

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MARIANNA DO ROCIO CARDOSO

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO UTILIZANDO INFERÊNCIA  
ESTATÍSTICA PARA ESTIMATIVA DE CUSTOS DE REFORÇO E  
ALARGAMENTO DE PONTES EM CONCRETO DE PEQUENOS  
VÃOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2015

MARIANNA DO ROCIO CARDOSO

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO UTILIZANDO INFERÊNCIA  
ESTATÍSTICA PARA ESTIMATIVA DE CUSTOS DE REFORÇO E  
ALARGAMENTO DE PONTES EM CONCRETO DE PEQUENOS  
VÃOS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. MSc. Amacin Rodrigues  
Moreira

CURITIBA

2015

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

### ***DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO UTILIZANDO INFERÊNCIA ESTATÍSTICA PARA ESTIMATIVA DE CUSTOS DE REFORÇO E ALARGAMENTO DE PONTES EM CONCRETO DE PEQUENOS VÃOS***

Por

**MARIANNA DO ROCIO CARDOSO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 20 de novembro de 2015, pela seguinte banca de avaliação:

---

Prof. Orientador – MSc. Amacin Rodrigues Moreira,  
UTFPR

---

Profa. Eng. Patricia Fontana,  
FACEAR

---

Eng. Civil Lucas Vaslanv da Silva Wolff  
AAD Projetos Consultoria e Engenharia

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, sem Ele nada seria possível.

Ao meu orientador, Prof. MSc. Amacin Rodrigues Moreira, pela receptividade, paciência e apoio prestados ao longo do ano, sem os quais não seria possível o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Aduino José Miranda de Lima, pelas importantes sugestões e contribuições.

Ao engenheiro civil Fabio Waltrick, que muito contribuiu para minha formação pessoal e profissional, pela generosidade e pelos inestimáveis conhecimentos transmitidos.

Aos amigos feitos na UTFPR, pela parceria do início ao fim.

A AAD Projetos Consultoria e Engenharia, que gentilmente cedeu os projetos de reforço e alargamento das Obras de Artes Especiais.

E finalmente e especialmente, agradeço aos meus pais, Paulo Henrique e Miriam, pelo amor incondicional, dedicação e suporte em todos os momentos da minha vida; ao meu irmão Paulo, pela amizade; e a meu namorado Bruno, pelo carinho e companheirismo.

## RESUMO

CARDOSO, R. Marianna. **Desenvolvimento de um modelo utilizando inferência estatística para estimativa de custos de reforço e alargamento de pontes em concreto de pequenos vãos.** 2015. 96 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

As pontes da malha rodoviária federal brasileira foram implantadas a partir de 1940 e estão atingindo seu período de vida útil de 50 anos, inicialmente previsto. Grande parte destas pontes está degradada e necessita de intervenções para reabilitar sua estrutura. Além disso, há a necessidade de adequação das mesmas as atuais cargas adotadas e às novas dimensões transversais. Por isso, precisam de reforço e alargamento do gabarito para proporcionar aos usuários maior nível de conforto e segurança. O grande desafio atual é reabilitar essas estruturas de concreto respeitando as restrições econômicas atuais, sendo assim, o custo torna-se um fator decisivo na escolha da melhor solução para o problema. Neste trabalho foi desenvolvido, por meio de inferência estatística, um procedimento para geração de modelos numéricos que possam ser extrapolados, para estimar o custo de reforço e alargamento. Tal modelo facilitará a análise de viabilidade econômico-financeira de aplicação das possíveis soluções estabelecidas, propondo uma solução mais rápida para auxiliar aos órgãos públicos ou executores nas fases de planejamento e controle, visto que com o modelo não haverá a necessidade de orçar a intervenção através da contratação do projeto.

**Palavras chave:** Concreto armado. Pontes. Alargamento. Reforço estrutural. Custo. Inferência estatística.

## ABSTRACT

CARDOSO, R. Marianna. **Development of a model using statistical inference to estimate the costs of reinforcement and widening of short span concrete bridges.** 2015. 96 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

The bridges of the Brazilian federal highways were implemented from 1940 and are reaching their useful life, 50 years initially planned. Most of these bridges are deteriorated and need interventions to rehabilitate its structure. Besides, there is a demand to adapt the current loads and the new transverse dimensions. Therefore, they need reinforcement and widening of template to give users the highest level of comfort and safety. The great challenge is to rehabilitate these concrete structures respecting current economic constraints, therefore the cost becomes a decisive factor in the selection of the best solution for the problem. In this work was developed, through statistical inference, a procedure for generation of numerical models that can be extrapolated, to estimate the cost of reinforcements and widening. Such a model will facilitate the economic and financial viability of application analysis of possible established solutions. Thus, propose a faster solution to help public agency or executors in the stages of planning and control, since with the model there won't be need to budget intervention through project contracting.

**Keywords:** Reinforced concrete. Bridges. Reinforcement. Widening. Cost. Statistical inference.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 01 – 1ª Fase do programa Proarte .....   | 19 |
| Figura 02 – Vista geral de uma ponte, exibindo os principais elementos<br>constituintes .....   | 20 |
| Figura 03 – Vigamento (indicação longarinas e transversinas) do tabuleiro de uma<br>OAE.....  | 22 |
| Figura 04 – Elementos utilitários constituintes de uma seção transversal de ponte..   | 22 |
| Figura 05 – Elementos constituintes de uma seção longitudinal de ponte .....  | 23 |
| Figura 06 – Sistemas estruturais mais frequentes. ....  | 24 |
| Figura 07 – Evolução do gabarito transversal das pontes rodoviárias. ....   | 26 |
| Figura 08 – Tipos de estratégias de renovação .....   | 28 |
| Figura 09 – Formas de manutenção estrutural.....  | 33 |
| Figura 10 – Lei de Sitter .....   | 34 |
| Figura 11 – A importância de um orçamento equilibrado .....   | 35 |
| Figura 12 – Diagrama de um sistema típico de gestão de pontes.....  | 36 |
| Figura 13 – Métodos de alargamentos de pontes de concreto .....   | 39 |
| Figura 14 – Seção transversal do alargamento de uma ponte com adição de novas<br>vigas e pilares de concreto armado sem necessidade de reforço nas<br>vigas antigas ..... | 40 |
| Figura 15 – Seção transversal do alargamento de uma ponte com a necessidade de<br>reforço das vigas antigas .....   | 40 |
| Figura 16 – Armaduras de reforço das vigas antigas de uma ponte alargada .....  | 41 |
| Figura 17 – Alargamento de uma ponte utilizando viga pré-moldada .....  | 42 |
| Figura 18 – Comportamento de seção composta com deslizamento na interface<br>entre concreto pré-moldado e moldado no local .....  | 42 |
| Figura 19 – Fluxograma das etapas da metodologia .....  | 50 |
| Figura 20 – Tela inicial do INFER 32®.....  | 54 |
| Figura 21 – Janela de configuração das variáveis .....  | 55 |
| Figura 22 – Modelos de transformação para aplicar na análise .....  | 55 |
| Figura 23 – Vista lateral do viaduto na Rodovia PR 323 em fase de execução do<br>alargamento .....  | 58 |
| Figura 24 – Vista frontal do viaduto na Rodovia PR 323 em fase de execução do<br>alargamento .....  | 58 |
| Figura 25 – Vista frontal da ponte original sobre o rio Tigre .....   | 59 |
| Figura 26 – Vista lateral da ponte original sobre o rio Tigre .....   | 59 |
| Figura 27 – Vista frontal da ponte original sobre o rio Fortaleza .....   | 60 |
| Figura 28 – Vista frontal da ponte sobre o rio Fortaleza durante a execução<br>de reforço e alargamento .....   | 60 |
| Figura 29 – Vista lateral da ponte sobre o banhado do rio Iguaçu durante a<br>execução do alargamento .....   | 61 |
| Figura 30 – Vista frontal da ponte sobre o banhado do rio Iguaçu após a<br>execução do alargamento .....  | 61 |
| Figura 31 – Vista frontal da ponte original sobre o rio Passa Dois .....  | 62 |
| Figura 32 – Vista lateral da ponte original sobre o rio Passa Dois .....  | 62 |
| Figura 33 – Vista frontal da ponte alargada sobre o rio Água Amarela I .....  | 63 |
| Figura 34 – Vista lateral da ponte alargada sobre o rio Água Amarela I .....  | 63 |
| Figura 35 – Vista frontal da ponte alargada sobre o rio Água Amarela II .....   | 64 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 36 – Vista lateral da ponte alargada sobre o rio Água Amarela II ..... | 64 |
| Figura 37 – Vista frontal da ponte alargada sobre o rio Vargem Grande .....   | 65 |
| Figura 38 – Vista lateral da ponte alargada sobre o rio Vargem Grande .....   | 65 |
| Figura 39 – Vista frontal da ponte alargada sobre o rio Maciel .....          | 66 |
| Figura 40 – Vista lateral da ponte alargada sobre o rio Maciel.....           | 66 |
| Figura 41 – Vista frontal da ponte original sobre o rio Espingarda .....      | 67 |
| Figura 42 – Vista inferior da ponte original sobre o rio Espingarda .....     | 67 |
| Figura 43 – Vista frontal da ponte original sobre o rio Macacos.....          | 68 |
| Figura 44 – Vista lateral da ponte original sobre o rio Macacos .....         | 68 |
| Figura 45 – Vista frontal da ponte original sobre o rio Lajeado .....         | 69 |
| Figura 46 – Vista lateral da ponte original sobre o rio Lajeado .....         | 69 |
| Figura 47 – Gráfico de dispersão dos elementos .....                          | 70 |
| Figura 48 – Gráfico de resíduos X valor estimado (modelo A) .....             | 73 |
| Figura 49 – Gráfico de resíduos X valor estimado (modelo B) .....             | 77 |
| Figura 50 – Gráfico de resíduos X valor estimado (modelo C).....              | 81 |
| Figura 51 – Gráfico de resíduos X valor estimado (modelo final).....          | 86 |
| Figura 52 – Gráfico de ajuste do modelo final .....                           | 87 |
| Figura 53 – Vista frontal da ponte original sobre o rio Carazinho.....        | 88 |
| Figura 54 – Vista lateral da ponte original sobre o rio Carazinho .....       | 88 |



## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1 – Elementos constituintes das seções transversais e longitudinais de uma ponte ..... | 23 |
| Quadro 2 – Descrição dos tipos de variáveis .....   | 45 |
| Quadro 3 – Descrição das variáveis quantitativas e qualitativas.....                          | 46 |
| Quadro 4 – Resumo das variáveis utilizadas no estudo.....                                     | 52 |

## LISTA DE SIGLAS

|              |   |
|--------------|---|
| ABNT         | Associação Brasileira de Normas Técnicas  |
| DNIT         | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes  |
| <i>FIB</i>   | <i>Fédération Internationale Du Béton</i>   |
| IBGE         | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística   |
| NBR          | Norma Brasileira Registrada   |
| OAE          | Obras de Artes Especiais  |
| PROARTE      | Programa de Reabilitação de Obras de Arte Especiais   |
| <i>RILEM</i> | <i>Reunion International des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur lês Materiaux et les Construction</i> |
| SICRO        | Sistema de Custos Rodoviários   |
| SINAPI       | Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil  |
| TCU          | Tribunal de Contas da União   |
| UPESP        | Unidade de Programas Especiais  |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 01 – Valores estatísticos correspondentes ao modelo A.....    | 71 |
| Tabela 02 – Distribuição dos resíduos normalizados do modelo A ..... | 71 |
| Tabela 03 – Significância dos Regressores do modelo A .....          | 72 |
| Tabela 04 – Correlações parciais do modelo A.....                    | 74 |
| Tabela 05 – Teste t das correlações parciais do modelo A.....        | 74 |
| Tabela 06 – Valores estatísticos correspondentes ao modelo B.....    | 75 |
| Tabela 07 – Distribuição dos resíduos normalizados do modelo B ..... | 75 |
| Tabela 08 – Significância dos Regressores do modelo B .....          | 76 |
| Tabela 09 – Correlações parciais do modelo B.....                    | 78 |
| Tabela 10 – Teste t das correlações parciais do modelo B.....        | 78 |
| Tabela 11 – Valores estatísticos correspondentes ao modelo C.....    | 79 |
| Tabela 12 – Distribuição dos resíduos normalizados do modelo C.....  | 79 |
| Tabela 13 – Significância dos Regressores do modelo C .....          | 80 |
| Tabela 14 – Correlações parciais do modelo C.....                    | 82 |
| Tabela 15 – Teste t das correlações parciais do modelo C.....        | 82 |
| Tabela 16 – Comparação dos valores obtidos nos modelos A, B e C..... | 83 |
| Tabela 17 – Resultados da estatística .....                          | 85 |
| Tabela 18 – Significância dos regressores (modelo final) .....       | 85 |
| Tabela 19 – Correlações parciais do modelo final.....                | 85 |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>13</b> |
| 1.1 OBJETIVOS .....   | 15        |
| 1.1.1 Objetivo Geral .....  | 15        |
| 1.1.2 Objetivos Específicos .....   | 15        |
| 1.2 JUSTIFICATIVA .....   | 15        |
| 1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA .....  | 16        |
| 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....   | 17        |
| <b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....  | <b>18</b> |
| 2.1 PONTES.....   | 18        |
| 2.1.1 Panorama Brasileiro: Intervenções em Pontes Rodoviárias.....                                | 18        |
| 2.1.2 Definições.....   | 20        |
| 2.1.3 Principais Elementos Constituintes das Pontes .....   | 20        |
| 2.1.4 Sistemas Estruturais de Pontes Rodoviárias Mais Frequentes no Brasil .....                  | 23        |
| 2.1.5 Evolução do Gabarito Transversal e dos Carregamentos das Pontes Rodoviárias.....            | 25        |
| 2.2 REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO.....   | 26        |
| 2.2.1 Classificação dos Fatores que Causam a Deterioração das Pontes de Concreto .....            | 28        |
| 2.2.1.1 Fatores Internos .....  | 29        |
| 2.2.1.2 Fatores de cargas de tráfego .....  | 29        |
| 2.2.1.3 Fatores ambientais.....   | 29        |
| 2.2.1.4 Fatores de manutenção.....  | 30        |
| 2.3 CONSERVAÇÃO, INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO DE PONTES.....   | 30        |
| 2.3.1 Vida Útil e Durabilidade.....   | 30        |
| 2.3.2 Inspeção.....   | 31        |
| 2.3.2.1 Inspeção especial.....  | 32        |
| 2.3.3 Manutenção.....   | 32        |
| 2.4 ORÇAMENTAÇÃO DE OAEs COM ÊNFASE EM RECUPERAÇÃO .....  | 34        |
| 2.5 SISTEMA DE GESTÃO DE PONTES .....   | 36        |
| 2.6 ALARGAMENTO E REFORÇO DE PONTES RODOVIÁRIAS .....   | 37        |
| 2.6.1 Métodos Convencionais de Alargamento de Pontes.....   | 38        |
| 2.6.1.1 Alargamento com concreto armado convencional moldado <i>in loco</i> .....                 | 39        |
| 2.6.1.2 Alargamento com vigas pré-moldadas .....  | 41        |
| 2.7 INFERÊNCIA ESTATÍSTICA.....   | 42        |
| 2.7.1 Regressão Linear Múltipla.....  | 44        |
| 2.7.1.1 Considerações a respeito da regressão linear múltipla .....                               | 46        |
| <b>3 METODOLOGIA</b> .....  | <b>50</b> |
| 3.1 TIPOLOGIA DAS PONTES DE REFERÊNCIA .....  | 50        |
| 3.2 SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS QUE SERÃO CONSIDERADAS PARA REGRESSÃO.....                              | 51        |
| 3.2.1 Considerações a Respeito das Variáveis que Necessitam de Levantamento em Base de Dados..... | 53        |
| 3.3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO .....  | 53        |
| 3.3.1 Inserção e Processamento da Amostra no INFER 32® .....                                      | 54        |
| 3.4 COMPARAÇÃO DA VARIÁVEL RESULTADO COM UMA OAE CONTIDA FORA DA AMOSTRA.....                     | 56        |
| <b>4 ESTUDO DE CASO</b> .....   | <b>57</b> |
| 4.1 DESCRIÇÕES DAS OBRAS DE ARTES ESPECIAIS QUE COMPÕE A AMOSTRA.....                             | 57        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.1.1 Viaduto Sobre Ferrovia: Rodovia PR-323 .....                                  | 57        |
| 4.1.2 Ponte Sobre o Rio Tigre .....   | 58        |
| 4.1.3 Ponte Sobre o Rio Fortaleza .....   | 59        |
| 4.1.4 Ponte Sobre o Banhado do Rio Iguaçu .....                                     | 60        |
| 4.1.5 Ponte Sobre o Rio Passa Dois .....  | 61        |
| 4.1.6 Ponte Sobre o Rio Água Amarela I .....  | 62        |
| 4.1.7 Ponte Sobre o Rio Água Amarela II .....                                       | 63        |
| 4.1.8 Ponte Sobre o Rio Vargem Grande.....  | 64        |
| 4.1.9 Ponte Sobre o Rio Maciel.....   | 65        |
| 4.1.10 Ponte Sobre o Rio Espingarda .....   | 66        |
| 4.1.11 Ponte Sobre o Rio Macacos.....   | 67        |
| 4.1.12 Ponte Sobre o Rio Lajeado .....  | 68        |
| 4.2 MODELAGEM DE DADOS: VERIFICAÇÃO DOS PRESSUPOSTOS DE<br>REGRESSÃO.....           | 69        |
| 4.3 DISCUSSÃO E RESULTADOS.....   | 83        |
| 4.3.1 Modelo final .....  | 84        |
| 4.3.2 Comparação da Variável Resultado com uma OAE Contida Fora<br>da Amostra ..... | 87        |
| <b>5. CONCLUSÃO .....</b>   | <b>89</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>   | <b>91</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Em toda a sua existência a humanidade tem se preocupado com a construção de estruturas de acordo com as suas necessidades. As pontes surgiram devido à necessidade de superar obstáculos naturais e fronteiras existentes, beneficiando não apenas a comunidade, como também contribuindo para a evolução das civilizações.

