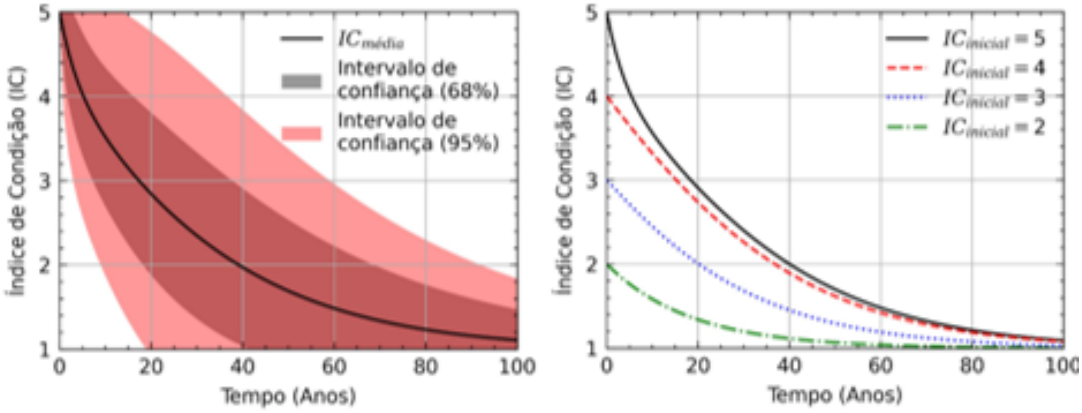


Figura 9. Previsão de deterioração da ponte

Figura 112 – Gráfico de trabalho publicado na VI Jornada Portuguesa de Engenharia de Estruturas sobre modelos preditivos de deterioração.

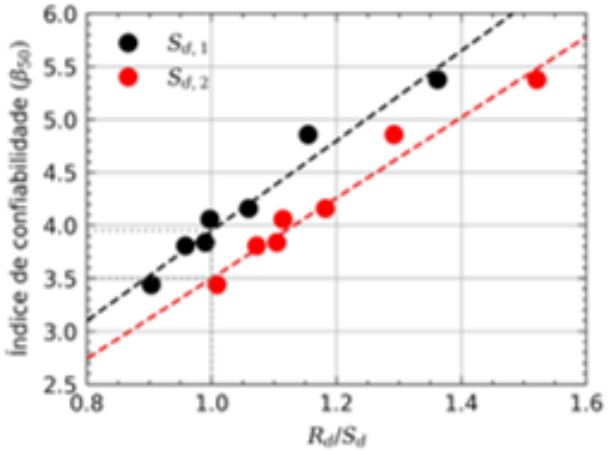


Figura 10. Relação das solicitações (S_d) e resistências (R_d) de projeto e o β_{50}

Figura 113 – Gráfico de trabalho publicado na VI Jornada Portuguesa de Engenharia de Estruturas sobre análise de confiabilidade.

5.2 Trabalhos Técnicos e Inspeções de Campo

No final do ano de 2021, o autor participa como membro da equipe do Grupo de Modelagem em Estruturas de Concreto (GMEC) da Universidade de São Paulo (USP) pela Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia (FDTE) que realizou o monitoramento e inspeção em três pontes ferroviárias. O projeto denominado **"Avaliação da Integridade Estrutural e da Capacidade de Carga de Viadutos Ferroviárias da Estrada de Ferro Vitória a Minas"** gerou os documentos técnicos de inspeção e monitoramento para as pontes do Viaduto do Cabral quilômetros 028+527 (Figura 115), Ponte da Represa do Peti no km 02+399 (Figura 116) e Viaduto MG-436 no km 021+503 (Figura 117). Todas as pontes localizadas no município de Barão de Cocais no estado de Minas Gerais.

Em nova campanha, no ano de 2022, foram realizadas as inspeções especiais da ponte

XIV CBPE 2023 XIV Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

Aplicação de Ferramentas de Agrupamento de Dados no Contexto de Gerenciamento de Pontes Ferroviárias no Brasil

João Francisco de Carvalho Neto[1], Flávio Vinícius Cruzeiro[2], Túlio Nogueira Bittencourt[3]
[1] IFMG / Departamento de Engenharia Civil / joao.carvalho@ifmg.edu.br
[2]CEFET-MG / Departamento de Computação / flaviocruzeiro@cefetmg.br
[3]USP / Departamento de Engenharia Civil / tbitten@gmail.com

Figura 114 – Trabalho apresentado no XIV Congresso Brasileiro de Pontes.

Figura 115 – Viaduto do Cabral.



Fonte: (Bittencourt et al., 2022b)

do Rio Doce, km 314+075 da EFVM Figura 118, e da ponte sobre o Rio Piracicaba, no km 014+392 da EFVM Figura 119, no municípios de GOvernador Valadares e João Monlevade, respectivamente. Nessas atividades foram realizadas todo o levantamento geométrico e tipológicos dos elementos estruturais e das anomalias das pontes,

No ano de 2023 foram realizadas duas inspeções em pontes da Estrada de Ferro Carajás pelo projeto *Cátedra Infraestrutura Ferroviária*. Por meio do projeto de pesquisa intitulado *Inspeção e Monitoramento de Obras de Arte Especiais por meio de Técnicas Remotas e Não Invasivas* foram produzidos relatórios técnicos sobre os estados de conservação e desempenho das pontes sobre o Rio Jacundá no km 694+446 (Figura 120) no município de Marabá-PA e Rio Cajuapara no km 510+815 (Figura 121) no município de Açailândia-MA.

As participações nesses trabalhos de campos foram essencias para o desenvolvimento deste trabalho, pois permitiram o contato com diferentes realidades das pontes ferroviárias

Figura 116 – Ponte da Represa do Peti.



Fonte: (Bittencourt et al., 2022a)

Figura 117 – Viaduto MG 436.



Fonte: (Bittencourt et al., 2022c)

e profissionais responsáveis pelo gerenciamento desses ativos. Houve, portanto, pleno envolvimento com o estado prático. As contribuições junto aos trabalhos de campo do GMEC-USP permitiram maior reflexão das estratégias adotadas na modelagem proposta. Além da sinergia estabelecida com a realidade prática, foi possível ampliar a percepção de novas técnicas

Figura 118 – Ponte sobre o Rio Doce.



Fonte: (Bittencourt et al., 2023a)

Figura 119 – Ponte sobre o Rio Piracicaba.



Fonte: (Bittencourt et al., 2023b)

de monitoramento por meio de recursos não-invasivos e outros que apontam para um futuro bastante promissor no que se refere ao monitoramento das pontes ferroviárias. Há pois, no cerne deste trabalho o conceito de se reproduzir a indissociável relação entre a engenharia

Figura 120 – Ponte sobre o Rio Jacundá



Fonte: (Bittencourt et al., 2024a)

Figura 121 – Ponte sobre o Rio Cajuapara



Fonte: (Bittencourt et al., 2024b)

e a modelagem matemática que possibilitou engendrar o conteúdo produzido. Os projetos acompanhados nesses trabalhos de campo possuíam naturezas bastante distintas quanto aos tipos de estruturas, ambientes de trabalho, ferrovias, regiões e técnicas de monitoramento,

o que sintetiza muito bem a realidade das pontes ferroviárias em toda sua diversidade de casos no território brasileiro. As figuras 115 a 121 apresentam as diferenças citadas de forma bastante clara. Convém refletir sobre esse ponto muito relevante do desenvolvimento de pesquisas na área de pontes, pela íntima coexistência da realidade de engenharia e a proposição preditiva que é, em muitos casos, baseada em inspirações estritamente intelectuais. Neste trabalho, buscou-se manter a experiência prévia sobre o tema - *a priori* - sempre sob o devido controle e reconhecimento de suas limitações. Permitindo assim novas discussões e reflexões a respeito do estado da arte dos trabalhos publicados sem perder o vínculo com o estado das coisas no mundo real,.

6 Considerações Finais

A hipótese básica deste trabalho é fundamentada na forte aderência à realidade das ferrovias brasileiras, nas respostas observadas em campo e no contato com o ambiente profissional de engenharia ferroviária. Contudo, não se distancia da motivação primária de contribuir de forma inovadora com a pesquisa acadêmica. Os resultados obtidos auxiliam no atendimento à necessidade de solução para o problema de engenharia ferroviária na realidade brasileira e ao objetivo central do estudo. Entende-se claramente, pela experiência e resultados gerados, que as ferramentas de agrupamento e de otimização para os processos de manutenção podem direcionar os gestores nas tomadas de decisão quanto às seleções de ativos. As formulações testadas passaram por implementações de instâncias que melhor representam os cenários do ambiente de engenharia. Destacando-se a usabilidade da clusterização dos dados de cadastro da NBR 9452 e das formulações de otimização desenvolvidas. Culminando em resultados de pleno interesse para se conhecer de forma mais adequada e precisa os subconjuntos de pontes selecionados por índice classificação e em relação à similaridade entre ativos.

A despeito das limitações relativas à qualidade dos bancos de dados disponibilizados, entende-se que o conteúdo desenvolvido pode ser amplificado para as situações reais por meio de adaptações específicas às realidades das concessionárias. De toda forma, a aplicação do conteúdo no contexto deste trabalho não teria como objetivo esvaziar todas as possibilidades de configurações do problema. Representa pois, uma iniciativa positiva na esperança de que a metodologia utilizada possa incentivar novas perspectivas para tratamento do problema central do trabalho. Elevando a fundamentação do envolvimento de questões adjacentes como custos, segurança e qualificação profissional. A partir disso, e de um cenário com dados com maior quantidade e integridade, acredita-se que os estudos embasados nessa hipótese dentro do contexto das formulações propostas neste trabalho deverão produzir resultados bastante satisfatórios e com maior acurária preditiva.

Por fim, há na motivação principal deste trabalho o interesse de poder contribuir com o estado da arte da área de gerenciamento de pontes ferroviárias. Potencializando novas discussões e abordagens que colaborem com o desenvolvimento do tema. Partiu-se, pois, de um cenário pouco explorado e com baixa disponibilidade de informações no cenário nacional, algo controverso ao se considerar a importância do objeto de estudo. No entanto, a despeito de se conhecer o desafio, foi escolhido o tema com o desejo de que os frutos deste trabalho possam, de alguma forma, extrapolar seu conteúdo e as fronteiras de suas limitações e potencialidades. Espera-se verdadeiramente que este trabalho contribua na edificação de um futuro próximo no qual as vidas relacionadas às pontes ferroviárias - sejam as de profissionais, comunidades lindeiras, passageiros, transeuntes, gestores ou inspetores - possam usufruir de maior nível de conforto e segurança.

6.1 Trabalhos Futuros

Dentre as atividades futuras relativas ao projeto propõe-se:

- Avanço no desenvolvimento das implementações de formulação de otimização, visando aprimoramento e adaptação à realidade individuais das ferrovias;
- Realização de simulações de *clustering* com maior acesso a campos de dados e com uso de novos algoritmos para comparações dos resultados;
- Aquisição de novos bancos de dados junto às concessionárias e com bases mais ordenados conforme a NBR 9425;
- Desenvolvimento de novas formulações de otimização com os resultados de agrupamentos para gerar os grupos de pontes selecionadas. Visando maior integração das respostas dessas duas ferramentas.

Referências

ABIFER. **Associação Brasileira da Indústria Ferroviária**. 2022. Disponível em: <https://abifer.org.br/dados-setoriais/estatisticas-de-producao/>https://abifer.org.br/dados-setoriais/estatisticas-de-producao/. Acesso em: 16 de maio de 2022. Citado na página 1.

AFSHIN, H.; MORCOUS, G. Developing deterioration models for nebraska bridges. **Journal of the Transportation Research Board**, n. 2313, p. 3–11, 2011. Citado na página 10.

AHMAD, A.; DEY, L. A k-mean clustering algorithm for mixed numeric and categorical data. **Data Knowledge Engineering**, v. 63, n. 2, p. 503–527, 2007. ISSN 0169-023X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169023X0700050X>https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169023X0700050X. Citado na página 53.

AKBARPOUR, N.; AKBARI, E.; MOTAMENI, H. External clustering validity index based on extended similarity measures. **Journal of Computational Science**, v. 72, p. 102116, 2023. ISSN 1877-7503. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187775032300176X>https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187775032300176X. Citado 2 vezes nas páginas 64 e 78.

Almeida, L. M. W. et al. Sobre a categorização dos signos na semiótica peirceana em atividades de modelagem matemática. In: **REVISTA ELECTRÓNICA DE INVESTIGACIÓN EN EDUCACIÓN EN CIENCIAS**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–10. Citado 4 vezes nas páginas viii, 31, 32 e 33.

ALMEIDA, W. et al. T´ecnicas de otimização aplicadas à escolha eficiente de grupos familiares para modalidade de cuidado coordenado. In: **LVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. [S.l.: s.n.], 2023. p. 1–12. Citado 3 vezes nas páginas 50, 79 e 81.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **The manual for bridge evaluation**. [S.l.], 2013. Citado 3 vezes nas páginas 24, 26 e 43.

ANTF. **Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários -Mapa Ferroviário**. 2022. Disponível em: <https://www.antf.org.br/mapa-ferroviario/>https://www.antf.org.br/mapa-ferroviario/. Acesso em: 17 de maio de 2022. Citado 3 vezes nas páginas viii, 1 e 2.

ARENALES, M. et al. **Pesquisa Operacional**. [S.l.]: Elsevier, 2011. Citado na página 48.

ASCE, A. S. of C. E. **Bridges - Infrastructure Report Card**. 2021. Disponível em: <https://infrastructurereportcard.org/wp-content/uploads/2020/12/Bridges-2021-.pdf>https://infrastructurereportcard.org/wp-content/uploads/2020/12/Bridges-2021.pdf. Acesso em: 20 de novembro de 2022. Citado na página 5.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16230**: Inspeç˜o de estruturas de concreto – qualificaç˜o e certificaç˜o de pessoal - requisitos. [S.l.], 2013. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 161.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9452**: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto - procedimento. [S.l.], 2023. 71 p. Citado 4 vezes nas páginas viii, xii, 27 e 160.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9452**: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto - procedimento. [S.l.], 2023. 71 p. Citado 9 vezes nas páginas viii, 3, 39, 40, 41, 67, 76, 77 e 112.

Ayub, M. **Investigation of March 15, 2018 Pedestrian Bridge Collapse at Florida International University, Miami, FL**. [S.l.], 2019. 115 p. Citado na página 3.

BAPTISTA, M. N.; CAMPOS, D. C. **Metodologia de Pesquisa em Ciências: análises quantitativa e qualitativa**. 2. ed. [S.l.]: LTC, 2016. Citado na página 66.

Barone, G.; Frangopol, D. M. Reliability, risk and lifetime distributions as performance indicators for life-cycle maintenance of deteriorating structures. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 123, p. 21–37, 2014a. Citado na página 17.

Barone, G.; Frangopol, D. M. Life-cycle maintenance of deteriorating structures by multi-objective optimization involving reliability, risk, availability, hazard and cost. **Structural Safety**, v. 48, p. 40–50, 2014b. Citado na página 18.

BECERRA-FERNANDEZ, I.; SABHERWAL, R. **Knowledge Management Systems and Processes**. [S.l.]: Taylor Francis, 2015. Citado na página 35.

BECK, A. T. **Confiabilidade e Segurança das Estruturas**. 1. ed. [S.l.]: Elsevier, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.

Ben Ncir, C.-E.; HAMZA, A.; BOUAGUEL, W. Parallel and scalable dunn index for the validation of big data clusters. **Parallel Computing**, v. 102, p. 102751, 2021. ISSN 0167-8191. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii-/S0167819121000119>https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167819121000119. Citado na página 64.

BITTENCOURT, T. et al. Digital transformation of bridges inspection, monitoring and maintenance processes. In: **Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 11–18. Citado na página 7.

Bittencourt, T. N. et al. **Relatório Técnico IOF-06 - Inspeção e Monitoramento da Ponte Ferroviária sobre o Rio Jacundá por meio de Técnicas Remotas e Não Invasivas**. [S.l.], 2024. 193 p. Citado na página 128.

Bittencourt, T. N. et al. **Relatório Técnico IOF-06- Inspeção e Monitoramento da Ponte Ferroviária sobre o Rio Cajuapara por meio de Técnicas Remotas e Não Invasivas**. [S.l.], 2024. 178 p. Citado na página 128.

Bittencourt, T. N. et al. **RELATÓRIO DE MONITORAMENTO DA PONTE DO RIO DOCE – EFVM**. [S.l.], 2023. 134 p. Citado na página 127.

Bittencourt, T. N. et al. **RELATÓRIO DE MONITORAMENTO DA PONTE DO RIO PIRACICABA – EFVM**. [S.l.], 2023. 117 p. Citado na página 127.

Bittencourt, T. N. et al. **RELATÓRIO DE MONITORAMENTO DA PONTE DA REPRESA DO PETI VIADUTO–EFVM**. [S.l.], 2022. 128 p. Citado na página 126.

Bittencourt, T. N. et al. **RELATÓRIO DE MONITORAMENTO DO VIADUTO DO CABRAL–EFVM**. [S.l.], 2022. 134 p. Citado na página 125.

Bittencourt, T. N. et al. **RELATÓRIO DE MONITORAMENTO DO VIADUTO MG-436–EFVM**. [S.l.], 2022. 155 p. Citado na página 126.

BOLDRINI, J. et al. **Álgebra Linear**. [S.l.]: Harbra, 1986. Citado na página 12.

BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. R. d. L. **Patologia de Estruturas**. 1. ed. [S.l.]: Oficina de Textos, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

BONATTE, M. et al. Aplicação de redes neurais em modelos preditivos de deterioração de pontes rodoviárias. In: **Anais da VI Jornada Portuguesa de Pontes e Estruturas**. [s.n.], 2022. p. 1607–1622. Disponível em: <http://jpee2022.lnec.pt/index-.html>http://jpee2022.lnec.pt/index.html. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 123.

BRASIL, A. **Ministério autoriza construção de 9 ferrovias pela iniciativa privada**. 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia-/noticia/2021-12/ministerio-autoriza-construcao-de-9-ferrovias-pela-iniciativa-privada>https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-12/ministerio-autoriza-construcao-de-9-ferrovias-pela-iniciativa-privada. Acesso em: 16 de maio de 2022. Citado 2 vezes nas páginas viii e 7.