Foi no século XIX, quando surgiu o cimento Portland, que se iniciou a era das construções em concreto (SANTOS, 2008). O concreto, devido a sua grande resistência à compressão, é um material amplamente aplicado na construção de pontes. Sua limitada resistência à tração provoca a necessidade do uso das armaduras de aço nas zonas tracionadas. Desta maneira, o concreto armado tornou-se um dos mais importantes materiais utilizados na engenharia (DNIT, 2004).

Ao longo do tempo as pontes em concreto armado sofrem constante deterioração provocada por agentes agressivos, alterações em seu regime de utilização ou pelos próprios erros de execução e projeto. A ação desses mecanismos, aliado ao envelhecimento natural, além de afetar a durabilidade da estrutura, diminui a sua vida útil. Sendo assim, cada vez mais se torna necessário intervir nas pontes de concreto para restaurar suas condições de segurança e reestabelecer a sua funcionalidade (DNIT, 2004).

A malha rodoviária federal no Brasil, implantada a partir de 1940, engloba pontes com diversas geometrias transversais, calculadas para resistir a diversos carregamentos e dimensionadas de acordo com os critérios vigentes na época em que foram projetadas, muitos dos quais não mais aceitos. Estas pontes correm o risco de se tornarem funcionalmente obsoletas e estruturalmente deficientes, caso não se adequem as novas dimensões transversais e as atuais cargas adotadas, alargando seus tabuleiros e reforçando sua estrutura. Dessa maneira, desde a implantação até a data atual, algumas obras foram substituídas, porém muitas obras foram restauradas e, principalmente, reforçadas e alargadas (VITÓRIO, 2013; DNIT, 2004).

Para Giovannetti (2014), diversas pontes rodoviárias brasileiras encontram-se desgastadas, degradadas e envelhecidas, chegando ao limite de sua vida útil. De acordo com dados divulgados pelo Tribunal de Contas da União (TCU), cerca de

75% das 5600 pontes cadastradas nas rodovias brasileiras pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), que não estão sob regime de concessão, estão em precário estado de conservação necessitando de intervenções para se adequarem às condições de uso. Considerando-se que os recursos materiais e financeiros são limitados, ressalta-se a importância da conservação e manutenção das Obras de Artes Especiais (OAEs) existentes.

Evidentemente, para reverter essa situação, são necessárias políticas e estratégias governamentais voltadas para a reabilitação e a conservação destas OAEs (VITÓRIO, 2008). Sendo assim, em 2011, o governo federal - por meio do DNIT - desenvolveu um programa de conservação e reabilitação das OAEs. Trata-se do Programa de Reabilitação de Obras de Arte Especiais (Proarte). O programa tem como objetivo atender as necessidades de restauração, reforço e alargamento das obras da malha rodoviária federal, proporcionando aos usuários nível de segurança e conforto adequado (DNIT, 2011).

Atualmente, o grande desafio é reabilitar essas estruturas de concreto danificadas respeitando as restrições econômicas atuais. Logo, o custo de aplicação influencia diretamente na técnica que deverá ser aplicada para alargar e reforçar a OAE.

O método utilizado neste trabalho, a inferência estatística, é amplamente aplicado na engenharia de avaliações de imóveis, o qual consiste em estimar o valor do bem através de suas características físicas e do seu entorno. No caso do modelo proposto, estima-se o custo de reforço e alargamento de pontes de pequenos vãos com base nas características da ponte que será avaliada.

É neste contexto, portanto, que este trabalho de conclusão de curso pretende contribuir. Com o desenvolvimento deste procedimento para geração de modelos matemáticos espera-se analisar a viabilidade econômico-financeira de aplicação das possíveis técnicas de reforço e alargamento da ponte, a ser utilizado pelos órgãos responsáveis na fase de planejamento e organização dos investimentos. Conseqüentemente, servirá como alternativa a orçamentação do custo final da operação após a contratação do projeto.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver, por meio de inferência estatística, um procedimento para geração de modelos numéricos que possam ser extrapolados, para estimar os custos de reforço e alargamento de pontes em concreto armado e protendido de pequenos vãos.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos para a realização deste trabalho de conclusão de curso são:

- Selecionar projetos referenciais de pontes de pequenos vãos, que sofreram reforço e alargamento, com diferentes características construtivas entre si;
- Quantificar os custos de execução do reforço e alargamento dos projetos referenciais;
- Determinar as variáveis do modelo de análise de custos;
- Analisar os pressupostos das equações de regressão formuladas no INFER 32®;
- Demonstrar o procedimento de validação do modelo numérico por meio de um teste de validação.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo a NBR 6118:2014 Projeto de Estruturas de Concreto, a estrutura deve ser projetada e construída para que permaneça sem exigir medidas extras de manutenção e reparo, para um período mínimo de 50 anos. Sendo assim, apesar de possuírem elevada vida útil, muitas pontes rodoviárias de concreto armado estão atingindo seu período de vida inicialmente previsto de acordo com a estimativa acima.



A falta de manutenção aliada à crescente demanda do tráfego, ao alargamento das rodovias existentes e ao aumento das cargas, pode tornar a estrutura incapaz de resistir às solicitações exigidas. De maneira geral, há diversas alternativas igualmente válidas, eficazes e viáveis dentre as soluções de reforço e alargamento das obras de artes especiais. Visando a opção que melhor se ajusta à cada circunstância, podem-se considerar alguns fatores para auxiliar a tomada de decisões, dentre os quais: fatores técnicos, operacionais, ambientais e econômicos (TEJEDOR, 2013).

Nos casos de alargamento e reforço de pontes, os aspectos de ordem econômica e construtiva necessitam ser analisados, pois um bom projeto deve possuir uma boa concepção construtiva e, ainda, ser economicamente viável. Em casos rotineiros, onde diversas alternativas técnicas podem ser aplicadas, o custo econômico das intervenções de reabilitação - considerando-se as limitações econômicas atuais - pode ser decisivo na escolha da melhor solução estrutural para o problema (VITÓRIO, 2008).

Este trabalho de conclusão de curso dedica-se ao desenvolvimento de um modelo matemático, por meio da inferência estatística, para estimar o custo de reforço e alargamento de pontes de pequenos vãos. Pretende-se com este modelo facilitar a análise, através do custo, da viabilidade de aplicação das possíveis soluções de reforço e alargamento da ponte, servindo como alternativa a orçamentação feita após a elaboração do projeto da respectiva intervenção. E desta maneira, auxiliar os órgãos públicos ou executores nas fases de planejamento e controle, propondo uma solução mais rápida para uma gestão mais eficiente.

### 1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Embora o país possua um montante significativo de obras de arte especiais de rodovias federais com diferentes características e tipologias, que sofreram ou necessitam de reforço e alargamento, este estudo está focado em obras de pequenos vãos, variando entre 13 metros e 35 metros, utilizando amostras de projetos apenas do estado do Paraná.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Inicialmente, no capítulo 01, é realizada uma introdução ao assunto abordado neste trabalho de conclusão de curso, bem como, sua principal justificativa, demonstrando a relevância técnica e econômica do tema. Ainda, são apresentados os objetivos e as limitações para a realização do mesmo.

Para o entendimento e clareza do trabalho, o referencial teórico está contido no capítulo 02. Nele estão expostos alguns conceitos e definições referentes às obras de arte especiais; panorama brasileiro de intervenções em pontes rodoviárias; reabilitação estrutural; conservação, inspeção e manutenção; sistema de gestão de pontes; métodos de alargamentos e reforço; e uma breve revisão sobre inferência estatística, método pelo qual o trabalho foi elaborado.

O capítulo 03 refere-se à metodologia desenvolvida, contemplando a tipologia das pontes de referência, seleção das variáveis do modelo de regressão linear múltipla, assim como a apresentação do programa INFER 32®, o qual será empregado para realizar a análise estatística. Ainda, apresenta-se um roteiro de inserção dos dados no programa. Por fim, apresenta-se o procedimento para o teste de validação da equação obtida, comparando a variável resultado com uma OAE contida fora da amostra.

O capítulo 04 destina-se a apresentar um exemplo de aplicação da metodologia desenvolvida através de um estudo de caso. Nele apresentam-se as análises realizadas nos modelos bem como os resultados finais. Além disso, é feita a comparação da variável resultado aplicando-se a equação escolhida a um exemplo contido fora da amostra, para demonstrar como deve ser feito o teste de validação da equação.

Por fim, no capítulo 05 são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será feita uma contextualização sobre o panorama brasileiro de intervenções em pontes rodoviárias, bem como, serão apresentados alguns conceitos gerais e definições comumente utilizadas para pontes e viadutos, de forma a permitir um breve conhecimento sobre essas estruturas. Também serão abordados conceitos sobre a reabilitação estrutural, expondo suas principais soluções e, então, alguns tópicos referentes à conservação, inspeção e manutenção de pontes, todos para facilitar a compreensão sobre o tema. Em seguida, será feita uma explanação a respeito dos métodos convencionais de reforço e alargamento de pontes, importantes técnicas que fundamentam este trabalho. Por fim, será feita uma breve revisão a respeito da inferência estatística, método pelo qual este trabalho será desenvolvido.

### 2.1 PONTES

#### 2.1.1 Panorama Brasileiro: Intervenções em Pontes Rodoviárias

Segundo Serafim (2009), os planos do Governo Federal brasileiro para reabilitação e expansão da malha viária nacional estão em destaque nos programas políticos que visam o desenvolvimento do país.

Para Oliveira e Calixto (2014), devido ao último período de crescimento econômico nacional, na década de 2000, diversas pontes rodoviárias federais foram e estão sendo reforçadas, recuperadas e reabilitadas.

Em 2011, a Unidade de Programas Especiais (UPEsp), do DNIT, desenvolveu um programa denominado Programa de Reabilitação de Obras de Arte Especiais (Proarte), previsto para ocorrer do ano de 2011 à 2018, que tem como objetivo atender de imediato as necessidades de restauração, reforço estrutural e alargamento das obras de artes especiais da malha rodoviária federal.

O Proarte foi dividido em duas fases, a primeira consiste na restauração de pontes e viadutos em estado crítico ou problemático, que demandam atenção imediata, sendo selecionadas para esta etapa 500 obras. Na Figura 1, pode-se observar a porcentagem correspondente destas 500 obras em relação ao

comprimento, largura e necessidade de intervenção. Já a segunda fase engloba 4.500 obras de artes especiais completando, aproximadamente, o total de estruturas em rodovias federais (DNIT, 2011).

A primeira fase do programa teve um investimento estimado em 1 bilhão de reais, enquanto que, para a segunda fase, a estimativa é de gastos da ordem de R\$ 4,8 bilhões, totalizando 5,8 bilhões de reais provenientes do Orçamento Geral da União. Para a seleção das obras da primeira etapa, cada superintendência regional do DNIT, com o apoio de empresas supervisoras, realizou um levantamento das pontes em seu estado, cuja sistemática do programa consistiu em classificar a OAE em: 1 – crítica; 2 – Problemática; 3 – Observação; 4 – Longo Prazo; 5 – Boa. Foram selecionadas as pontes em estado crítico e problemático. Durante essa avaliação foram constatadas OAEs com risco de ruptura da estrutura, caracterizando-as como obras emergenciais não previstas no programa. Após esse processo foram elaborados projetos e orçamentos referenciais com base no Sistema de Custos Rodoviários (Sicro 2) (DNIT, 2011).

|   |                        |
|---|------------------------|
| MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES<br>Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes<br>UPÉsp – Unidade de Programas Especiais   |                        |
| <b>1ª FASE DO PROGRAMA</b>  |                        |
| <b>OAE's: PONTES, VIADUTOS E PONTILHÕES:</b>  |                        |
| Número Total:   | 500 OAE's              |
| Extensão:   | 36.101 m               |
| Área:   | 468.663 m <sup>2</sup> |
| <b>COMPRIMENTO:</b>   |                        |
| Até 60 m  | 65% 327 OAE's          |
| De 60 m a 120 m   | 21% 103 OAE's          |
| Maior que 120 m   | 14% 70 OAE's           |
| <b>LARGURA:</b>   |                        |
| Até 8,30 m  | 15% 73 OAE's           |
| De 8.30 m a 13 m  | 79% 394 OAE's          |
| Maior que 13 m  | 6% 33 OAE's            |
| <b>NECESSIDADES DE INTERVENÇÃO:</b>   |                        |
| Recuperação e Reforço:  | 15% 74 OAE's           |
| Recuperação, Reforço e Alargamento:   | 85% 426 OAE's          |

Figura 01 – 1ª Fase do programa Proarte  
 Fonte: DNIT (2011).

A finalidade do Proarte é proporcionar aos usuários da malha rodoviária federal o nível de conforto e segurança adequados. De acordo com o programa, as

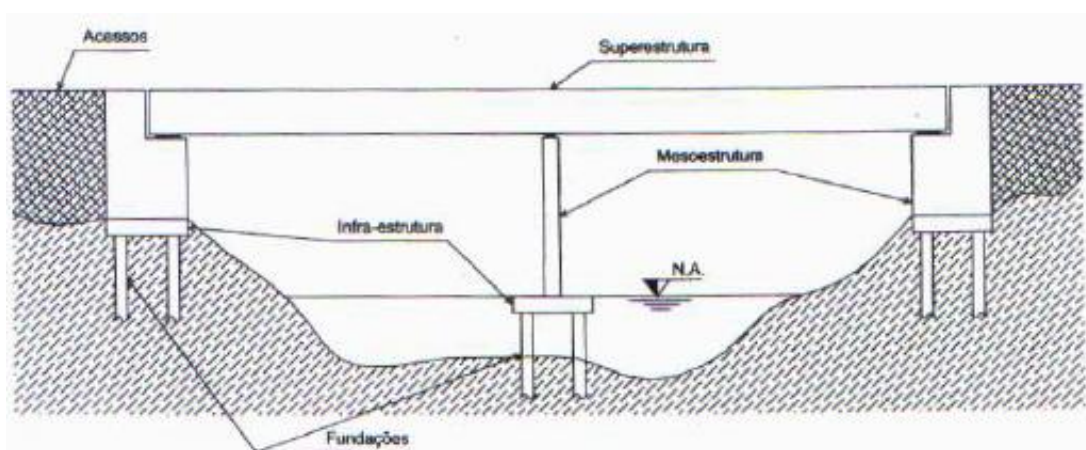
pontes e viadutos selecionados para compor a primeira fase estão em condições precárias, o que exigiria ações emergenciais para garantir sua recuperação. (TCU, 2014; DNIT, 2011).