BROCK, G. et al. clvalid: An r package for cluster validation. **Journal of Statistical Software**, v. 25, n. 4, p. 1–22, 2008. Disponível em: <https://www.jstatsoft.org/index.php/jss/article-/view/v025i04>https://www.jstatsoft.org/index.php/jss/article/view/v025i04. Citado na página 64.

BRUCE, P.; BRUCE, A. **Estatística Aplicada para Cientistas de Dados: 50 conceitos essenciais**. 1. ed. [S.l.]: Alta Books, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 62 e 85.

CADY, F. **The Data Science Handbook**. [S.l.: s.n.], 2017. 1-396 p. ISBN 9781119092940. Citado na página 58.

Carneiro, A. L.; Portela, E. de L.; Bittencourt, T. N. Development of brazilian highway live load model for unlimited fatigue life. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 4, p. 1–20, 2020. Citado na página 10.

Carvalho Neto, J. F.; Cruzeiro, F. V. M.; Bittencourt, T. N. Aplicação de ferramentas de agrupamento de dados no contexto de gerenciamento de pontes ferroviárias no brasil. In: **Anais do XIV Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas**. [s.n.], 2023. Disponível em: <http://abpe.org.br/trabalhos2023/trabalhos/ID_133-.pdf>http://abpe.org.br/trabalhos2023/trabalhos/ID_133.pdf. Citado 2 vezes nas páginas 122 e 123.

Carvalho Neto, J. F.; Cruzeiro, F. V. M.; Bittencourt, T. N. Panorama da obtenção de dados de inspeção para modelos matemáticos preditivos de deterioração de pontes no brasil. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 3, p. 1–22, 2024. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 86.

CBPE, A. B. de Pontes e E. **XIV Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas**. 2023. Disponível em: <http://cbpe2023.com.br/site/>http://cbpe2023.com.br/site/. Acesso em: 25 de outubro de 2023. Citado na página 47.

Chen, H.; Ni, Y. **Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures**. [S.l.]: John Wiley Sons, 2018. Citado na página 19.

COSTA, N. C. A. d. **O Conhecimento Científico**. [S.l.]: Discurso Editorial, 1997. Citado na página 34.

Couto, D. et al. Estruturas de concreto. contribuição à análise da segurança em estruturas existentes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 3, p. 378–389, 2015. Citado 2 vezes nas páginas viii e 15.

CUI, H. et al. Determine the number of unknown targets in the open world from the perspective of bidirectional analysis using gap statistic and isolation forest. **Information Sciences**, v. 623, p. 832–856, 2023. ISSN 0020-0255. Citado 3 vezes nas páginas 58, 59 e 60.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Inspeções de Pontes**: Manual de inspeção de pontes rodoviárias. instituto de pesquisas rodoviárias. [S.l.], 2004. 253 p. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 29.

DINH, D.-T.; HUYNH, V.-N.; SRIBOONCHITTA, S. Clustering mixed numerical and categorical data with missing values. **Information Sciences**, v. 571, p. 418–442, 2021. ISSN 0020-0255. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii-/S0020025521004114>https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025521004114. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 53.

do Carmo Jacinto, L. A. **AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE PONTES EXISTENTES - Abordagem Probabilística Bayesiana**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 11 2011. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.

dos Santos, S. **Um Estudo Sobre a Participação do Modal Ferroviário no Transporte de Cargas no Brasil**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 12 2005. Citado na página 1.

DROMEY, L. et al. An analysis of a data set of 1,400 bridge inspections in county cork. In: **Civil Engineering Research in Ireland**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 85–90. Citado na página 38.

DROMEY, L. et al. 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. Citado 3 vezes nas páginas 13, 38 e 66.

Ellis, R. Bridge management – past, present, and future. In: **Bridge Maintenance, Safety, Management, Digitalization and Sustainability**. [S.l.: s.n.], 2024. p. 40–49. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 44.

FANG, Y.; SUN, L. Developing a semi-markov process model for bridge deterioration prediction in shanghai. **Sustainability**, v. 11, n. 19, 2019. ISSN 2071-1050. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/19/5524>https://www.mdpi.com/2071-1050/11/19/5524. Citado na página 10.

FARRAR, C. R.; WORDEN, K. An introduction to structural health monitoring. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, n. 365, p. 303–315, 2007. Citado na página 19.

Frangopol, D. M.; Sabatino, S.; Dong, Y. Bridge life-cycle performance and cost: Analysis, prediction, optimization and decision making. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 13, n. 10, p. 1239–1257, 2017. Citado 4 vezes nas páginas viii, 11, 18 e 46.

Futai, M. M. et al. Challenges in the application of digital transformation to inspection and maintenance of bridges. **STRUCTURE AND INFRASTRUCTURE ENGINEERING**, p. 1–21, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 30.

GAREY, M.; JOHNSON, D. **Computers and Intratability**. [S.l.]: Freeman, 1979. Citado na página 49.

GHODOOSI, F. et al. Maintenance cost optimization for bridge structures using system reliability analysis and genetic algorithms. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 144, n. 2, p. 1–10, 2018. Citado na página 18.

Ghosn, M.; Frangopol, D. M. Performance indicators for structural systems and infrastructure networks. **Journal of Structural Engineering (United States)**, v. 142, n. 9, p. 1–18, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

GOLDBARG, M. C. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. [S.l.]: Elsevier, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 49.

Hackett, B. **The Strategic Management of Intellectual Capital and Organizational Knowledge**. [S.l.]: Oxford University Press, 2002. 725-738 p. Citado na página 35.

Han, X.; Yang, D. Y.; Frangopol, D. M. Risk-based life-cycle optimization of deteriorating steel bridges: Investigation on the use of novel corrosion resistant steel. **Advances in Structural Engineering**, v. 24, n. 8, p. 1668–1686, 2020. Citado na página 18.

HASSAN, B. A. et al. From a-to-z review of clustering validation indices. **Neurocomputing**, v. 601, p. 128198, 2024. ISSN 0925-2312. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii-/S092523122400969X>https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092523122400969X. Citado na página 64.

Hongyu, K.; Sandanielo, V. L. M.; Oliveira Junior, G. J. de. Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **ES Engineering and Science**, v. 1, n. 5, p. 83–90, 2016. Citado na página 61.

HUMAIRA, H.; RASYIDAH, R. Determining the appropiate cluster number using elbow method for k-means algorithm. In: . [S.l.]: EAI, 2020. Citado na página 58.

IKOTUN, A. M. et al. K-means clustering algorithms: A comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data. **Information Sciences**, v. 622, p. 178–210, 2023. ISSN 0020-0255. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii-/S0020025522014633>https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025522014633. Citado na página 52.

Ilbeigi, M.; Pawar, B. A probabilistic model for optimal bridge inspection interval. **Infraestructures**, v. 47, n. 5, p. 2–11, 2020. Citado na página 13.

JAAFARU, H.; AGBELIE, B. Bridge maintenance planning framework using machine learning, multi-criteria decision analysis and evolutionary optimization models. **Automation in Construction**, v. 143, p. 104585, 2022. ISSN 0926-5805. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii-/S0926580522004551>https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580522004551. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 79.

JAIN, A. K. Data clustering: 50 years beyond k-means. **Pattern Recognition Letters**, v. 31, n. 8, p. 651–666, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 52, 53, 64 e 78.

JAIN, A. K.; DUBES, R. C. **Algorithms for clustering data**. USA: Prentice-Hall, Inc., 1988. ISBN 013022278X. Citado na página 64.

JOHNSON, R.; WICHERN, D. **Applied multivariate statistical analysis**. 5. ed. Prentice Hall, 2002. Disponível em: <https://alimoradi.iut.ac.ir/sites/alimoradi.iut.ac.ir/files//file_basepage/richard_arnold_johnson_dean_w._wichern_applied_bookzz.org_-.pdf>https://alimoradi.iut.ac.ir/sites/alimoradi.iut.ac.ir/files//file_basepage/richard_arnold_johnson_c Citado 3 vezes nas páginas 52, 62 e 63.

JUNQUEIRA, J. et al. Procedimento para avaliação teórica e experimental de pontes ferroviárias. **Revista da Estrutura de Aço REA**, v. 9, n. 1, p. 81–100, 2019. ISSN 2238-9377. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 54.

Kassambara, A. **Practical Guide To Cluster Analysis in R - Unsupervised Machine Learning**. [S.l.]: STHDA, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 53, 64 e 67.

KAUFMAN, L.; ROUSSEEUW, P. **Finding Groups in Data: An Introduction To Cluster Analysis**. [S.l.: s.n.], 1990. ISBN 0-471-87876-6. Citado na página 59.

Kim, S.; Ge, B.; Frangopol, D. M. Effective optimum maintenance planning with updating based on inspection information for fatigue-sensitive structures. **Probabilistic Engineering Mechanics**, v. 58, p. 1–12, 2019. Citado na página 18.

KOLMAN, B. **Introductory Linear Algebra with Applications**. [S.l.]: Prentice-Hall, 1996. Citado na página 12.

LEE, B. J. et al. Optimal replacement strategy for stochastic deteriorating system with random wear limit under periodic inspections. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, n. 71, p. 219–231, 2014. Citado na página 10.

LIMMER, C. V. **Planejamento, Orçamentação e Controle d Obras**. 1. ed. [S.l.]: LTC, 2015. Citado na página 47.

LIN, W.; Teruhiko, Y. **Bridge Engineering - Classifications, Design Loading and Analisys Methods**. [S.l.]: Elsevier, 2017. Citado na página 3.

LLOYDE, S. P. Least squares quantization in pcm. **IEEE transactions on information theory**, v. 28, n. 2, p. 129–137, 1982. Disponível em: <https://sites.cs.ucsb.edu/˜veronikaMAE-/kmeans_LLoyd_Least_Squares_Quantization_in_PCM.pdf>https://sites.cs.ucsb.edu/ veronikaMAE/kmeans_LLoyd_Least_Squares_Quantization_in_PCM.pdf. Citado na página 53.

MARCONDES, D. **Filosofia Analítica**. [S.l.]: Jorge Zahar Editor, 2004. Citado na página 31.

Matos de Santana, P. et al. Modelo de deterioraÇÃo de estruturas baseado em cadeias de markov aplicado ao banco de dados do dnit. **Revista ENINFRA**, v. 1, n. 2, p. 90–101, set. 2023. Disponível em: <https://revistaeninfra.dnit.gov.br/index.php/inicio/article/view-/45>https://revistaeninfra.dnit.gov.br/index.php/inicio/article/view/45. Citado na página 10.

MATTE, M. K.; NICOLETTI, N. C. Revisão de estratégias para a aceleração do algoritmo k-means. In: **Anais do Workshop de Computação da FACCAMP**. [s.n.], 2019. p. 1–6. Disponível em: <https:/-/www.cc.faccamp.br/anaisdowcf/edicoes_anteriores/wcf2019/01/paper_01-.pdf>https://www.cc.faccamp.br/anaisdowcf/edicoes_anteriores/wcf2019/01/paper_01.pdf. Citado na página 53.

MEC. **Ministério da Educação - Catálogo Nacional de Cursos Técnicos**. 2020. Disponível em: <http://cnct.mec.gov.br/cursos-/curso?id=105>http://cnct.mec.gov.br/cursos/curso?id=105. Acesso em: 21 de maio de 2022. Citado na página 29.

MEC. **Ministério da Educação - Catálogo Nacional de Cursos Técnicos**. 2020. Disponível em: <http://cnct.mec.gov.br/cursos-/curso?id=106>http://cnct.mec.gov.br/cursos/curso?id=106. Acesso em: 21 de maio de 2022. Citado na página 29.

Mendes, P. de T. C. **Contribuições para um modelo de gestão de pontes de concreto aplicado à rede de rodovias brasileiras**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2009. Citado 2 vezes nas páginas viii e 43.

MERLEAU-PONTY, M. **Fenomenologia da Percepção**. [S.l.]: Martins Fontes, 1999. Citado na página 31.

Metz, J. **Interpretação de clusters gerados por algoritmos de clustering hierárquico**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 6 2006. Citado na página 57.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. [S.l.]: UFMG, 2005. Citado 5 vezes nas páginas 52, 56, 61, 62 e 63.

OEHME, P. Schäden an stahltragwerken – eine analyse (damage analysis of steelstructures). In: **IABSE Proceedings**. [S.l.: s.n.], 1989. p. 139/89. Citado na página 54.

OLIVA, A. **Filosofia da Ciência**. [S.l.]: Jorge Zahar Editor, 2010. v. 3ª ção. Citado na página 32.

Oliveira, C. B.; Greco, M.; Bittencourt, T. N. Análise do inventário das pontes federais do brasil. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 1, p. 1–13, 2019. Citado na página 10.

Oliveira, C. B. de L. **DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DE TAXAS DE DETERIORAÇÃO DE PONTES RODOVIÁRIAS DO BRASIL**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2 2019. Citado 3 vezes nas páginas viii, 13 e 44.

OLIVEIRA, C. B. L. E. et al. Desenvolvimento de metodologia para a proposta de modelos de deterioração de pontes rodoviárias brasileiras. In: **Anais do 59° ção** [S.l.: s.n.], 2017. Citado na página 10.

Paulino, C. D. et al. **Estatística Bayesiana**. [S.l.]: Fundação Calouste Gulbenkian, 2018. Citado na página 14.

PEREIRA, V. d. B. **Transportes - História, Crises e Caminhos**. [S.l.]: Ed. Civilização Brasileira, 2014. v. 1ª ção. Citado na página 1.

Pinheiro, G. M. **Variabilidades dos Defeitos do Produto e Desempenho do Inspecionista**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 12 2007. Citado na página 30.

PIPINATO, A. **Innovative Bridge Design Handbook - Construction, Rehabilitation and Maintenance**. [S.l.]: Elsevier, 2016. Citado na página 3.

Poças, R. de F. G. **Gestão do ciclo de vida de pontes**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Minho, Minho, Portugal, 09 2009. Citado 3 vezes nas páginas viii, 55 e 56.

Prisco, M. di et al. Annone overpass: assessment of reinforcement damage effects on collapse. In: **9th INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE UNDER SEVERE CONDITIONS-ENVIRONMENT LOADING**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–16. Citado na página 3.

Ribeiro, R. Segmentação de mercado e saber-fazer: um estudo de caso no setor de construção. In: **XX Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. [S.l.: s.n.], 2000. p. 1–8. Citado na página 30.

Ribeiro, R. The language barrier as an aid to communication. **Social Studies of Science**, v. 37, n. 4, p. 561–584, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 33.

ROSA, R. d. A.; RIBEIRO, R. C. H. **Estradas de ferro : projeto, especificação construção**. [S.l.]: EDUFES, 2016. Citado na página 3.

Rossato, M. D. et al. Verificação de segurança à fadiga de pontes em concreto armado conforme abnt nbr 6118, 2014. **ALCONPAT**, v. 11, n. 2, p. 109–123, 2021. Citado na página 10.

ROUSSEEUW, P. J. Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 20, p. 53–65, 1987. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii-/0377042787901257>https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377042787901257. Citado na página 59.

ROZEMBERG, M. **Inspeções de Pontes e Viadutos - Situação das Pontes e Viadutos da Cidade de São Paulo**. 2019. Disponível em: <https://ibape-nacional.com.br/biblioteca/wp-content/uploads/2019/04/Atual-Status-de-Fiscaliza\c c\˜o-e-Estado-Geral-dos-Viadutos-de-S\˜ao-Paulo-Marcelo-Rozember>https://ibape-nacional.com.br/biblioteca/wp-content/uploads/2019/04/Atual-Status-de-Fiscalizaçõ-e-Estado-Geral-dos-Viadutos-de-São-Paulo-Marcelo-Rozember. Acesso em: 16 de abril de 2021. Citado na página 5.

RYALL, M. J. **Bridge management**. 2. ed. [S.l.]: Elsevier, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 44.

SANTAELLA, L.; Nöth, W. **Introdução à Semiótica: passo a passo para compreender os signos e a significação**. [S.l.]: Paulus, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 33.

SANTOS, A. et al. Avaliação da segurança de pontes existentes por meio da análise de confiabilidade - estudos de caso. In: **Anais da VI Jornada Portuguesa de Pontes e Estruturas**. [s.n.], 2022. p. 1623–1638. Disponível em: <http://jpee2022.lnec.pt/index-.html>http://jpee2022.lnec.pt/index.html. Citado na página 123.

SANTOS, A. F. et al. Improvement of the inspection interval of highway bridges through predictive models of deterioration. **Buildings**, n. 1, p. 1–22, 2022. Citado 6 vezes nas páginas 3, 10, 11, 12, 13 e 66.

SAPUTRA, D. M.; SAPUTRA, D.; OSWARI, L. D. Effect of distance metrics in determining k-value in k-means clustering using elbow and silhouette method. In: **Proceedings of the Sriwijaya International Conference on Information Technology and Its Applications (SICONIAN 2019)**. Atlantis Press, 2020. p. 341–346. ISBN 978-94-6252-963-2. ISSN 1951-6851. Disponível em: <https://doi.org/10.2991/aisr.k.200424-.051>https://doi.org/10.2991/aisr.k.200424.051. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 58.

Saydam, D.; Frangopol, D. M. Time-dependent performance indicators of damaged bridge superstructures. **Engineering Structures**, v. 33, n. 9, p. 2458–2471, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.

SHLENS, J. **A Tutorial on Principal Component Analysis**. 2014. Citado na página 61.

SILVA, A. R. da. **Métodos de Análise Multivariada em R**. 1. ed. [S.l.]: FEALQ, 2016. Citado na página 62.

SILVA, P. C. S. et al. Ferramentas de gerenciamento para controle das obras de arte especiais do dnit: Sgo e monalisa. In: **Anais do XXII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas**. [s.n.], 2021. p. 1–9. Disponível em: <http://www.abpe.org.br/trabalhos2021-/ID_028.pdf>http://www.abpe.org.br/trabalhos2021/ID_028.pdf. Citado na página 3.

SOUZA, G. et al. **Reliability Analysis and Asset Management of Engineering Systems**. [S.l.]: Elsevier, 2021. Citado 2 vezes nas páginas viii e 42.