### 2.1.2 Definições

Pfeil (1983) define como ponte a construção que possui a finalidade de estabelecer a continuidade de uma via sobre um obstáculo. Quando as obstruções a serem vencidas são elementos como cursos d'água ou braços de mar, denomina-se ponte e, quando são vales ou outras vias, denomina-se viaduto. Apesar disso, o tratamento estrutural de ambos é praticamente idêntico, variando-se apenas a distância a ser vencida. Ainda, segundo a norma DNIT 010/2004 – PRO, incluem-se nesta definição passagens inferiores e superiores. As pontes também são conhecidas como Obras de Artes Especiais (OAE).

### 2.1.3 Principais Elementos Constituintes das Pontes

Considerando os aspectos estruturais as pontes são constituídas por quatro partes essenciais: estrado, superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura, conforme Figura 2.



**Figura 02 – Vista geral de uma ponte, exibindo os principais elementos constituintes**  
Fonte: MASON *apud* CURCIO (2008).

De acordo com as definições do Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias do (DNIT, 2004), o estrado é o elemento da ponte onde a carga móvel atua

diretamente e sua função estrutural é transmitir as cargas aos outros elementos da ponte. Normalmente é composto por lajes e um sistema secundário. As pontes que possuem laje em concreto armado, o estrado e a superestrutura tornam-se um único elemento que transfere a carga diretamente aos apoios.

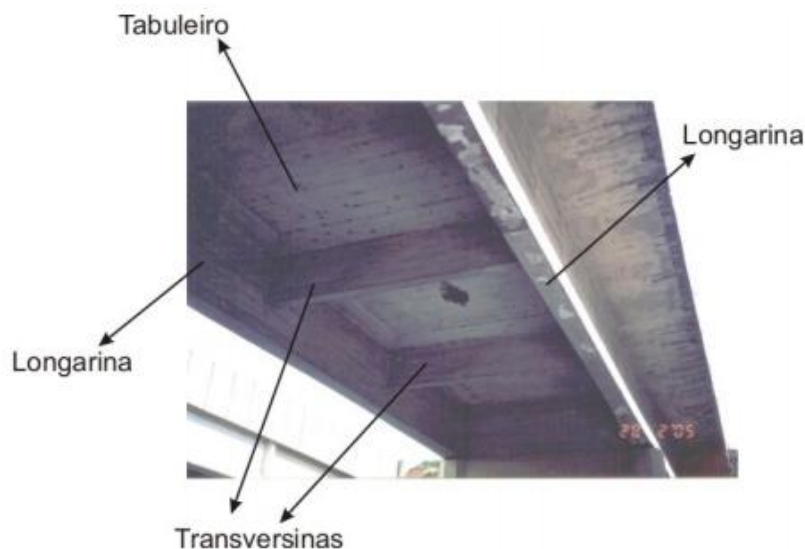
A superestrutura é o elemento que suporta o estrado e as cargas nele aplicadas, sua função é transmitir essas cargas ao longo dos vãos, para os apoios. Segundo Pfeil (1983), a mesma é constituída pelo vigamento principal cuja função é vencer o vão livre; pelo estrado, o qual recebe diretamente as cargas; e, por fim, pelos elementos de contraventamento e apoios.

A seguir são apresentadas as definições de alguns elementos estruturais constituintes da superestrutura, de acordo com os conceitos expostos por Pfeil (1983) e DNIT (2004):

- Laje do tabuleiro: elemento de suporte ou laje estrutural usada como pista de rolamento, no caso das pontes de pequenos vãos pode constituir o vigamento principal;
- Vigamento do tabuleiro: Tem a função de suportar as solicitações atuantes no estrado transferindo-as para o vigamento principal. Nas pontes de concreto, é representado pelas longarinas (vigas paralelas ao eixo longitudinal da ponte) e transversinas (vigas transversais ao eixo longitudinal da ponte), as quais são indicadas na Figura 3;
- Elementos de contraventamento: São os vigamentos responsáveis por absorver os esforços horizontais aplicados na estrutura. Sua função é impedir a flambagem das peças comprimidas, além da flambagem lateral, para o caso das transversinas;
- Aparelhos de apoio: São peças de transição entre os vigamentos principais e os pilares ou encontros. Sua função é transmitir as reações de apoio, além de permitir os movimentos previstos em projeto, como rotação e translação.

A mesoestrutura é constituída por pilares e encontros os quais recebem os esforços provenientes da superestrutura, como peso próprio, cargas acidentais de veículos e pedestres, juntamente com outras solicitações como vento, ações horizontais devido a variações de temperatura, empuxos de terreno, pressão da

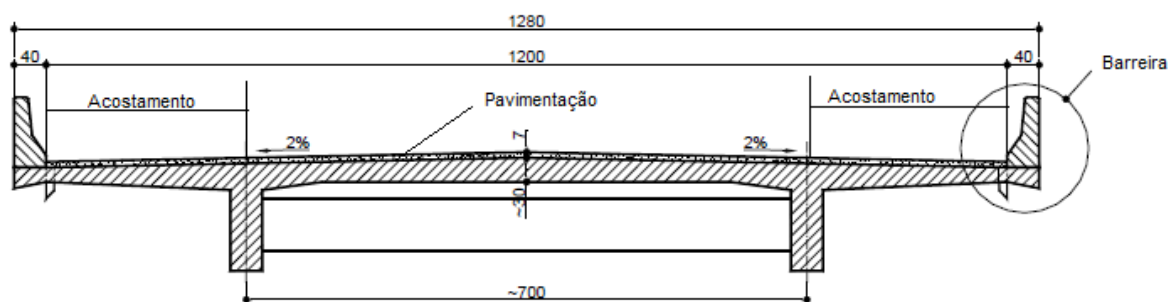
água, os quais agem diretamente na estrutura. A mesoestrutura transmite os esforços para a infraestrutura (MÜLLER, 2004).



**Figura 03 – Vigamento (indicação longarinas e transversinas) do tabuleiro de uma OAE**  
 Fonte: LENCIONI (2005).

A infraestrutura é responsável por transferir as cargas da estrutura para o solo. Compreende os elementos de fundações (blocos, estacas, tubulões, sapatas) e as obras de apoio.

Além dos elementos estruturais supracitados, também constituem as pontes os elementos utilitários e geométricos. Nas Figuras 4 e 5 observa-se, respectivamente, a seção transversal e longitudinal com tais elementos indicados, ambos correlacionados com as definições do Quadro 1.



**Figura 04 – Elementos utilitários constituintes de uma seção transversal de ponte**  
 Fonte: Adaptado de Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias – DNIT (2004).

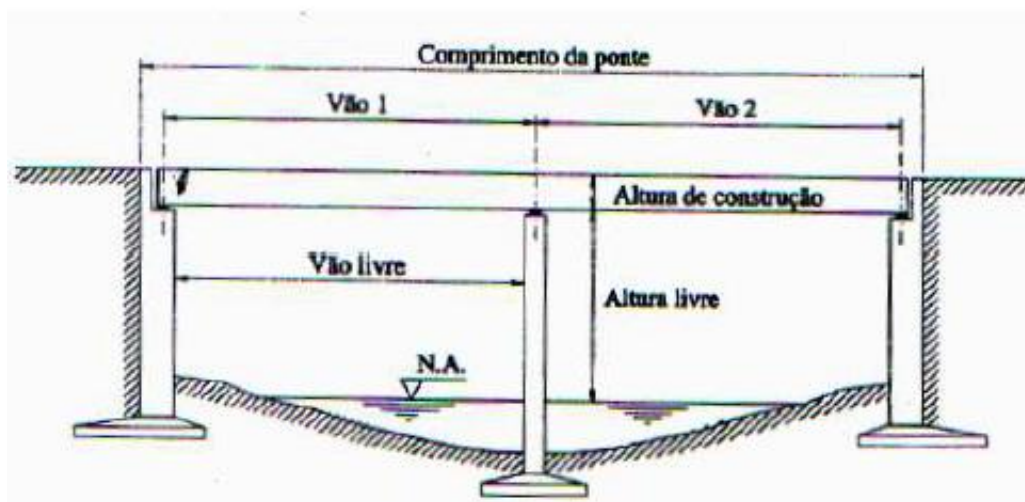


Figura 05 – Elementos constituintes de uma seção longitudinal de ponte  
Fonte: EL DEBS e TAKEYA (2003).

| Elemento ou dimensão | Descrição   |
|----------------------|---|
| Pista de rolamento   | Largura disponível para o tráfego normal dos veículos, subdivide-se em faixas.                    |
| Acostamento          | Largura adicional à pista de rolamento, destinada à uso em casos de emergência.                   |
| Defensa              | Elemento de proteção dos veículos, colocado ao lado do acostamento.                               |
| Passeio              | Largura adicional destinada ao tráfego de pedestres.  |
| Guarda roda          | Elemento destinado a impedir a invasão dos passeios pelos veículos.                               |
| Guarda corpo         | Elemento de proteção aos pedestres.   |
| Comprimento da ponte | Distância, medida horizontalmente segundo o eixo longitudinal, entre as seções extremas da ponte. |
| Vão teórico          | Distância entre os eixos de dois suportes consecutivos.   |
| Vão livre            | Distância entre as faces de dois suportes consecutivos.   |
| Altura de construção | Distância entre o ponto mais baixo e o ponto mais alto da superestrutura.                         |
| Altura livre         | Distância entre o ponto mais baixo da superestrutura e o ponto mais alto do obstáculo.            |

Quadro 1 – Elementos constituintes das seções transversais e longitudinais de uma ponte  
Fonte: Adaptado de EL DEBS e TAKEYA (2003); PFEIL (1983).

#### 2.1.4 Sistemas Estruturais de Pontes Rodoviárias Mais Frequentes no Brasil

Conforme informações do DNIT (2004), o sistema estrutural mais utilizado nas pontes rodoviárias brasileiras, totalizando cerca de 94% do total, é o tabuleiro em vigas de concreto armado ou protendido. Além disso, é muito comum tabuleiros



em lajes maciças de concreto armado, muito utilizados em pequenas pontes cujo vão máximo é de 15 metros. Outro tipo utilizado é o tabuleiro celular, aplicado em viadutos curvos, em estrutura contínua e em grandes vãos. A Figura 6 indica os principais sistemas estruturais dos tabuleiros de pontes atualmente existentes nas rodovias brasileiras.

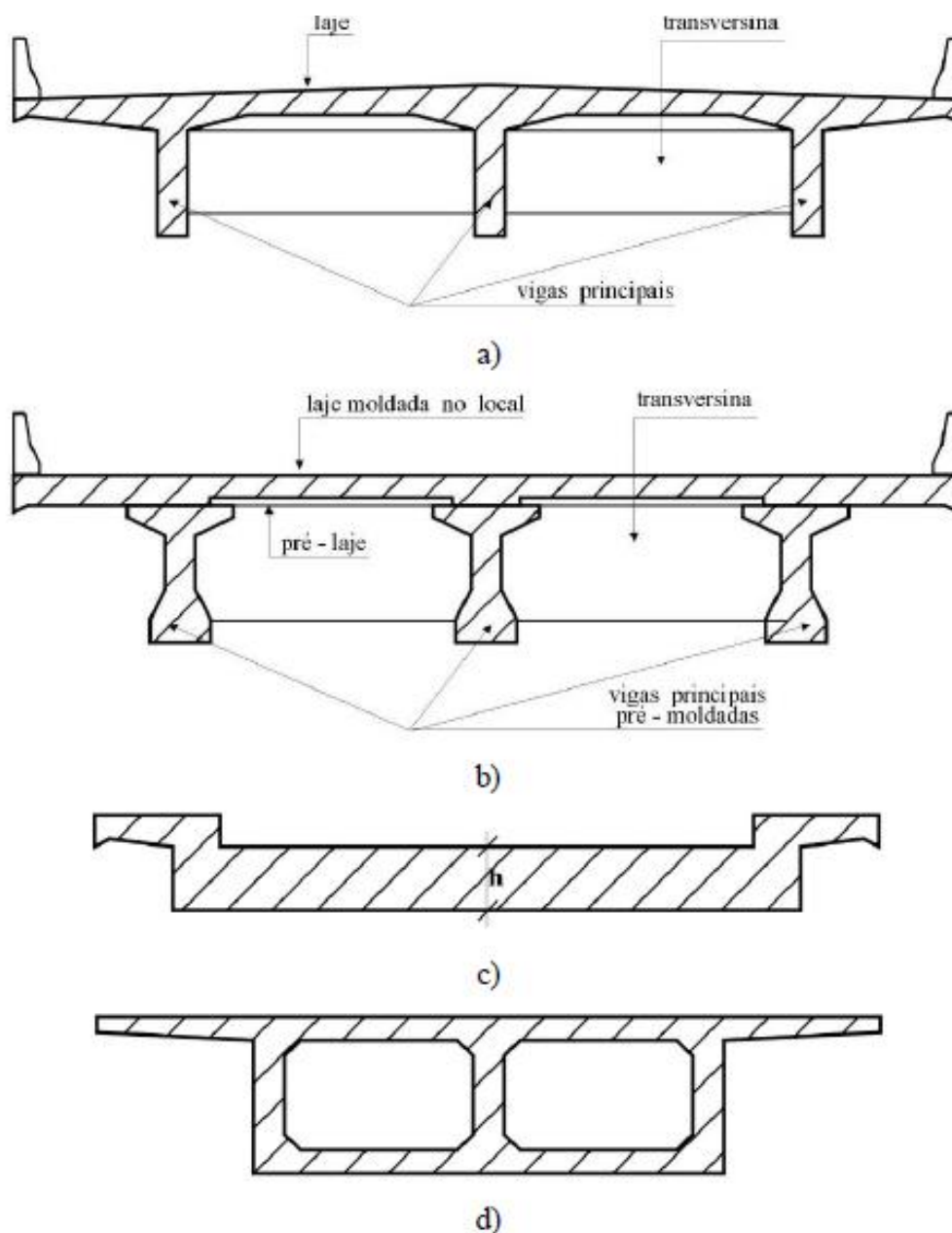


Figura 06 – Sistemas estruturais mais frequentes: a) Vigas e lajes de concreto moldadas no local; b) Vigas pré-moldadas; c) Laje Maciça; d) Tabuleiro celular.  
 Fonte: Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias – DNIT (2004).

### 2.1.5 Evolução do Gabarito Transversal e dos Carregamentos das Pontes Rodoviárias

Considerando-se que grande parte das pontes rodoviárias brasileiras foram implantadas a partir de 1940 - quando foram feitas as primeiras normas de cálculo estrutural e surgiram órgãos responsáveis pela construção das estradas federais e estaduais, como o DNER (Departamento Nacional de Estradas e Rodagem) - tornou-se necessário atualizar, de acordo com a exigência atual, os padrões de geometria e de carregamentos das mesmas (VITÓRIO, 2013).

Deste modo, os processos de alargamento e reforço somente começaram a se destacar na década de 90, quando foram iniciadas obras de duplicação e alargamento de rodovias federais e estaduais. Contudo, foram nos últimos anos que se notou a elevada quantidade de obras de adaptação das pontes antigas aos novos gabaritos exigidos.

Segundo Vitório (2013), desde 1940 as pontes estão sofrendo alterações em seu gabarito transversal. No início, o gabarito era de 8,30m e sem os acostamentos da estrada, e, atualmente os mesmos são projetados com, no mínimo, 12,80m de largura, incorporando os acostamentos e, conseqüentemente, tornando as obras mais seguras para os usuários. Outras características geométricas das pontes também mudaram como a substituição dos antigos guarda-rodas por barreiras de proteção do tipo New Jersey, bem como, a adoção de pingadeiras nos bordos inferiores das lajes e a diminuição da espessura da camada de pavimentação sobre o tabuleiro. Na Figura 7 está indicada a evolução das seções transversais entre os anos de 1940 e 2011, de acordo com o Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias (DNIT, 2004).