STEINHAUS, H. Sur la division des corps matériels en parties. **Bulletin de L'académie polonaise des sciences**, v. 4, n. 12, 1956. Disponível em: <http://www.laurent-duval.eu/Documents/Steinhaus_H_1956_j-bull-acad-polon-sci_division_cmp-k-means-.pdf>http://www.laurent-duval.eu/Documents/Steinhaus_H_1956_j-bull-acad-polon-sci_division_cmp-k-means.pdf. Citado na página 53.

STRAVATE, S. L. E.; CARVALHO, L. S. Estudo da espessura de lajes para pontes em grelha com pré-laje sem transversinas intermediárias sob a Ótica econômica no consumo aço/concreto. In: **Anais do XIV Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas**. [s.n.], 2023. p. 1–10. Disponível em: <http://abpe.org.br/trabalhos2023/trabalhos/ID_150-.pdf>http://abpe.org.br/trabalhos2023/trabalhos/ID_150.pdf. Citado na página 47.

TAKEUCHI, H.; NONAKA, I. **Criação do conhecimento na empresa: como as empresas japonesas geram a dinâmica da inovação.** [S.l.]: Campus, 1997. Citado 3 vezes nas páginas viii, 36 e 37.

TAKEUCHI, H.; NONAKA, I. **Gestão do Conhecimento**. [S.l.]: Atmed, 2004. Citado na página 36.

TIBSHIRANI, R.; WALTHER, G.; HASTIE, T. Estimating the Number of Clusters in a Data Set Via the Gap Statistic. **Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology**, v. 63, n. 2, p. 411–423, 01 2002. ISSN 1369-7412. Disponível em: <https:/-/doi.org/10.1111/1467-9868.00293>https://doi.org/10.1111/1467-9868.00293. Citado na página 60.

UMARGONO, E.; SUSENO, J. E.; GUNAWAN, S. V. K-means clustering optimization using the elbow method and early centroid determination based on mean and median formula. In: **Proceedings of the 2nd International Seminar on Science and Technology (ISSTEC 2019)**. Atlantis Press, 2020. p. 121–129. ISBN 978-94-6239-168-0. ISSN 2352-5398. Disponível em: <https://doi.org/10.2991/assehr.k.201010-.019>https://doi.org/10.2991/assehr.k.201010.019. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 58.

Verly, R. C. **AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS DE INSPEÇÃO COMO INSTRUMENTO DE PRIORIZAÇÃO DE INTERVENÇÕES EM OBRAS DE ARTE ESPECIAIS**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, 6 2015. Citado na página 27.

VIANA, H. R. G. **Planejamento e Controle da Manutenção**. 1. ed. [S.l.]: QualityMark, 2002. Citado na página 2.

VITóRIO, J. A. P. **Pontes Rodoviárias. Fundamentos, conservação e Gestão**. 1. ed. [S.l.]: Conselho Regional de Engenharia Arquitetura e Agronomia de Pernambuco – CREA-PE, 2002. Citado 2 vezes nas páginas viii e 38.

Xie, H. B.; Wu, W. J.; Wang, Y. F. Life-time reliability based optimization of bridge maintenance strategy considering lca and lcc. **Journal of Cleaner Production**, v. 176, p. 36–45, 2018. Citado na página 47.

XIE, S.; LAWNICZAK, A. T.; GAN, C. Optimal number of clusters in explainable data analysis of agent-based simulation experiments. **Journal of Computational Science**, v. 62, p. 101685, 2022. ISSN 1877-7503. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii-/S1877750322000928>https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877750322000928. Citado na página 60.

Yang, D. Y.; Frangopol, D. M.; Teng, J. G. Probabilistic life-cycle optimization of durability-enhancing maintenance actions: Application to frp strengthening planning. **Engineering Structures**, v. 188, p. 340–349, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 14, 17 e 66.

ZAKARIA, M.; KARAASLAN, E.; CATBAS, F. N. Advanced bridge visual inspection using real-time machine learning in edge devices. **Advances in Bridge Engineering**, v. 3, n. 27, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s43251-022-00073-y>https://doi.org/10.1186/s43251-022-00073-y. Citado na página 25.

Apêndices

APÊNDICE A – Lista de Danos

Figura 122 – Lista de danos em elementos de concreto. Fonte: autor

Elementos de Concreto	
Lista de Danos	
1	Fissuras de retração ou por expansão (RAA e Sulfatos)
2	Fissura em junta de concretagem
3	Fissuras
4	Ruptura
5	Esmagamento por flexão
6	Esmagamento em apoio
7	Embutimento
8	Segregação
9	Disgregação
10	Desagregação
11	Armadura exposta
12	Armadura de protensão exposta
13	Armadura de protensão rompida
14	Ancoragem de protensão exposta
15	Perda de protensão
16	Deslocamento excessivo
17	Desaprumo
18	Desalinhamento
19	Desnivelamento
20	Recalque
21	Erosão
22	Eflorescência
23	Eflorescência em fissura
24	Infiltração
25	Drenagem danificada ou com mal funcionamento
26	Acúmulo de sujeira
27	Acúmulo de água
28	Limo, Lodo, Vegetação ou Bolor
29	Manchas
30	Abrasão ou danos por choques mecânicos
31	Porosidade (permeabilidade)

Figura 123 – Lista de danos em elementos de aço. Fonte: autor

Estrutura de Aço	
Lista de Danos	
1	Fratura em furo de ligação
2	Fratura em solda
3	Fratura ou Fissura
4	Ruptura
5	Corrosão uniforme
6	Corrosão por placas, alveolar, pites ou esfoliação
7	Conector quebrado ou ausente
8	Conector deformado
9	Conector laqueamento
10	Conector com corrosão
11	Conector solto ou sem aperto
12	Solda com porosidade
13	Solda com mordeduras
14	Solda com falta de penetração
15	Danos por choque mecânico
16	Pintura com defeito
17	Pintura com espessura insuficiente
18	Drenagem danificada ou com mal funcionamento
19	Acumulo de sujeira
20	Acúmulo de água
21	Limo, Lodo, Vegetação ou Bolor
22	Abrasão (desgaste mecânico)
23	Perda de protensão
24	Corrosão em elemento protendido

Figura 124 – Lista de danos em elementos de alvenaria de pedra. Fonte: autor

Alvenaria de Pedra	
Lista de Danos	
1	Fratura na argamassa
2	Fratura no bloco
3	Desprendimento do bloco
4	Ausencia do bloco
5	Desaprumo
6	Desalinhamento
7	Desnivelamento
8	Recalque
9	Erosão
10	Eflorescência
11	Infiltração
12	Drenagem danificada
13	Drenagem com mal funcionamento
14	Acúmulo de sujeira
15	Acúmulo de água
16	Limo, Lodo ou vegetação
17	Manchas
18	Abrasão (desgaste mecânico)
19	Danos por choques mecânicos
20	Erosão no solo
21	Esmagamento em apoio

Figura 125 – Lista de danos em aparelhos de apoio metálicos. Fonte: autor

Aparelho de Apoio Metálico	
Lista de Danos	
1	Fratura
2	Ruptura
3	Solda com porosidade, mordedura ou falta de penetração
4	Corrosão uniforme
5	Deformação Vertical, Rotação ou Deficiência de Apoio
6	Deslocamento excessivo
7	Perda de contato
8	Bloqueado ou Travado
9	Acúmulo de sujeira
10	Acúmulo de água
11	Detritos, Limo, Lodo, Vegetação ou Bolor
12	Ancoragem solta, danificada ou inexistente
13	Pintura com defeito
14	Abrasão (desgaste mecânico)

Figura 126 – Lista de danos em aparelhos de apoio de neoprene. Fonte: autor

Aparelho de Apoio de Neoprene	
Lista de Danos	
1	Deformação Excessivo
2	Deslocamento Excessivo
3	Fissuras por ressecamento
4	Fretagem Oxidada
5	Fretagem Exposta
6	Cortes no cobrimento
7	Descolamento do cobrimento
8	Deficiência no Apoio (Mancando)
9	Perda de contato
10	Bloqueado ou Travado
11	Acúmulo de sujeira
12	Acúmulo de água
13	Detritos, Limo, Lodo, Vegetação ou Bolor

Figura 127 – Lista de danos em aparelhos de apoio de elastoméricos. Fonte: autor

Aparelho de Apoio Metálicos Elastoméricos	
Chapa e Corpo	
Lista de Danos	
1	Fratura
2	Ruptura
3	Solda com porosidade, mordedura ou falta de penetração
4	Corrosão uniforme
5	Corrosão por placas, alveolar, pites ou esfoliação
6	Ancoragem solta, danificada ou inexistente
7	Acúmulo de sujeira
8	Acúmulo de água
9	Detritos, Limo, Lodo, Vegetação ou Bolor
10	Deformação Excessiva
11	Deslocamento Excessivo
12	Rotação Excessiva
13	Deficiência no Apoio (Mancando)
14	Perda de contato
15	Bloqueado ou Travado

Figura 128 – Lista de danos em aparelhos de apoio de chapa. Fonte: autor

Chapa de Apoio	
Lista de Danos	
1	Fratura
2	Ruptura
3	Solda com porosidade, mordedura ou falta de penetração
4	Corrosão uniforme
5	Corrosão por placas, alveolar, pites ou esfoliação
6	Ancoragem solta, danificada ou inexistente
7	Acúmulo de sujeira
8	Acúmulo de água
9	Detritos, Limo, Lodo, Vegetação ou Bolor

APÊNDICE B – Quadro Comparativo de Artigos

Figura 129 – Compilação de artigos relacionados ao tema. Fonte: autor

Autor	Ano	Pontes	Modelagem	Agrupamento de dados	Tratativa de Custos de manutenção e ciclo de vida	País/base de dados
Gervásio; Simões	2013	Rodoviária	Análise Probabilística	-	LCC (Life Cycle Cost)	Ponte mista - Portugal
Walbridge *et al.*	2013	Rodoviária	Markov	-	Custos manutenções rotineiras e corretivas	Estudo de caso de ponte na Suíça
Zhu; Liu	2013	Rodoviária	Otimização Multiobjetivo	-	LCMC (Life Cycle Maintenance Cost)	Ponte de concreto - China
Barone; Frangopol	2014	Rodoviária	Multiobjetivo, GA	-	Índice $\beta_{min}(t)$ e custos por componentes da estrutura	Estudo de caso ponte Colorado-USA
Almeida *et al.*	2015	Rodoviária	Otimização Multiobjetivo, GA	-	LCC (Life Cycle Cost)	Pontes de concreto - Portugal
Soliman *et al.*	2015	Rodoviária	Monte Carlo	-	LCC (Life Cycle Cost)	Simulação de ponte Pensilvânia - USA
Saad *et al.*	2016	-	Análise probabilística de elemento	-	LCC (Life Cycle Costing)	Reforço de ponte com tabuleiro de concreto
Xie *et al.*	2018	Rodoviária	Otimização Multiobjetivo	-	LCA (Life Cycle Assesment) LCC (Life Cycle Cost)	Ponte de concreto - China
Ghodoosi *et al.*	2018	Rodoviária	Algoritmos Genéticos	-	Modelo de deterioração e índice β(t)	Estudo de caso ponte de concreto - Canadá
Oliveira *et al.*	2019	Rodoviárias	Markov	-	-	Brasil/DNIT
Junqueira *et al.*	2019	**Ferroviárias**	BMS	-	-	Brasil/MRS Logística
Ilbeigi *et al.*	2019	Rodoviárias	Markov	-	-	National Bridge Inventory (NBI) - USA
Yu e Sun	2019	Rodoviárias	Semi- Markov	-	Modelo de degradação do índice de condição	Shangai - China
Liu *et al.*	2020	-	Modelo de degradação de elementos	-	LCC (Life Cycle Cost)	Simulação
Aslani; Dehestani	2020	-	Modelo estocástico de deterioração e de falha em ELU	-	LCC (Life Cycle Cost) e Estado limite de trabalhabilidade	Simulação
Krishnan *et al.*	2021	Ponte de Cais (Finger Jetty)	-	-	LCC (Life Cycle Cost)	Índia
Zhu; Wang	2021	Rodoviárias	(RNN) e (CNN)	k-nearest neighbors	-	National Bridge Inventory (NBI) - USA
Santos *et al.*	2022	Rodoviárias	Markov – Redes Neurais	-	-	Brasil/DNIT

APÊNDICE C – Algoritmos

Algoritmo 3: Algoritmo K-Means - Apêndice

Input: $X = \{x_1, x_2, x_3..., x_N\} \in \mathbb{R}^D$ (N instâncias e D dimensões do banco de dados);
Output: $C = \{c_1, c_2, c_3..., c_K\} \in \mathbb{R}^D$ (K clusters);
while *Critério de parada não é atendido* **do**
    for $(i = 1; i \leq N; i = i + 1)$ **do**
        Associar x_d ao cluster mais próximo;
        $m_{[i]} = \arg\min_{k \in \{1...K\}} \|x_i + c_k\|^2$;
    end
    for $(k = 1; k \leq K; k = k + 1)$ **do**
        Clustes S_k contém o conjunto de pontos x_i que são próximos ao centroide c_k;
        $S_k = \{x_i | m[i] = k$;
        Calcular o novo centro c_k como a média dos pontos que pertencem a S_k;
        $c_k = \frac{1}{|S_k|} \sum_{x_i \in S_k} X_d$;
    end
end

C.1 Exemplo de Instância da Formulação I

```
        using JuMP
using CPLEX model = Model(CPLEX.Optimizer)
vetor de custos para pontes P1
a = [30;20;10;5;23;20;20;10;5;8;30;7;5;23;14;15;10;5;30;12]
n1 = length(a)
vetor de custos para pontes P2
c = [11;20;13;15;23;23;20;10;5;8;20;18;6;15;28;20;12;8;5;33;20;20;6;5;28;20;12;8;5;23;23;20;20;10
n2 = length(c)
vetor de custos para pontes P3
d = [11;20;13;15;23;23;20;10;5;8;20;18;6;15;28;20;12;8;5;33;20;20;6;5;28;20;12;8;5;23;13;15;23;23
n3 = length(d)
A = vcat(a,c,d)
N = length(A)
b = 900
P1 = n1
P2 = 0.5*n2
P3 = n3/3
C = ones(N)
Modelo matemático
@variable(model, 0 <= x[1:n1] <= 1,Bin )
@variable(model, 0 <= y[1:n2] <= 1,Bin )
@variable(model, 0 <= k[1:n3] <= 1,Bin )
@variable(model, 0 <= x[1:n]<= 1)
@objective(model, Max, sum(x[j] for j in 1:n1) + sum(y[j] for j in 1:n2) + sum(k[j] for j in
1:n3))
@constraint(model, sum(a[j]*x[j] for j in 1:n1) + sum(c[j]*y[j] for j in 1:n2) + sum(d[j]*k[j]
for j in 1:n3) <= b )
@constraint(model, sum(x[j] for j in 1:n1)>=P1)
@constraint(model, sum(y[j] for j in 1:n2)>=P2)
@constraint(model, sum(k[j] for j in 1:n3)>=P3)
Resolução do modelo
start = time()
JuMP.optimize!(model)
stop = time()-start
Impressão dos resultados na saída padrão
dados = open("dados.txt","w")
print(model)
```

println("Objective value: ", JuMP.objective$_value(model))
$for i = 1 : n1$
$println("x[\$i] = ", JuMP.value(x[i]))$
$write(dados, JuMP.value(x[i]))$
end
$for i = 1 : n2$
$println("y[\$i] = ", JuMP.value(y[i]))$
$write(dados, JuMP.value(y[i]))$
end
$for i = 1 : n3$
$println("k[\$i] = ", JuMP.value(k[i]))$
$write(dados, JuMP.value(k[i]))$
end
$close(dados)$
$print(solution_summary(model))$
$println("time", stop)$

APÊNDICE D – Validação de *Clusters*

D.1 Análise para dados tratados do banco de dados I

D.1.1 Resultados com tratamentos de dados

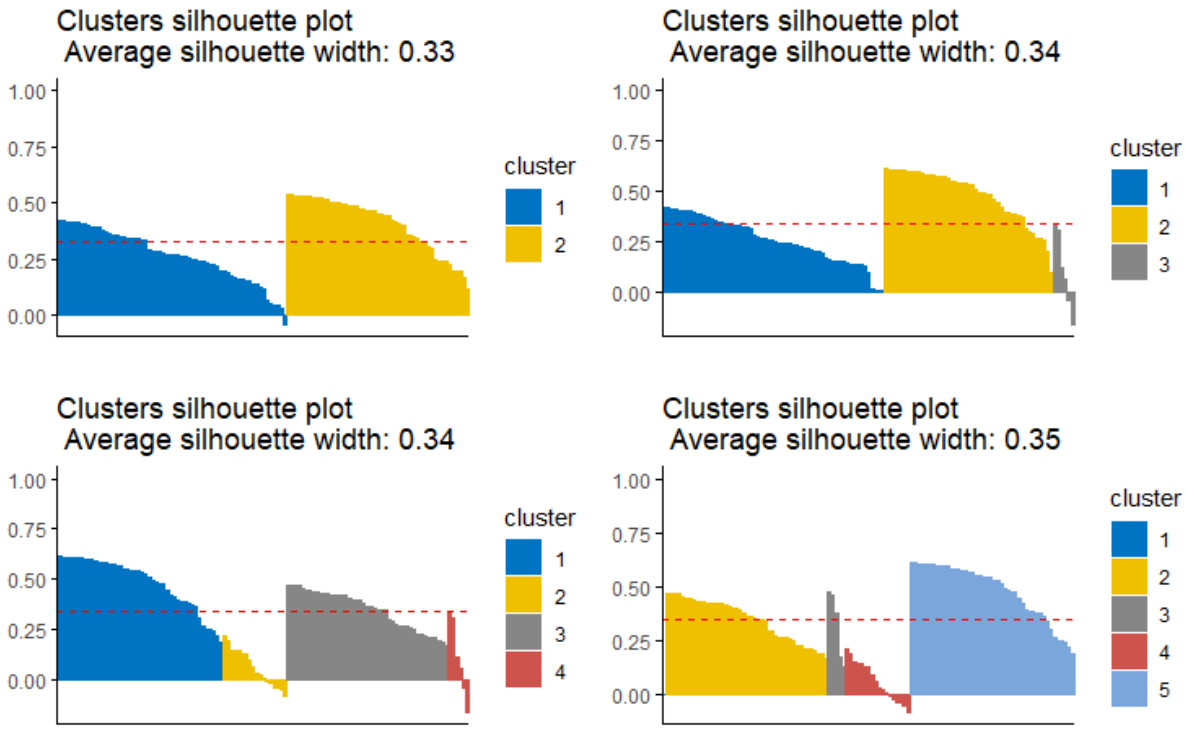


Figura 130 – Validação de cluster k = 2,3,4,5.