Em relação ao carregamento, o mesmo autor afirma que as obras de artes especiais estão submetidas a carregamentos superiores àqueles para os quais foram projetadas. Em 1950 as cargas móveis eram um compressor de 240 kN, enquanto que as que foram projetadas até 1981 o trem tipo máximo adotado era de 360 kN. Apenas com a NBR 7188:1984 – Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre, a partir de 1984, que se passou a adotar o trem tipo de 450 kN, ainda em vigor, de modo que grande parte das pontes das rodovias brasileiras estão com carga móvel defasada.

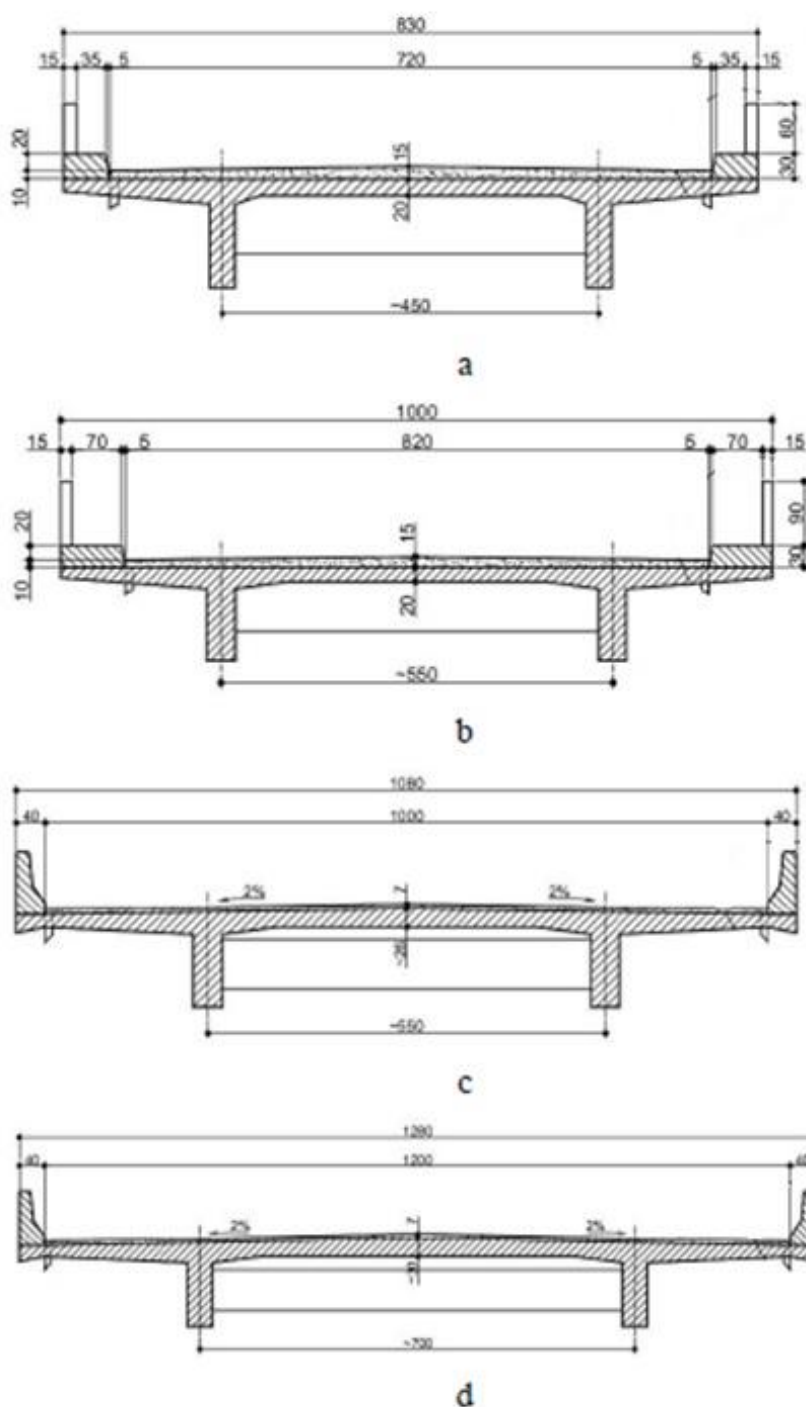


Figura 07 – Evolução do gabarito transversal das pontes rodoviárias de: a) De 1940 a 1960; b) De 1960 a 1975; c) De 1975 a 1985; d) Após 1985.

Fonte: Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias – DNIT (2004).

## 2.2 REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

Para a *Fédération Internationale Du Béton* (1999), além de ser um processo natural, é inevitável o envelhecimento e a degeneração das estruturas de concreto.

De acordo com Beber (2003), o concreto armado possui uma estrutura interna complexa e heterogênea, sujeita a alterações ao longo do tempo. Seus próprios constituintes interagem entre si e com agentes agressivos de diversas intensidades existentes no meio ambiente, provocando a deterioração estrutural. Logo, essa interação com o meio ambiente determinará o tempo em que a estrutura manterá suas características tanto de segurança, quanto de funcionalidade e estética para a qual foi projetada. Portanto, segundo o autor, o conhecimento das origens dos mecanismos de deterioração é imprescindível.

Ainda, para Saydam e Frangopol (2011), o tempo da capacidade da estrutura de sobreviver a um evento extremo antes de colapsar, resultante de catástrofes naturais ou ações isoladas, ou seja, resultante de uma carga dinâmica, é reduzido devido ao processo de deterioração já atuante.

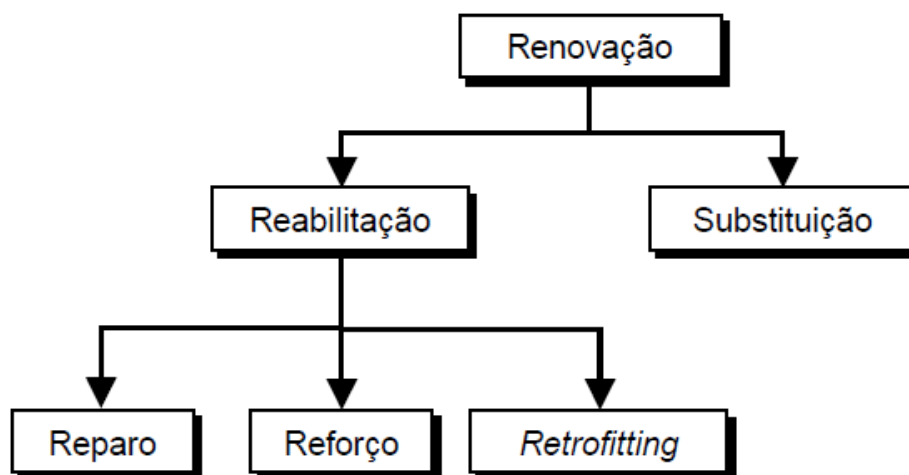
Sendo assim, denomina-se patologia o estudo das causas responsáveis pelo surgimento dos processos de deterioração do concreto. Os problemas patológicos são originários de falhas que ocorreram durante alguma das três etapas básicas do processo de construção da estrutura, sendo a concepção, execução/materiais e utilização. Para Sarturi (2014), alterações de conceitos de espaços e readequações de funcionalidade levam a mudanças significativas nos níveis de solicitações e carregamentos de uma ponte.

A estrutura de concreto é concebida para determinada finalidade, no entanto durante sua vida útil esta finalidade pode ser modificada ou estendida. Por isso a necessidade de intervenção para sua readequação, através de sua restauração parcial ou total, reestabelecendo suas condições mínimas de segurança e funcionalidade. Diante da necessidade de uma intervenção para renovar a estrutura duas soluções podem ser adotadas: reabilitação ou substituição, conforme ilustra a Figura 8 (BEBER, 2003).