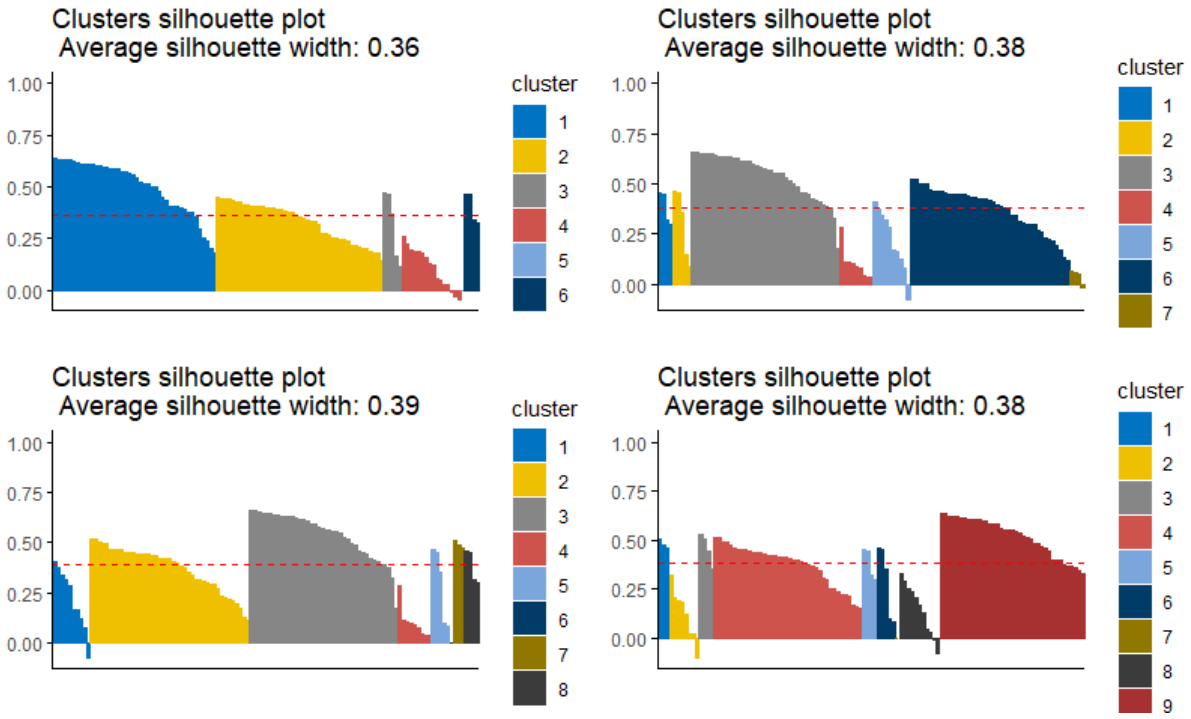


Figura 131 – Validação de cluster k = 6,7,8,9.

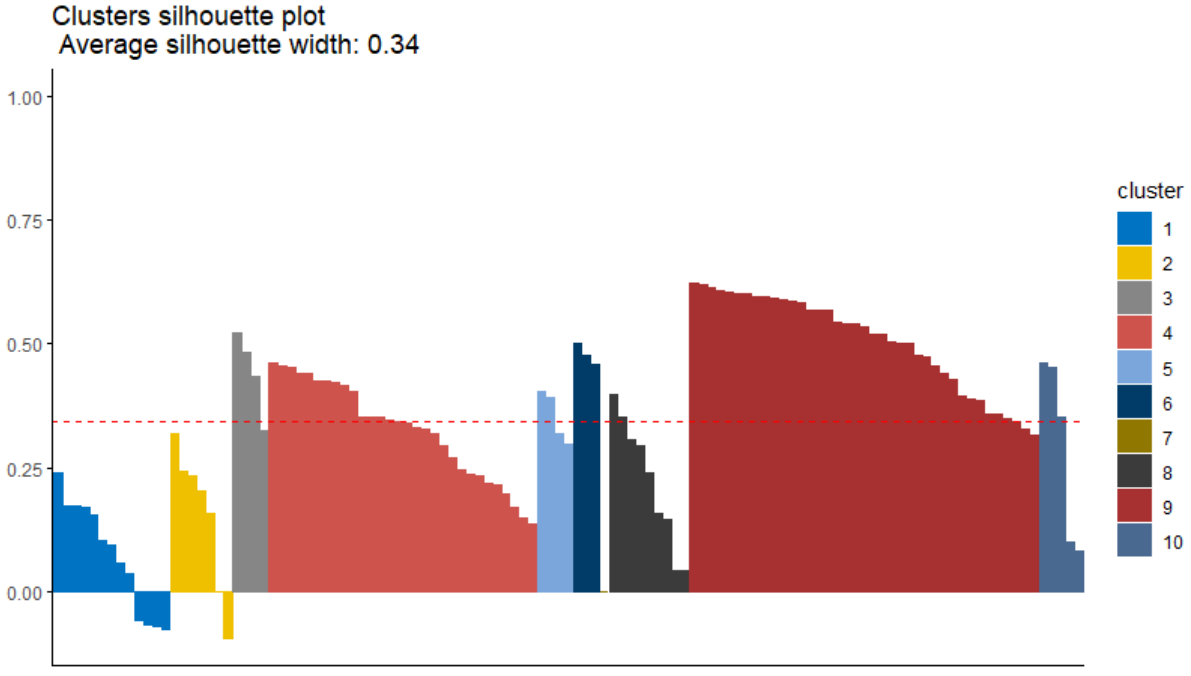


Figura 132 – Validação de cluster k = 10.

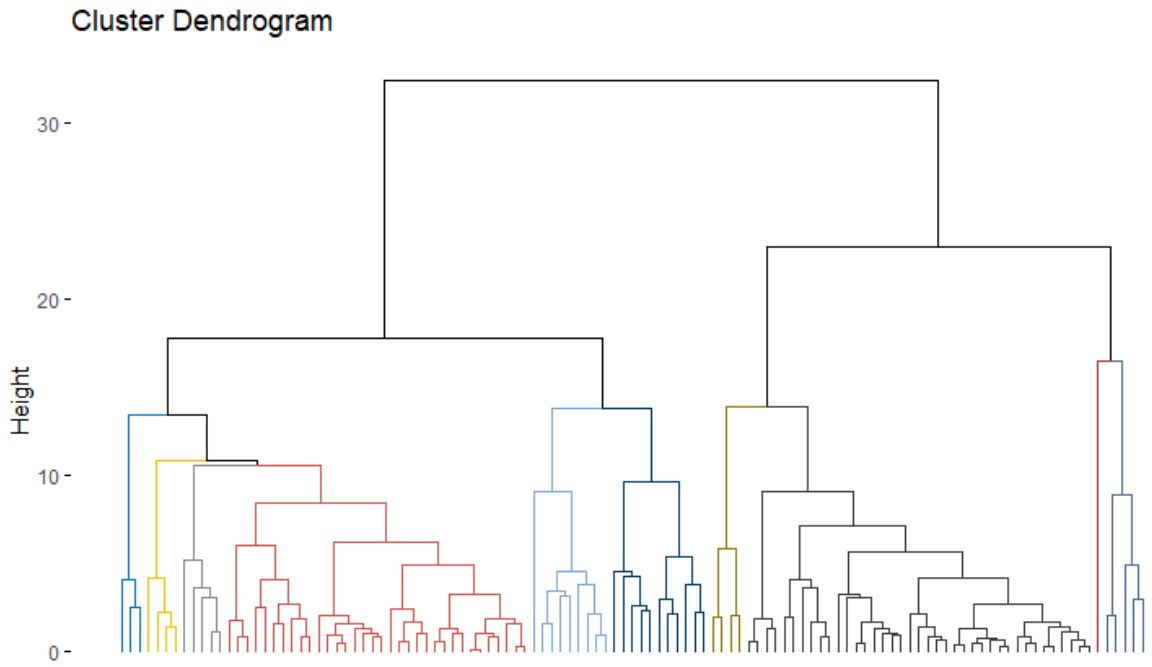


Figura 133 – Dendograma para k = 10.

D.2 Análise para dados tratados do banco de dados II

D.2.1 Resultados de validação de *clusters* com tratamento de dados

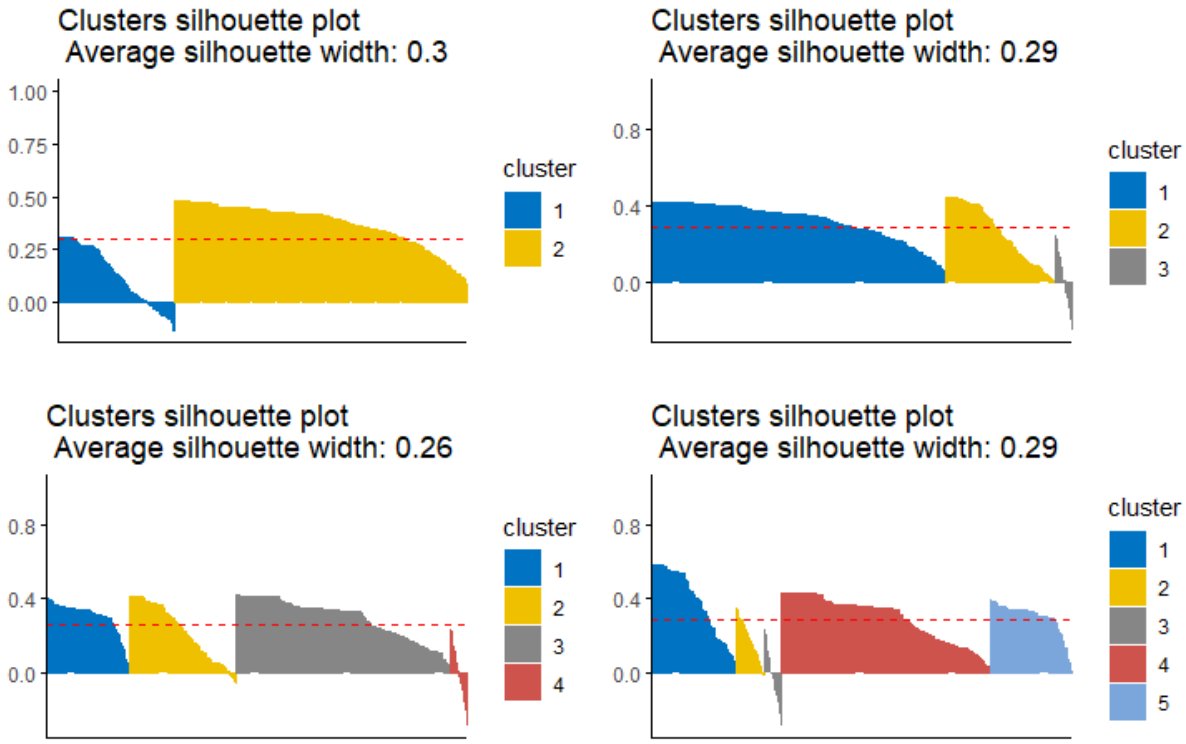


Figura 134 – Validação de cluster k = 2,3,4,5.

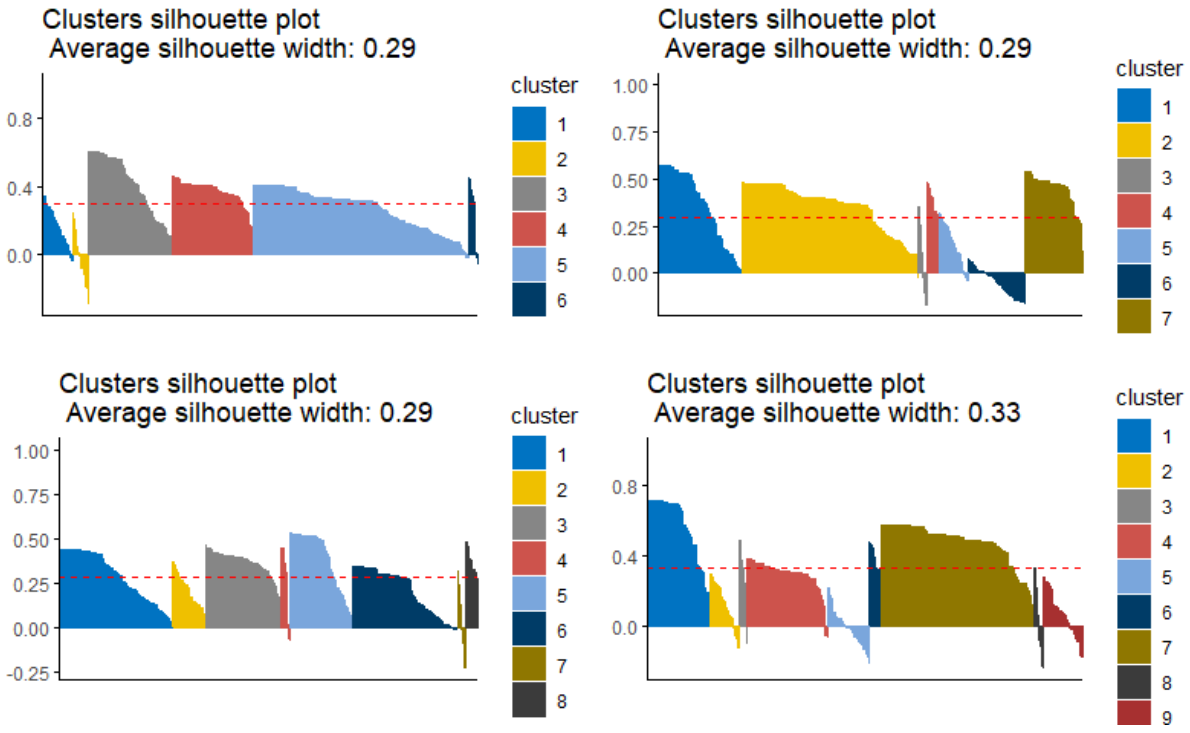


Figura 135 – Validação de cluster k = 6,7,8,9.

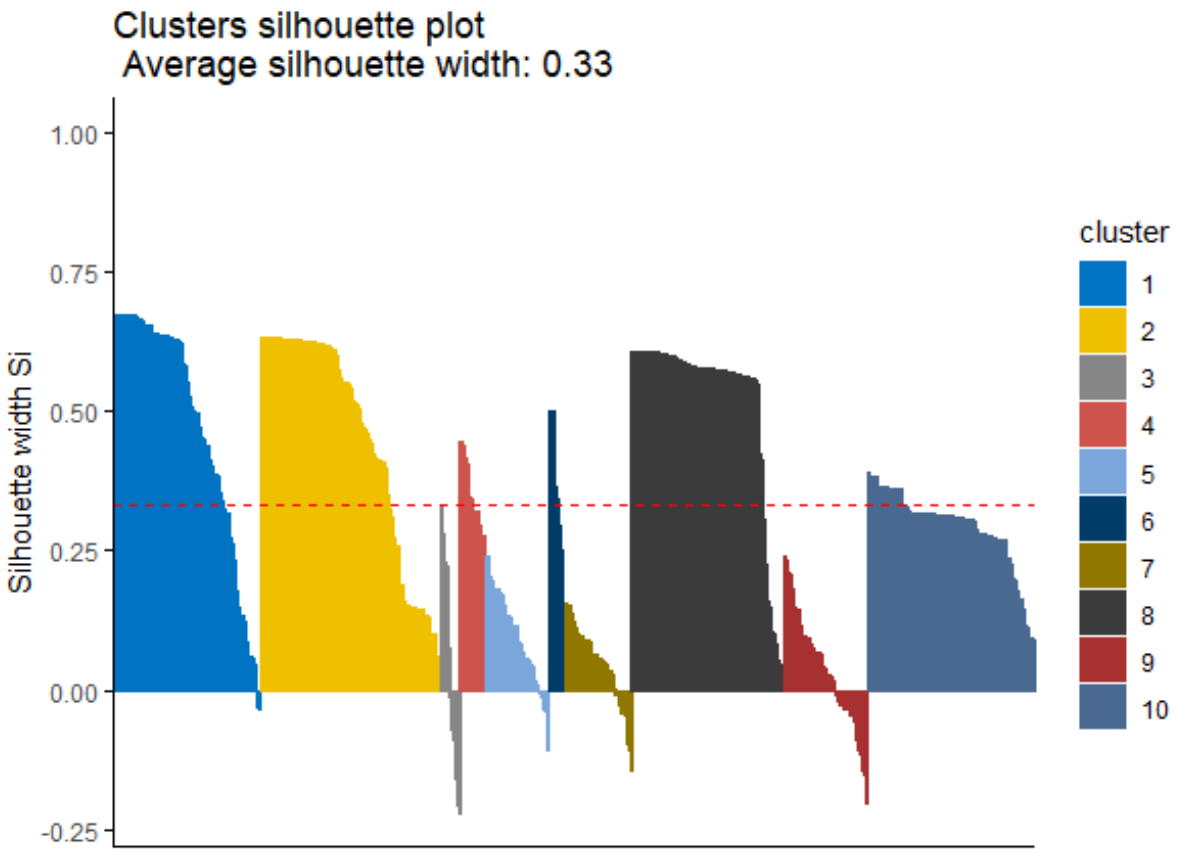


Figura 136 – Validação de cluster k = 10.

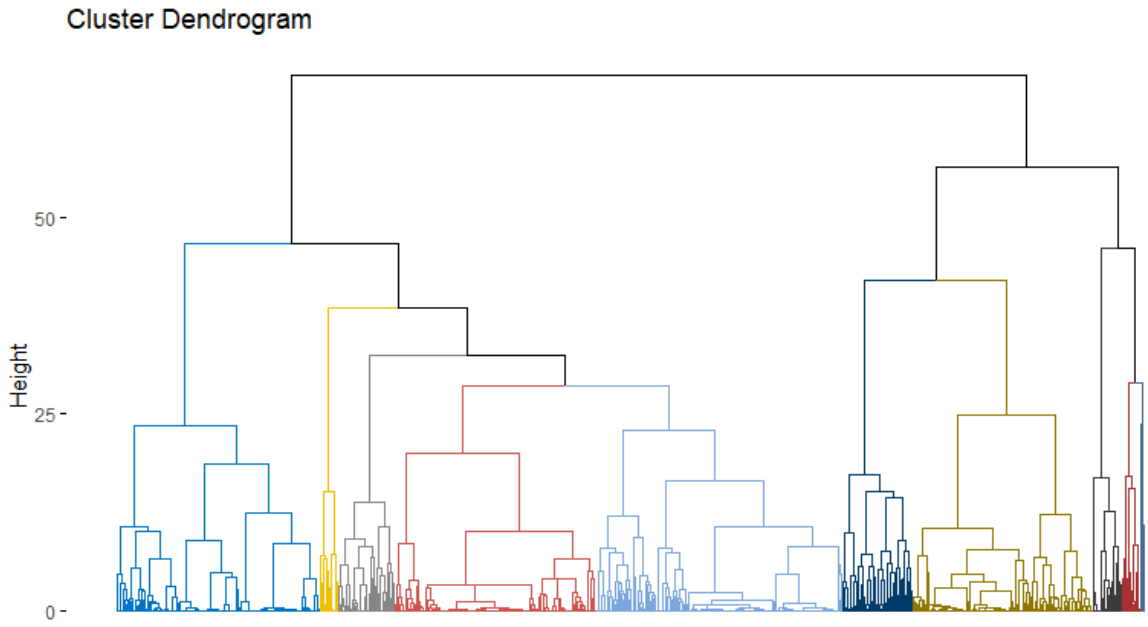
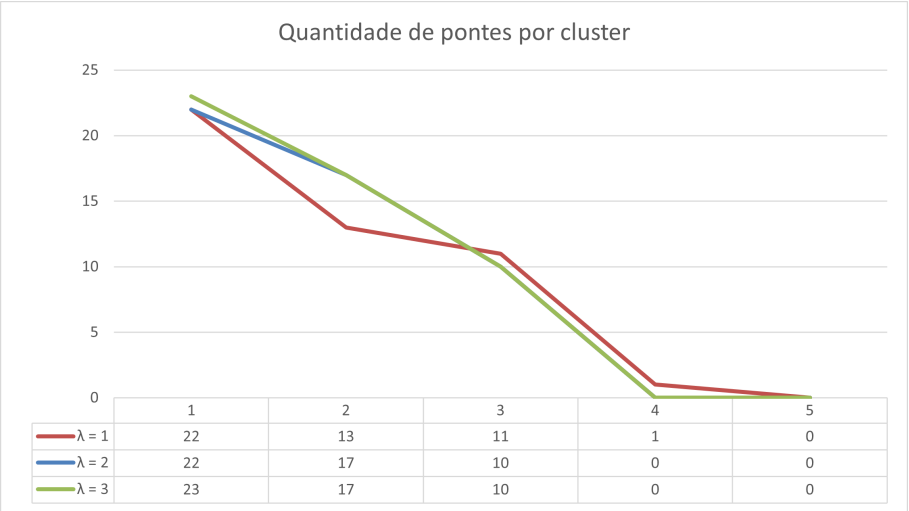


Figura 137 – Dendograma para k = 10.

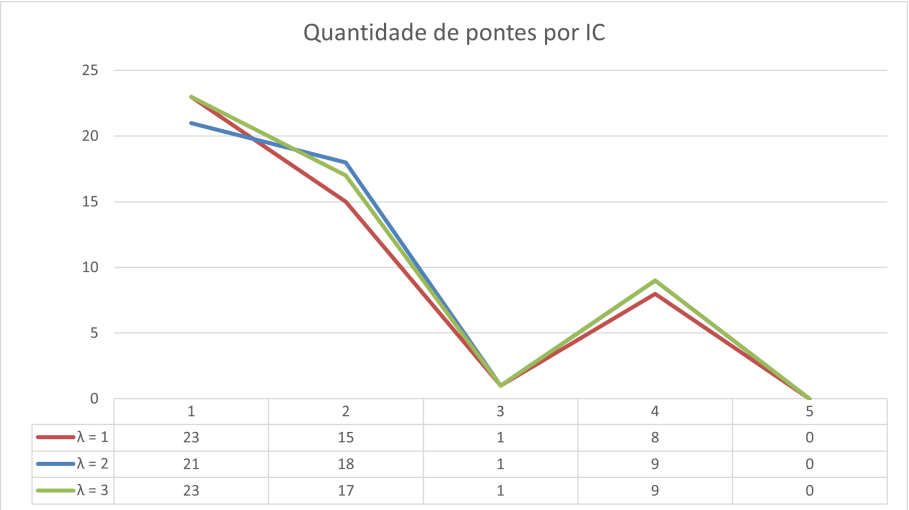
APÊNDICE E – Otimização

E.1 Resultados de seleção de pontes



	1	2	3	4	5
λ = 1	22	13	11	1	0
λ = 2	22	17	10	0	0
λ = 3	23	17	10	0	0

Figura 138 – Comparativo das quantidades de pontes selecionadas considerando os *clusters*.



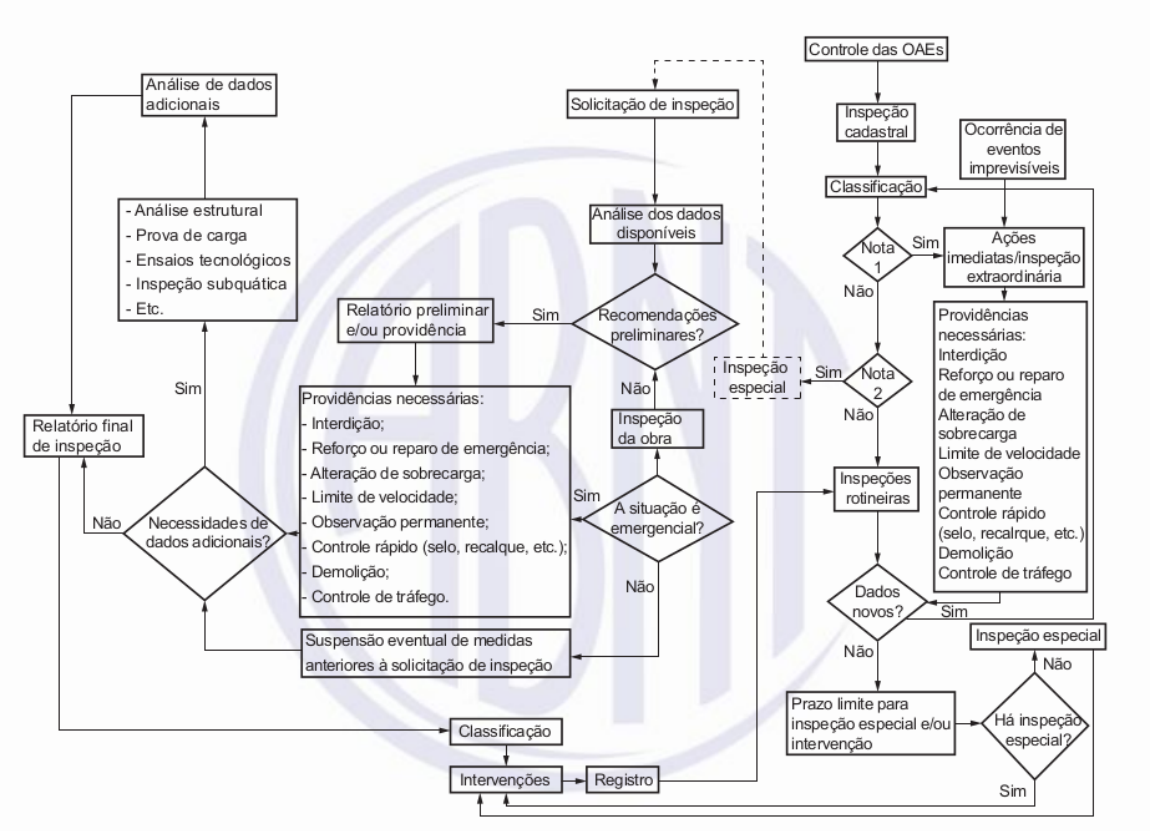
	1	2	3	4	5
λ = 1	23	15	1	8	0
λ = 2	21	18	1	9	0
λ = 3	23	17	1	9	0

Figura 139 – Comparativo das quantidades de pontes selecionadas considerando os valores de IC.

Anexos

ANEXO A – Fluxograma de Gereciamento de OAE

Figura 140 – Fluxograma de Gerenciamento de OAE. (ABNT, 2023a)



B Programa de Treinamento para Inspetores

Quadro 4 – Programa básico de treinamento para inspetor I conforme NBR 16230 (2013)

Item	Assunto	Conhecimento Necessário
1	Conceitos gerais	Noções básicas de utilização de equipamentos de proteção individual e equipamento de proteção coletiva; Noções de metrologia e calibração de equipamentos; Noções básicas de matemática/cálculo; Manuseio de equipamentos, máquinas, ferramentas e instrumentos; Sistema Internacional de Unidade; Regras para arredondamento e algarismos significativos; Noções básicas da preservação do meio ambiente e Informática.
2	Orientação de equipe de trabalho nas atividades de inspeção em campo	Conceitos em saúde, meio ambiente e segurança; Noções de planejamento; Noções de logística; Patologia das estruturas de concreto; Ensaios em estruturas de concreto.
3	Inspeção de estruturas de concreto	Desenho técnico; Noções de comportamento estrutural; Patologia das estruturas de concreto; Materiais de construção civil; Técnicas construtivas de eletrônica; Normatização.
4	Conhecimento de métodos de ensaio em estruturas de concreto	Fundamentos de eletricidade; Equipamentos de ensaio; Noções básicas de eletrônica; Noções básicas de química.

Fonte: ABNT (2013)

C Gráficos e Informações Descritivas do Banco de Dados I

Nesta seção apresenta-se de forma geral as informações dos bancos de dados utilizados. Os dados aqui apresentados são conformes aos obtidos juntos às concessionárias e sem quaisquer tratamentos. Buscou-se indicar os gráficos de integridade de dados (*data missing*) e os histogramas de elementos e características mais relevantes ao estudo. As figuras 141 a 156 contêm informações sobre variáveis numéricas e categóricas utilizadas neste estudo e de interesse de engenharia na gestão de pontes.

C.1 Banco de Dados I

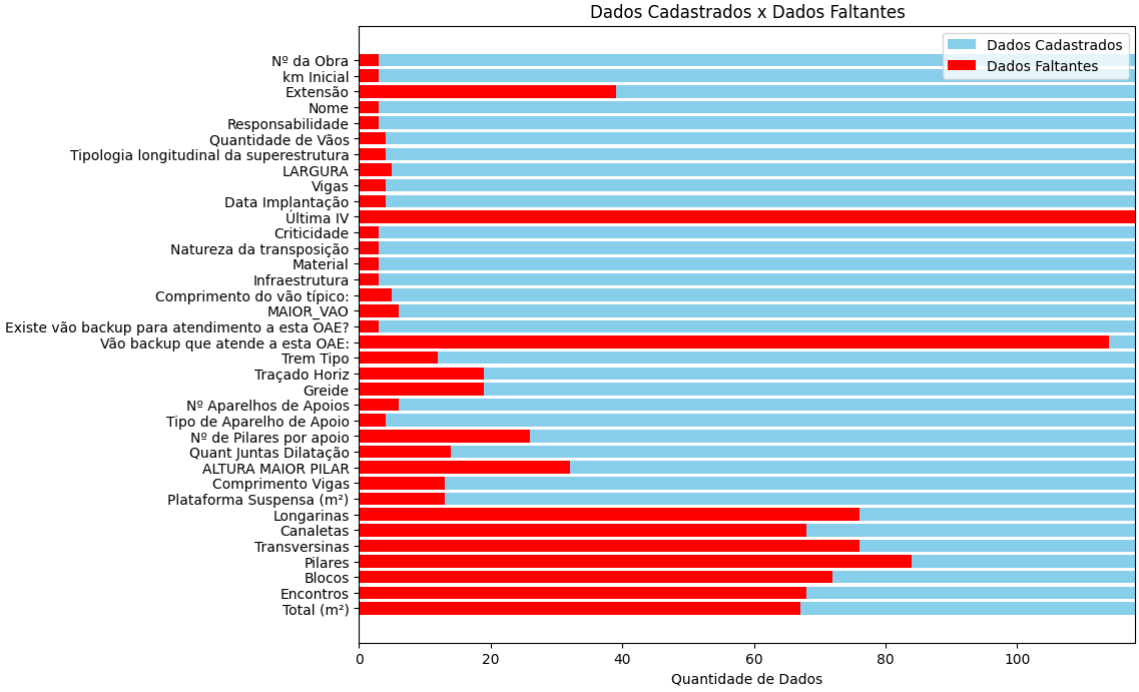


Figura 141 – Dados Faltantes

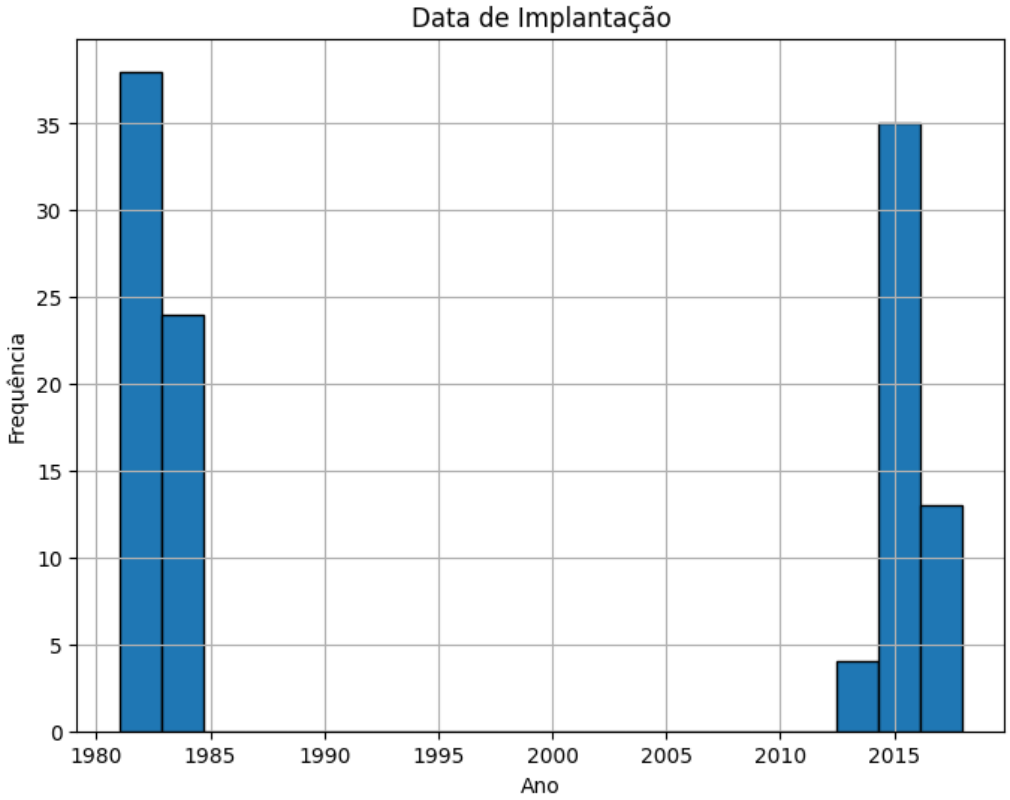


Figura 142 – Data de Implantação

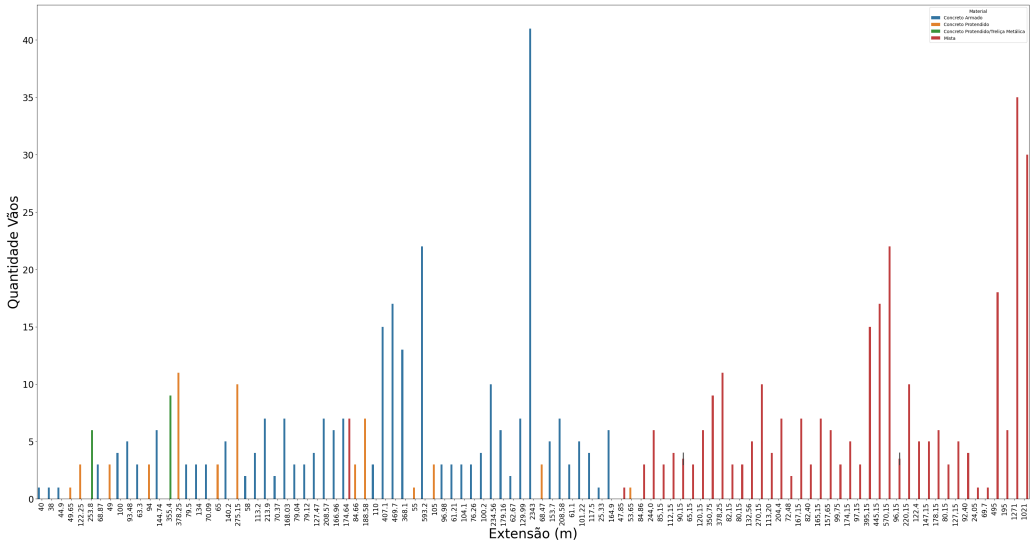


Figura 143 – Extensão x Número de Vãos

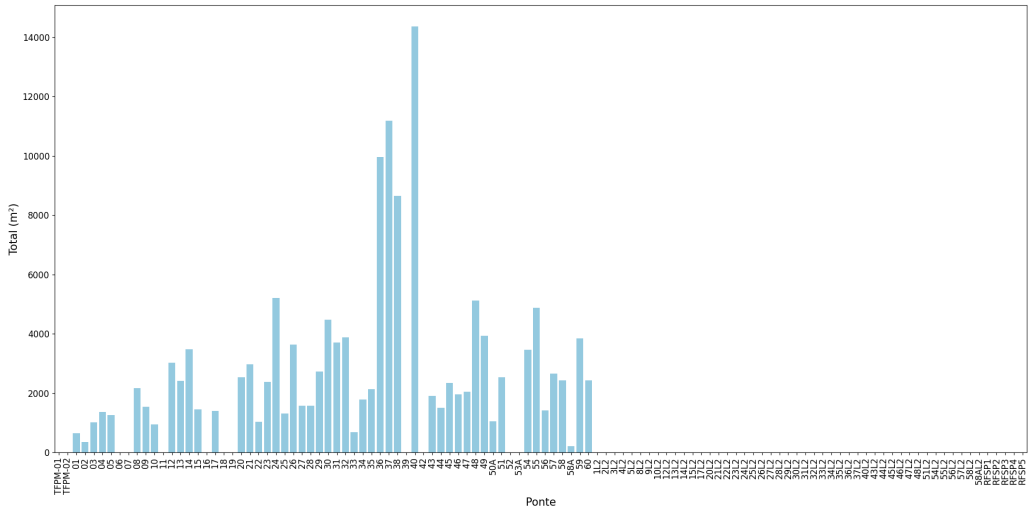


Figura 144 – Área total das Pontes

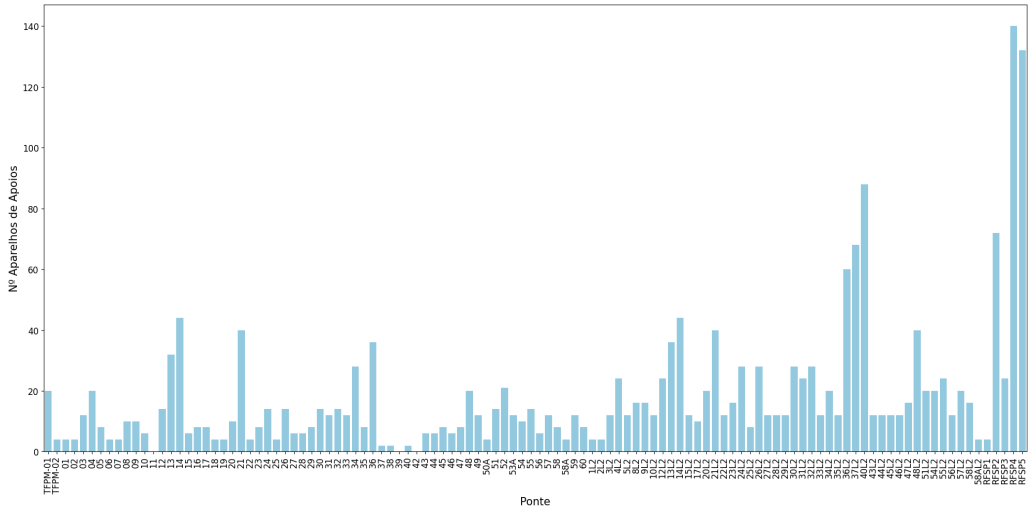


Figura 145 – Quantidade de aparelhos de apoio por ponte

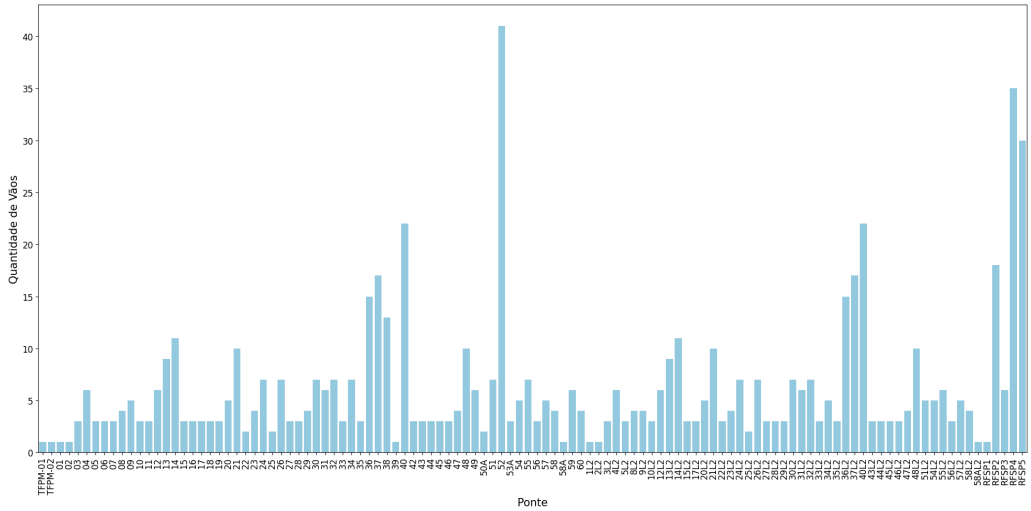


Figura 146 – Quantidade de vãos por ponte

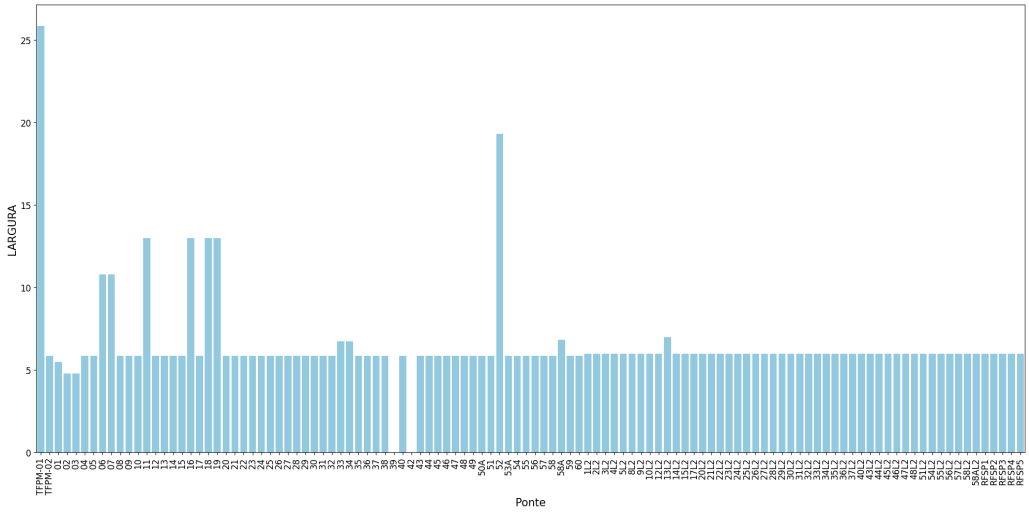


Figura 147 – Largura por ponte

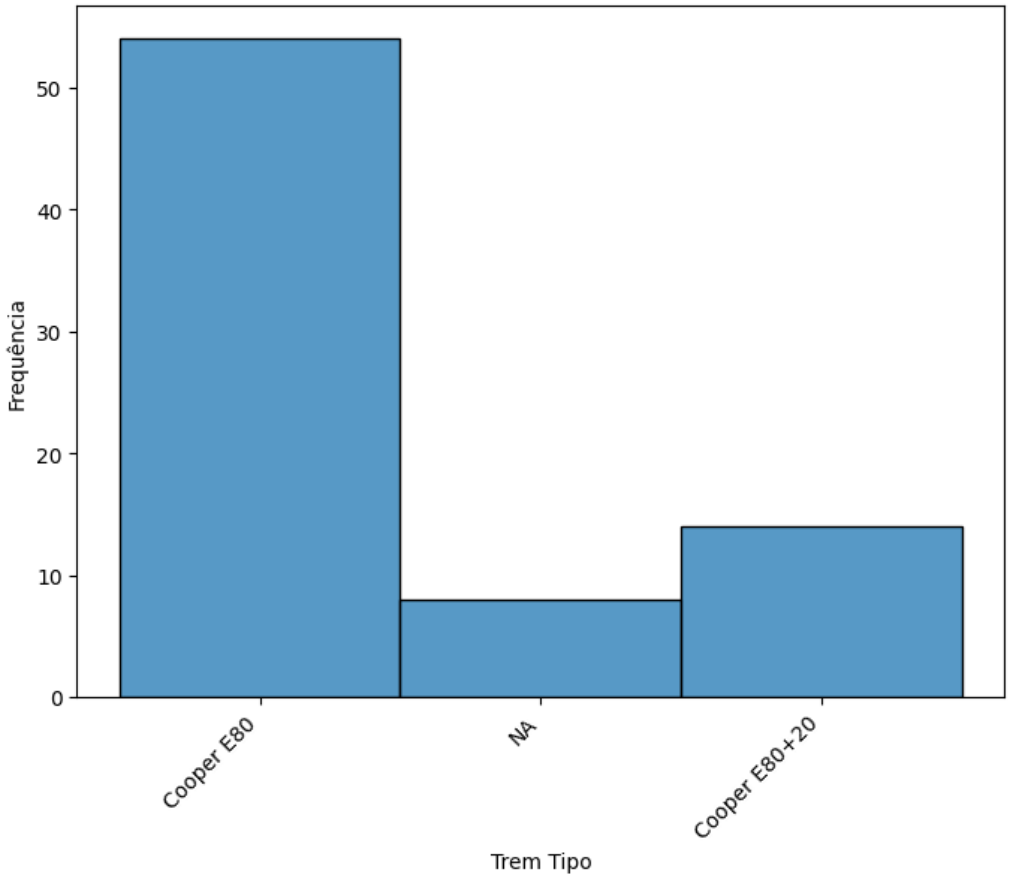


Figura 148 – Histograma de trem tipo

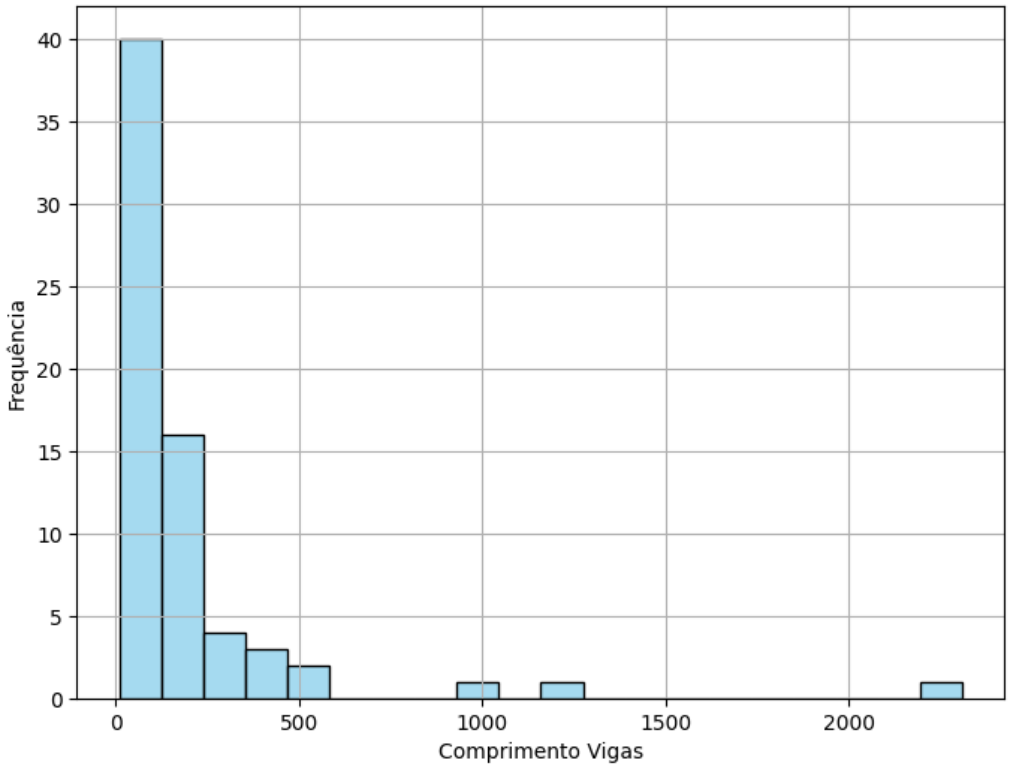


Figura 149 – Histograma do comprimento das vigas

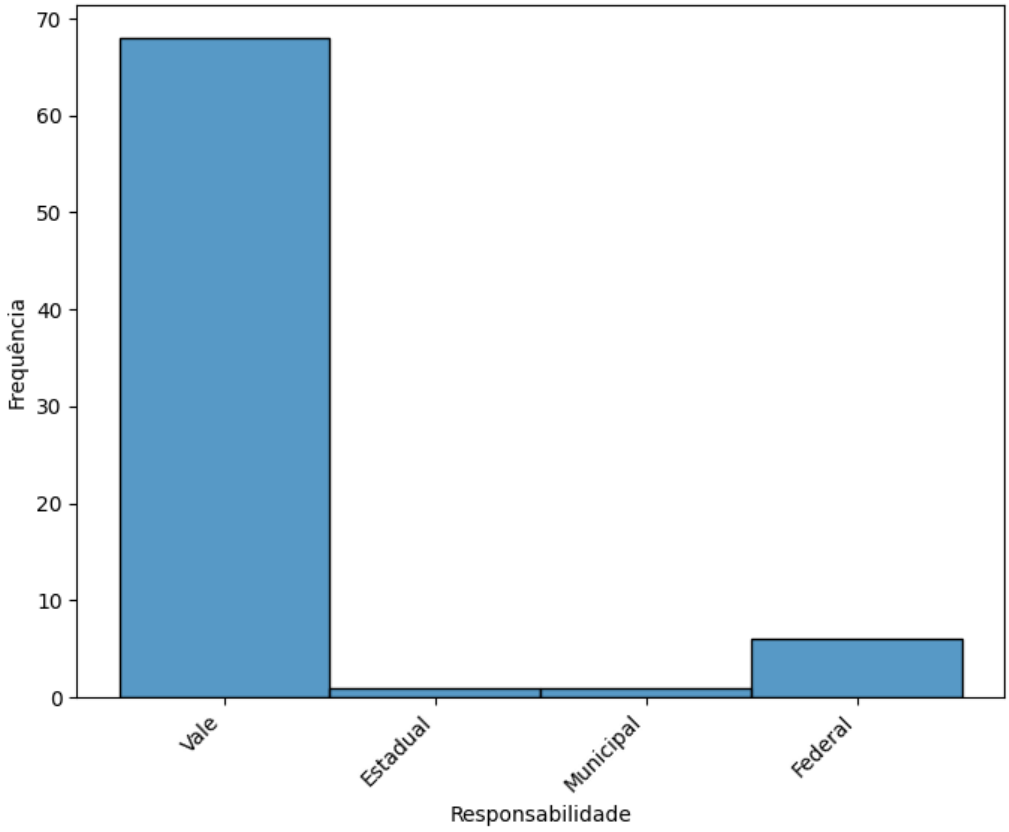


Figura 150 – Histograma de responsabilidade

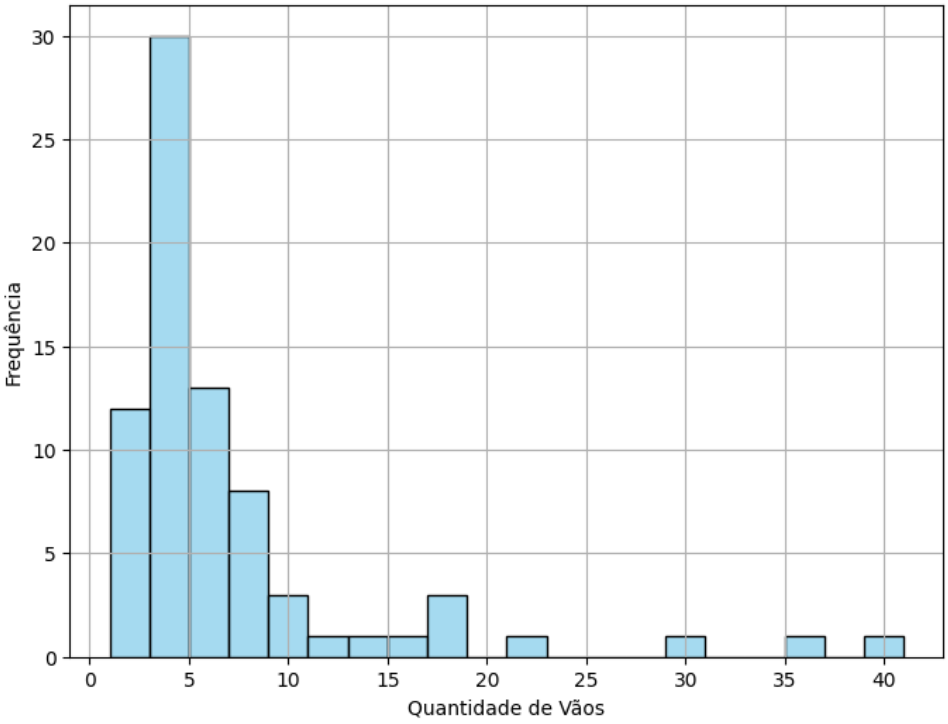


Figura 151 – Histograma do número de vãos

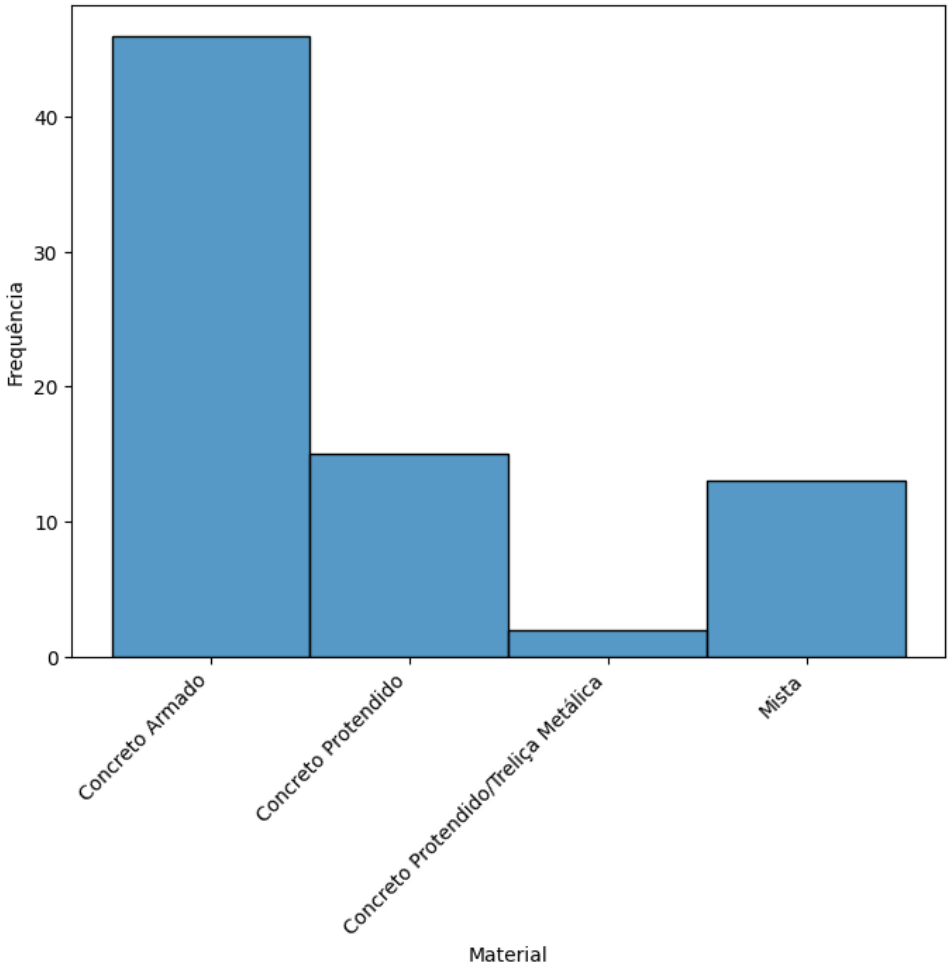


Figura 152 – Histograma de material da superestrutura

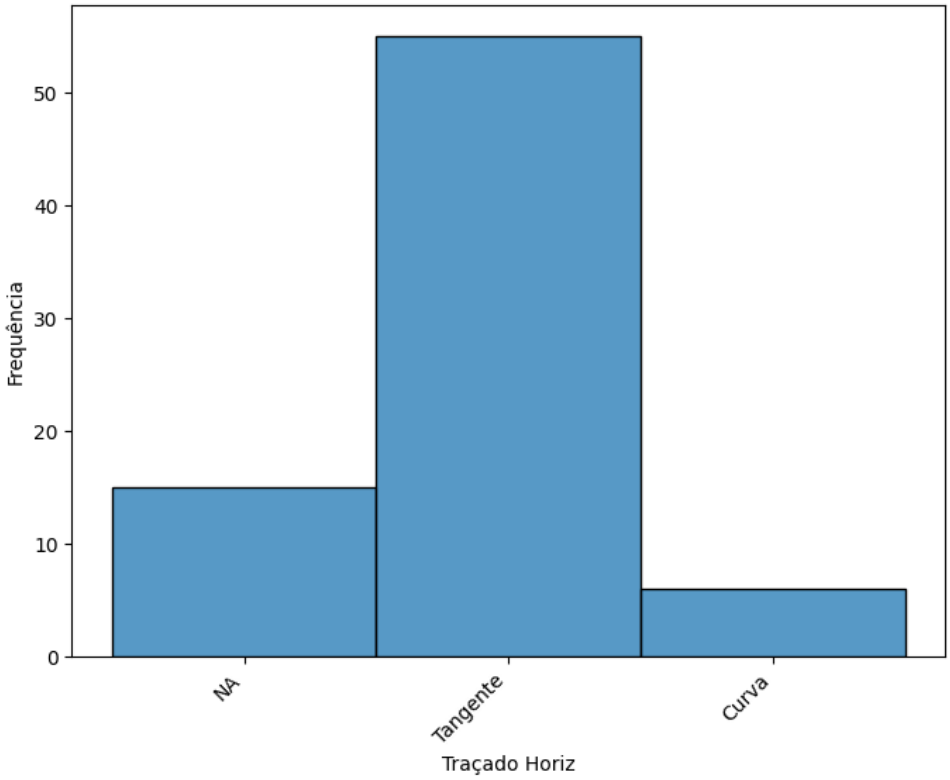


Figura 153 – Histograma de traçado horizontal

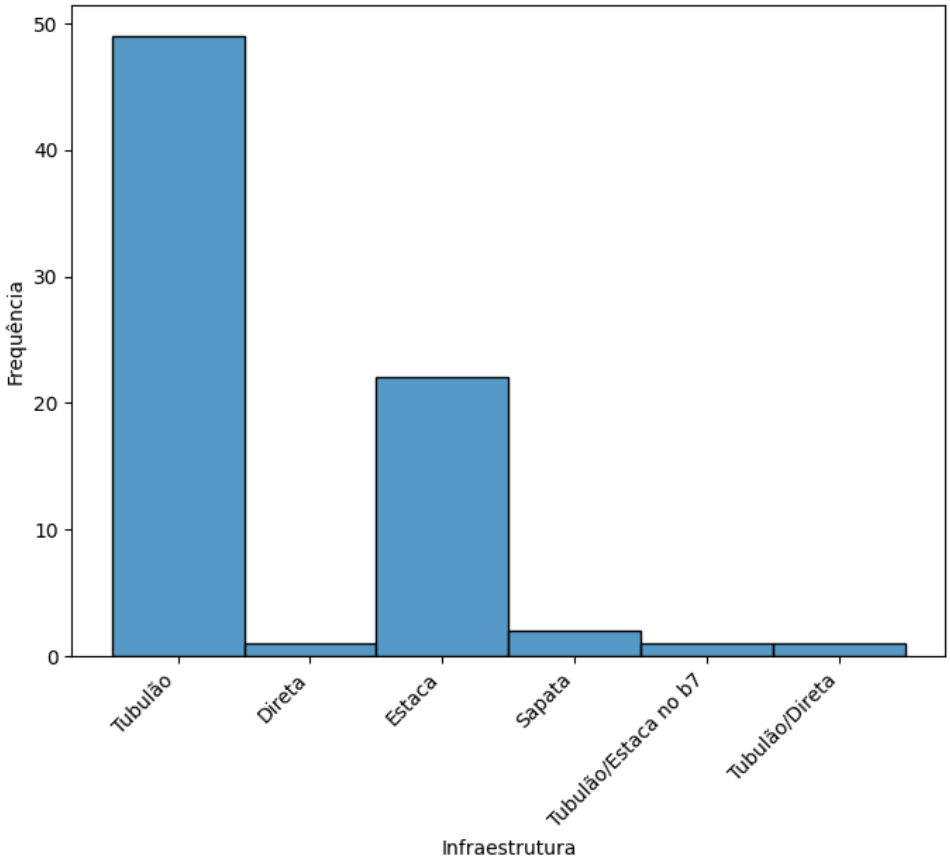


Figura 154 – Histograma de tipo de infraestrutura

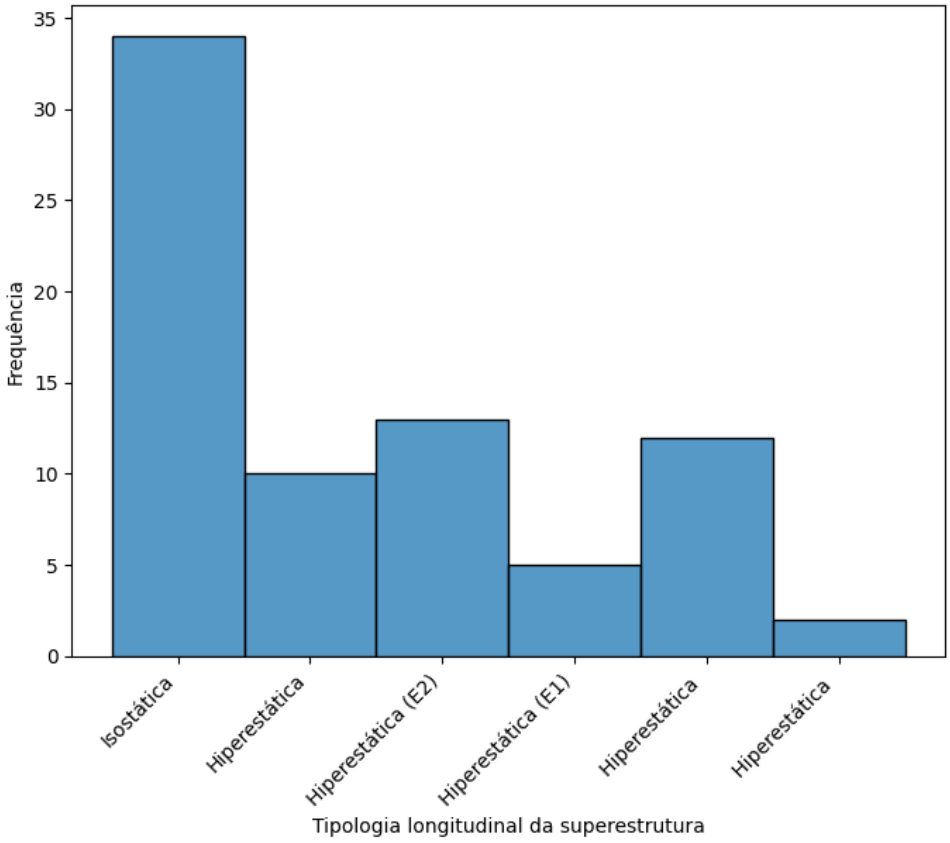


Figura 155 – Histograma de tipologia da superestrutura

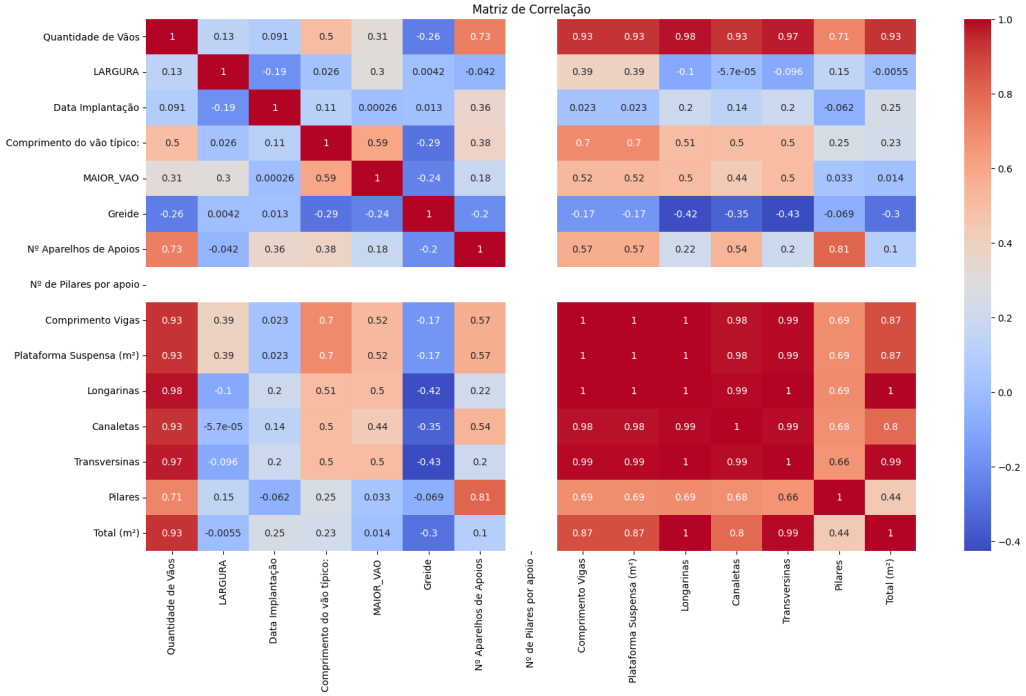


Figura 156 – Matriz de correlação

D Gráficos e Informações Descritivas do Banco de Dados II

Nesta seção apresenta-se de forma geral as informações dos bancos de dados utilizados. Os dados aqui apresentados são conformes aos obtidos juntos às concessionárias e sem quaisquer tratamentos. Buscou-se indicar os gráficos de integridade de dados (*data missing*) e os histogramas de elementos e características mais relevantes ao estudo. As figuras 157 a 168 contêm informações sobre variáveis numéricas e categóricas utilizadas neste estudo e de interesse de engenharia na gestão de pontes.

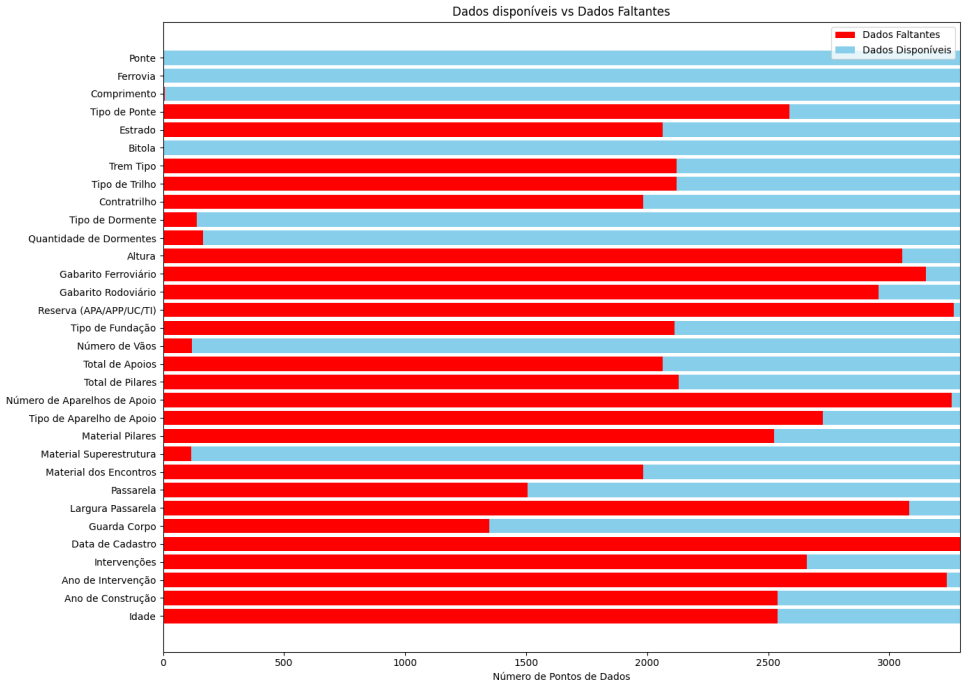


Figura 157 – Dados Faltantes

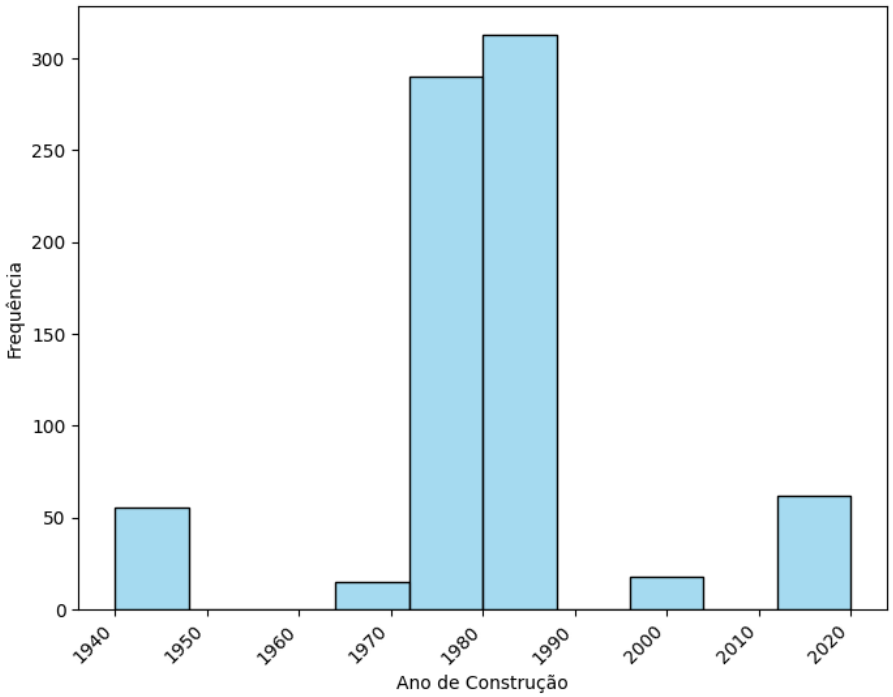


Figura 158 – Ano de construção

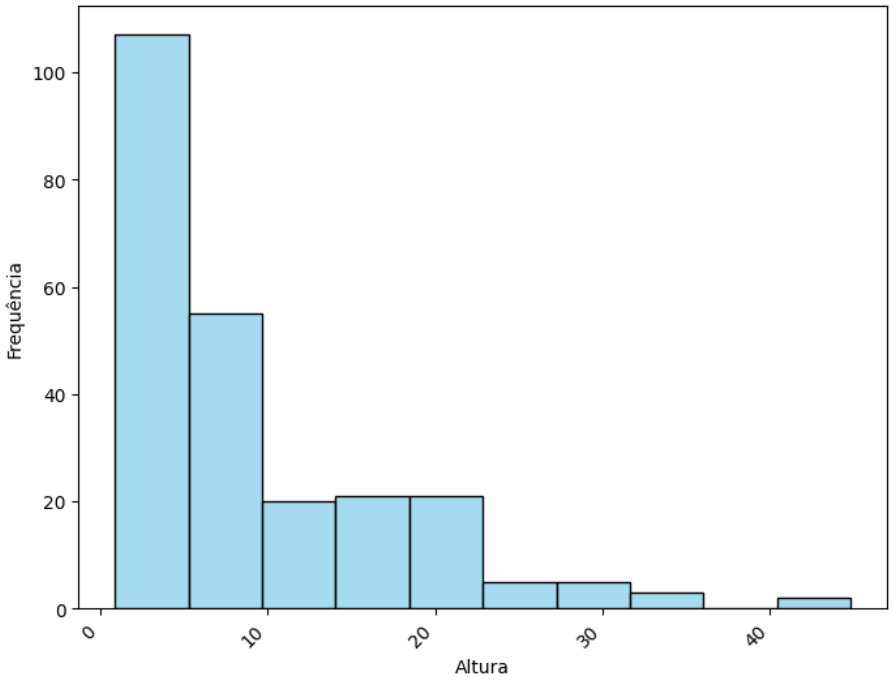


Figura 159 – Altura

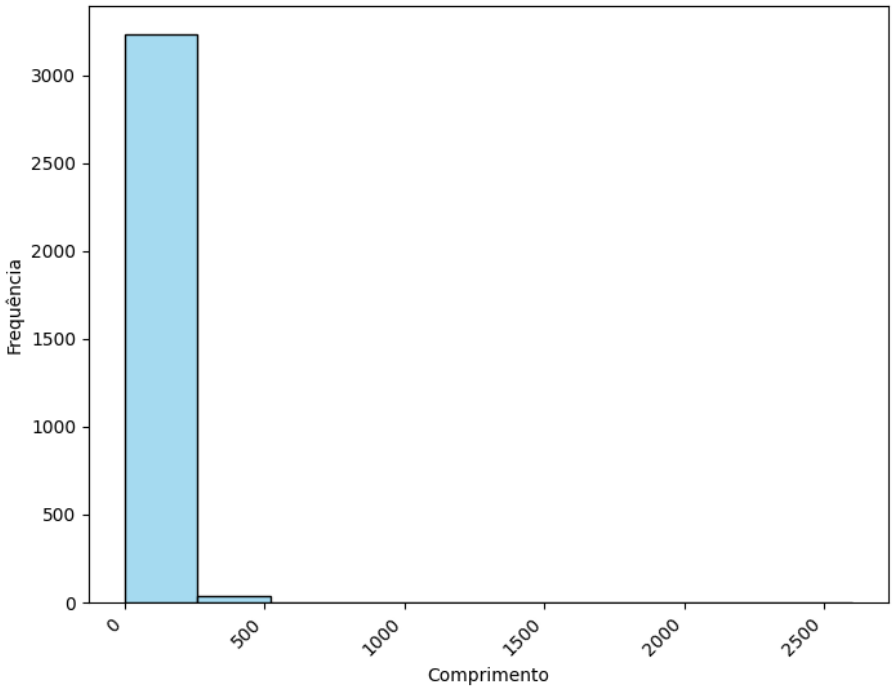


Figura 160 – Comprimento

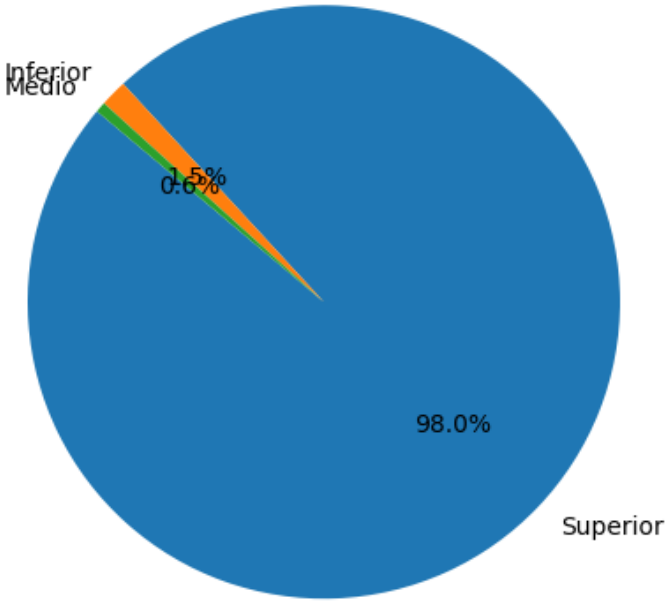


Figura 161 – Estrado

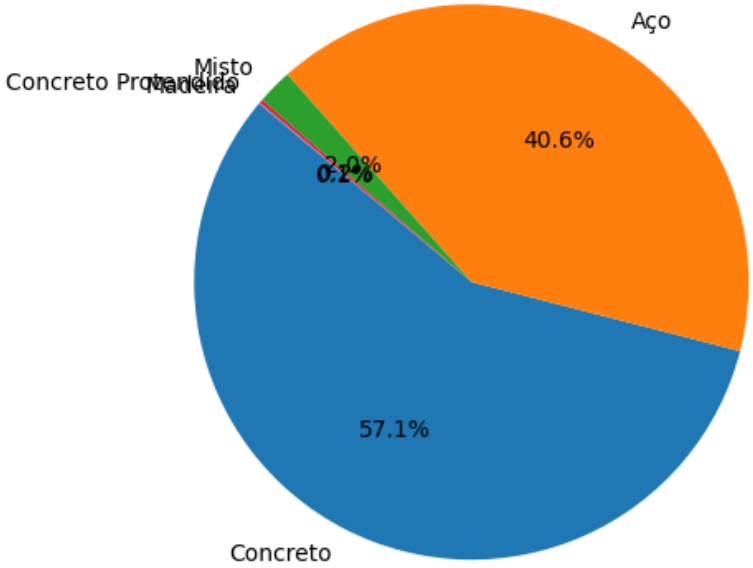


Figura 162 – Material da Superestrutura

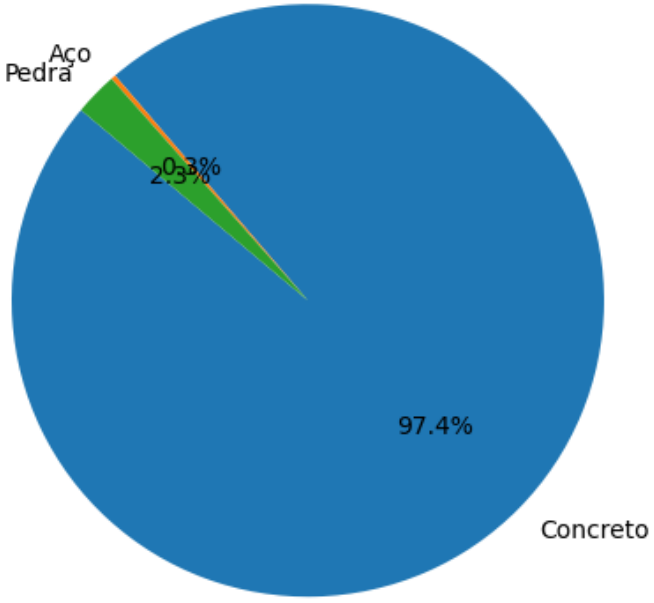


Figura 163 – Material dos Pilares

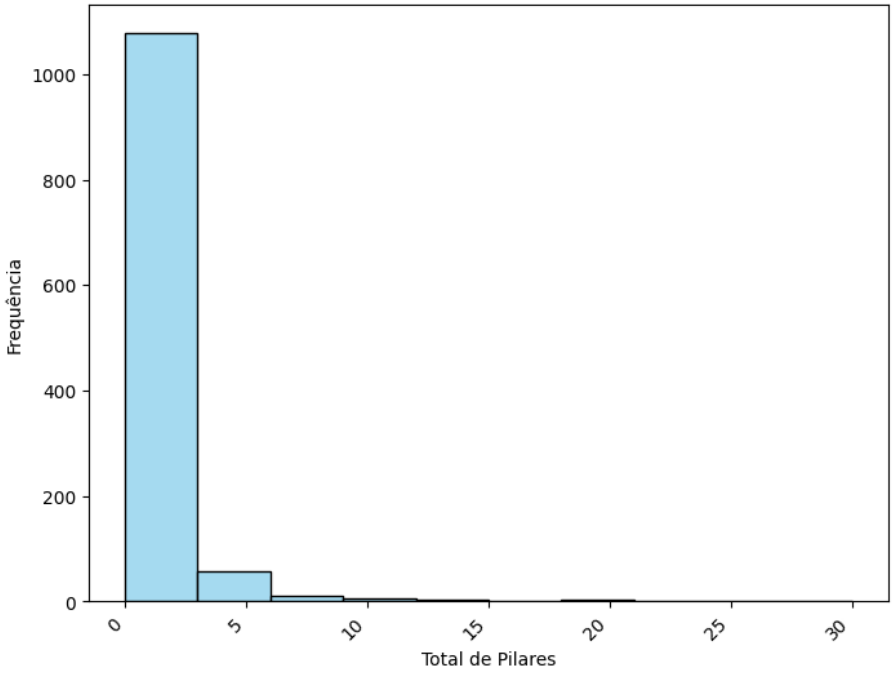


Figura 164 – Quantidade de Pilares

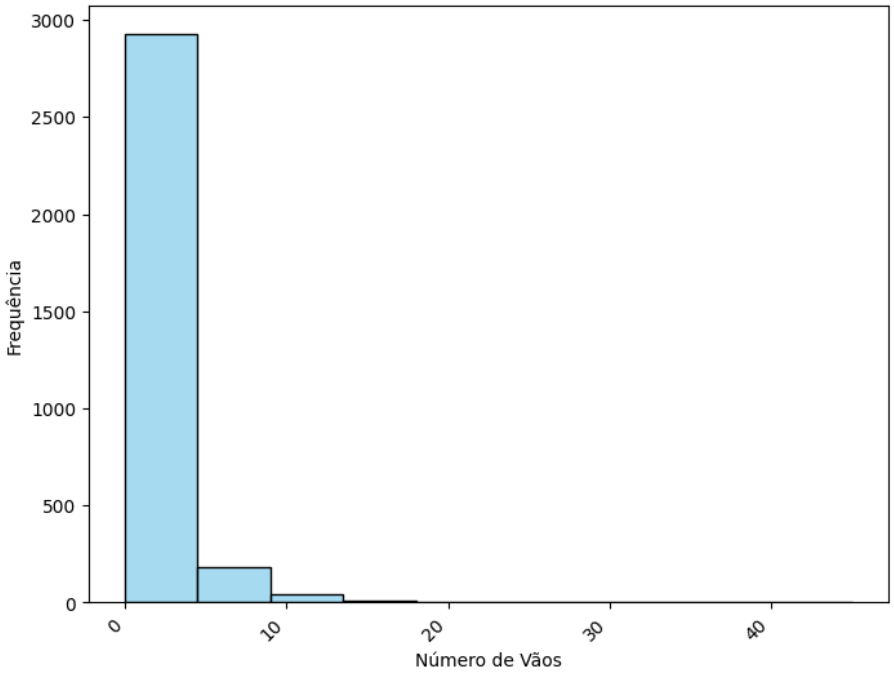


Figura 165 – Quantidade de Vãos

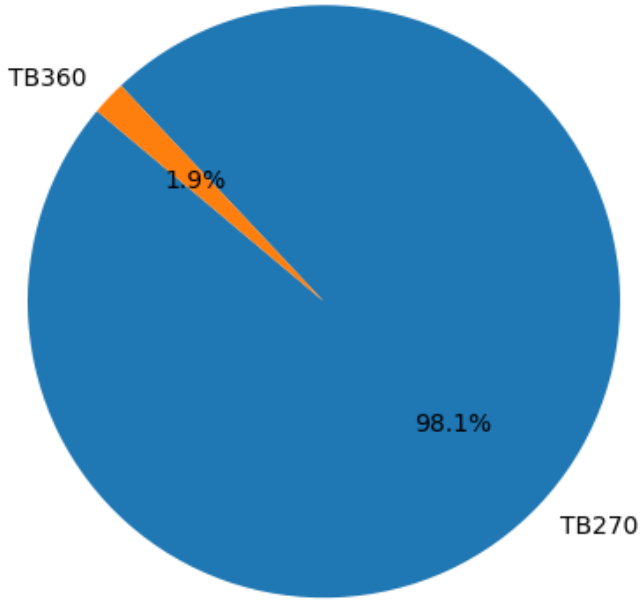


Figura 166 – Trem Tipo

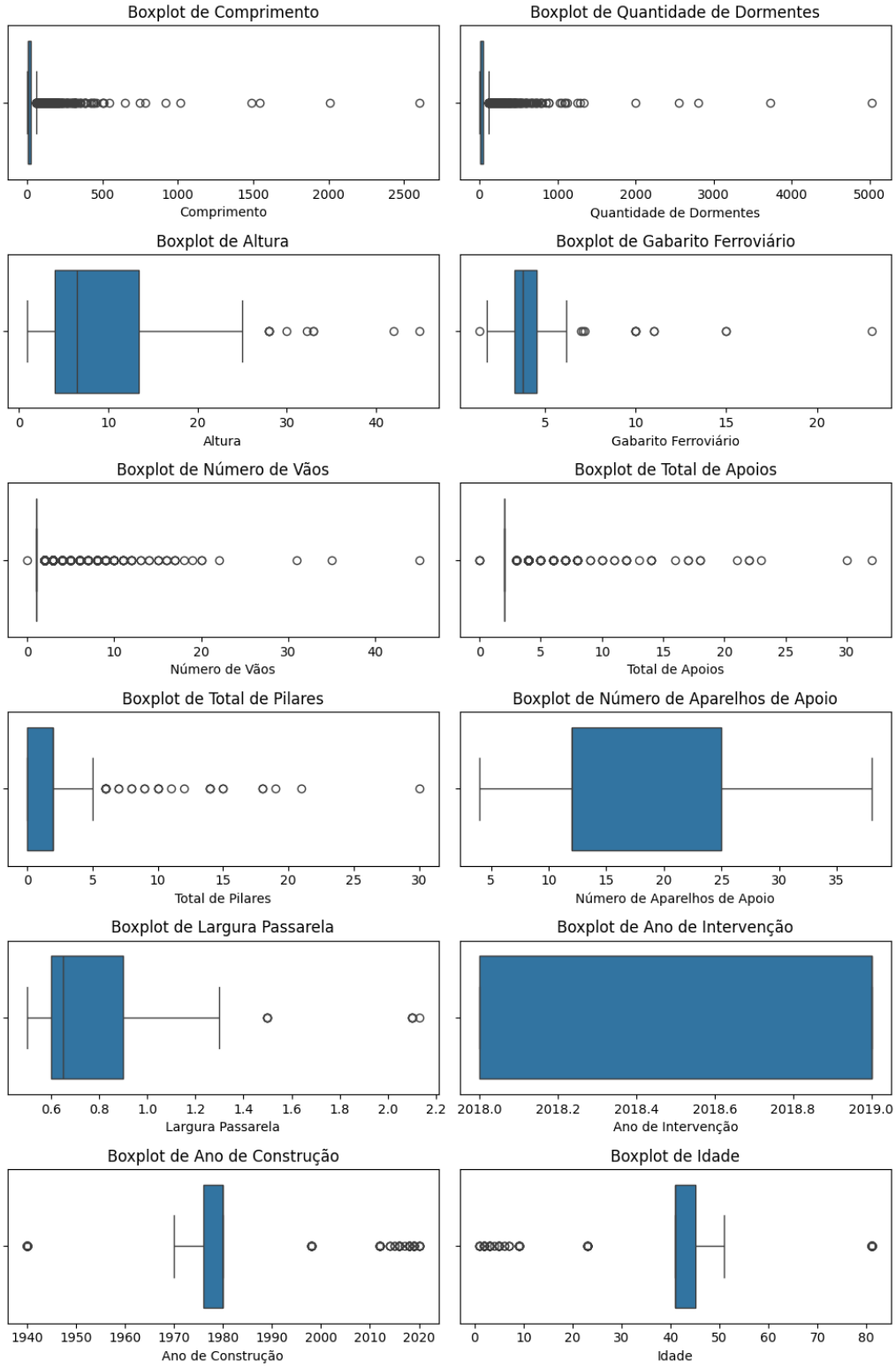


Figura 167 – Boxplot

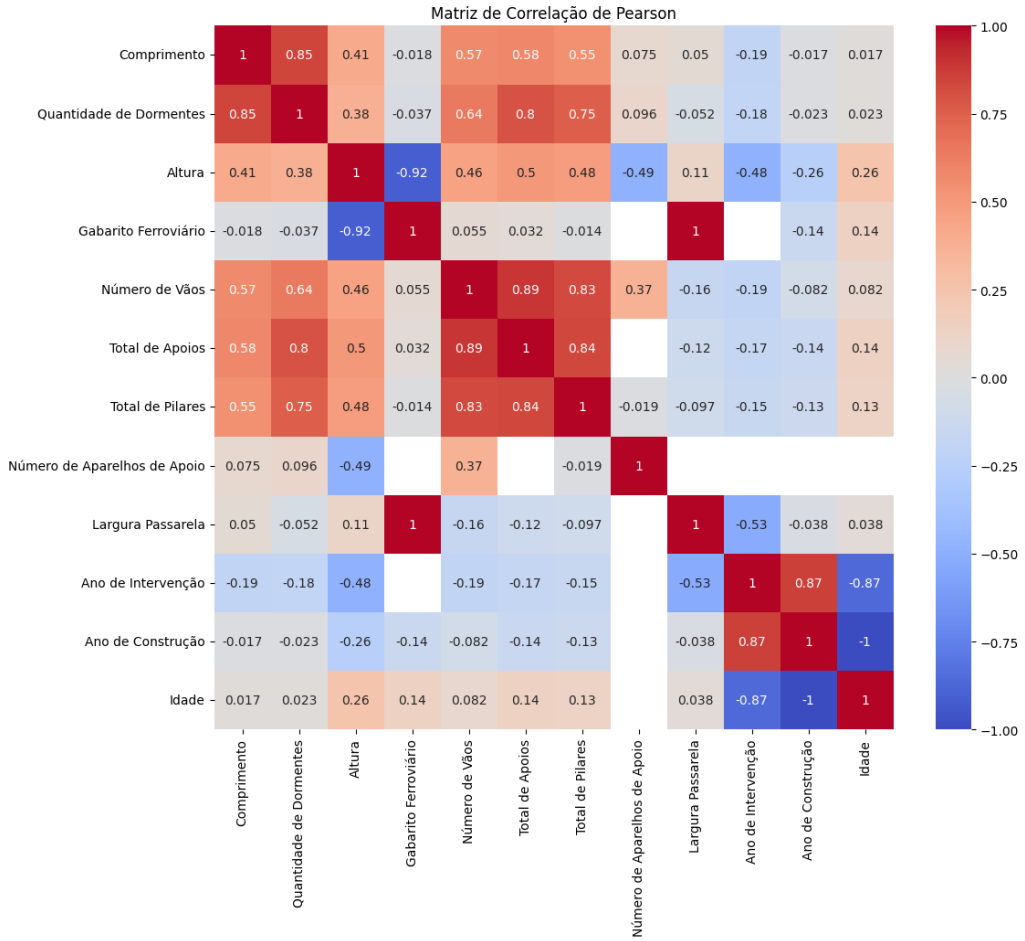


Figura 168 – Matriz de Correlação de Pearson