Reabilitar é reestabelecer a funcionalidade de uma estrutura ao nível original ou mais alto, considerando tanto a sua durabilidade quanto a resistência. Já o reparo destina-se a simplesmente reduzir a taxa de deterioração, sem influenciar no nível atual de funcionalidade, corrigindo uma deficiência estrutural ou funcional.

Por outro lado, o reforço é caracterizado como uma intervenção específica para elevar o desempenho de uma estrutura, aumentando sua resistência e/ou rigidez (KARBHARI e ZHAO, 2000 *apud* BEBER, 2003). Por fim, o termo *retrofitting* define as intervenções de reabilitação que têm por objetivo conciliar renovação e

manutenção, mantendo as características originais da estrutura porém modernizando-a.



**Figura 08 – Tipos de estratégias de renovação**  
Fonte: BEBER (2003).

O número de obras de infraestrutura, principalmente obras de artes especiais, bem como seus tempos de vida continuam a crescer em todo o mundo, aumentando a demanda por reparos e reforços. A necessidade de manutenção cada vez mais torna-se inevitável, visto que a reabilitação de uma estrutura, na maioria dos casos, tende a ser a alternativa mais viável comparando a completa substituição da mesma, pois os recursos disponíveis são escassos e limitados (BEBER, 2003).

### 2.2.1 Classificação dos Fatores que Causam a Deterioração das Pontes de Concreto

O *RILEM* (*Reunion International des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Construction*) em 1991, classificou os fatores que causam dano nas pontes em quatro grupos fundamentais: fatores internos, de cargas de tráfego, ambientais e tempo, e manutenção.

### 2.2.1.1 Fatores Internos

Os fatores internos são ligados à própria estrutura e a etapa de concepção do projeto. Principalmente nas definições das especificações dos materiais a serem utilizados, como água, areia, brita e cimento, bem como suas características como resistência, durabilidade e permeabilidade, parâmetros geométricos e sistema estrutural (RADOMSKI, 2001 *apud* SAHUINCO, 2011).

### 2.2.1.2 Fatores de cargas de tráfego

O peso próprio e as ações do tráfego sobre as pontes são as ações mais importantes da estrutura, sendo que a carga de tráfego exerce forte influência no comportamento estrutural além de afetar diretamente a durabilidade das pontes. Muitas pontes construídas sofrem constantemente manifestações patológicas devido à ação de cargas dinâmicas, ressaltando-se a intensidade e a velocidade de tráfego, bem como, a concentração de carga de veículos, que diretamente causam danos como fissuras nos elementos constituintes das pontes, devido a evolução do fluxo de veículos e suas respectivas cargas (SANTOS, 2008).

### 2.2.1.3 Fatores ambientais

Sahuinco (2011) afirma que as pontes estão sujeitas a condições climáticas que afetam diretamente a sua estrutura e comprometem seu funcionamento. Tais fatores são gerados através da variação de temperatura, vento e chuva.

Segundo Lencioni (2005), na realização de uma avaliação sobre as possíveis causas de degradação da estrutura ou nas etapas de manutenção e recuperação, deve-se considerar o meio em que a estrutura encontra-se, pois isto interfere diretamente em sua degradação, como citado anteriormente.

Por isso a NBR 6118:2014 estabelece parâmetros de durabilidade da estrutura que devem ser considerados durante a elaboração do projeto. Além disso, a norma estabelece quatro classes de agressividade ambiental que também devem ser considerados no projeto da estrutura.

#### 2.2.1.4 Fatores de manutenção

A manutenção é responsável por manter preservada a função para qual a estrutura foi projetada, sendo que, no caso das pontes, está totalmente relacionada com a durabilidade das mesmas.

A falta de recursos financeiros dificulta a manutenção estrutural de uma ponte, sendo que a conservação destas torna-se inviável sem a mesma. A manutenção periódica é muito importante, pois, de acordo com o avanço do estágio de determinada degradação, há grande possibilidade do dano se tornar irreversível (LENCIONI, 2005).

### 2.3 CONSERVAÇÃO, INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO DE PONTES

A cada ano o número de estruturas em concreto armado cresce em todo o mundo. Uma estrutura, para se manter íntegra e propiciar conforto e segurança aos seus usuários, deve passar por inspeções e manutenções periódicas que permitam que seus problemas sejam identificados em sua fase inicial, para que sejam tomadas as devidas ações corretivas e mitigadoras (LENCIONI, 2005).

#### 2.3.1 Vida Útil e Durabilidade

Atualmente as normas de projeto estão cada vez mais rígidas em relação a durabilidade das estruturas de concreto. A NBR 6118:2014 estabelece que as estruturas de concreto devem ser projetadas visando-se sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço, nas condições ambientais a qual é estabelecida, durante sua vida útil. Nesse período, a estrutura deve manter suas características desde que sejam atendidos os requisitos de uso e manutenção determinados pelo engenheiro (TEJEDOR, 2013).

Segundo a autora, a durabilidade pode ser expressa em termos de vida útil, definida como o período de tempo pelo qual a estrutura mantém as características e funções para a qual foi projetada. Fatores como a agressividade do ambiente, características do concreto, parâmetros de cobrimento mínimo da armadura, envelhecimento e a própria deterioração da estrutura, interferem na durabilidade da estrutura.

Vitório (2008) analisou a situação atual, sob a ótica da segurança estrutural, de 40 OAEs em rodovias federais do nordeste brasileiro - as quais foram construídas entre as décadas de 50 e 70 - e concluiu que 32,50% delas têm mais de 50 anos; 22,50% mais de 45 anos; 40% mais de 40 anos e 5% mais de 35 anos, ou seja, grande parte dessas pontes está atingindo o limite de vida útil e foram prejudicadas pela falta de manutenção ao longo de décadas. Além disso, 47,5% das obras analisadas estão em condições que indicam a possibilidade de ocorrência de colapso, caso não sejam tomadas providências urgentes.

Para o autor, apesar de tratar de um estudo realizado em rodovias federais de quatro estados (PE, BA, CE e PI), presume-se que ocorram situações semelhantes em obras de rodovias de outros estados, bem como, da esfera estadual e municipal. Há certa ausência, na administração pública, de mecanismos que viabilizem a manutenção preventiva como prática rotineira para evitar, ou ao menos minimizar, os problemas decorrentes da degradação da estrutura, evitando assim o gasto desnecessário de recursos em reparos realizados tardiamente.

### 2.3.2 Inspeção

De acordo com o Manual de Recuperação de Pontes e Viadutos Rodoviários do DNIT define-se por inspeção como o processo que permite avaliar as condições físicas da estrutura e a extensão da deterioração, dos danos e dos desconfortos existentes. Para Müller (2004), os programas específicos de inspeção visam oferecer melhores condições e segurança às obras, pois ao se avaliar e classificar os problemas decorrentes nas pontes de concreto pode-se enfatizar os principais pontos a serem considerados nas intervenções futuras.

Para Lencioni (2005) é imprescindível o treinamento das pessoas envolvidas em qualquer tipo de inspeção a ser realizada em uma OAE. Além disso, o conhecimento prévio da estrutura a ser inspecionada é fundamental para conhecer suas características e, assim, para que seja possível a realização de uma inspeção criteriosa.

Dentre os tipos de inspeções citados pela norma DNIT 010/2004 – PRO – cadastral, rotineira, extraordinária, especial e intermediária – será abordada neste trabalho a Inspeção Especial, pois o enfoque do trabalho exige que as informações sejam extraídas das OAEs através desta.



### 2.3.2.1 Inspeção especial

É uma inspeção visual detalhada, acompanhada de ensaios de campo e laboratório, realizada em intervalos não superiores a cinco anos. A inspeção especial deve ser realizada quando a Inspeção Cadastral ou Rotineira revelar defeitos graves ou críticos na estrutura da obra; em pontes grandes e complexas, e em substituição às Inspeções Rotineiras; em ocasiões especiais, como antes e durante a passagem de cargas excepcionais. A inspeção pode se resumir na elaboração de relatórios para cadastro de anomalias existentes e na definição dos trabalhos de restauração necessários, como terapia e projetos de reparos, para fornecer condições ideais da estrutura da OAE (DNIT, 2004).

### 2.3.3 Manutenção

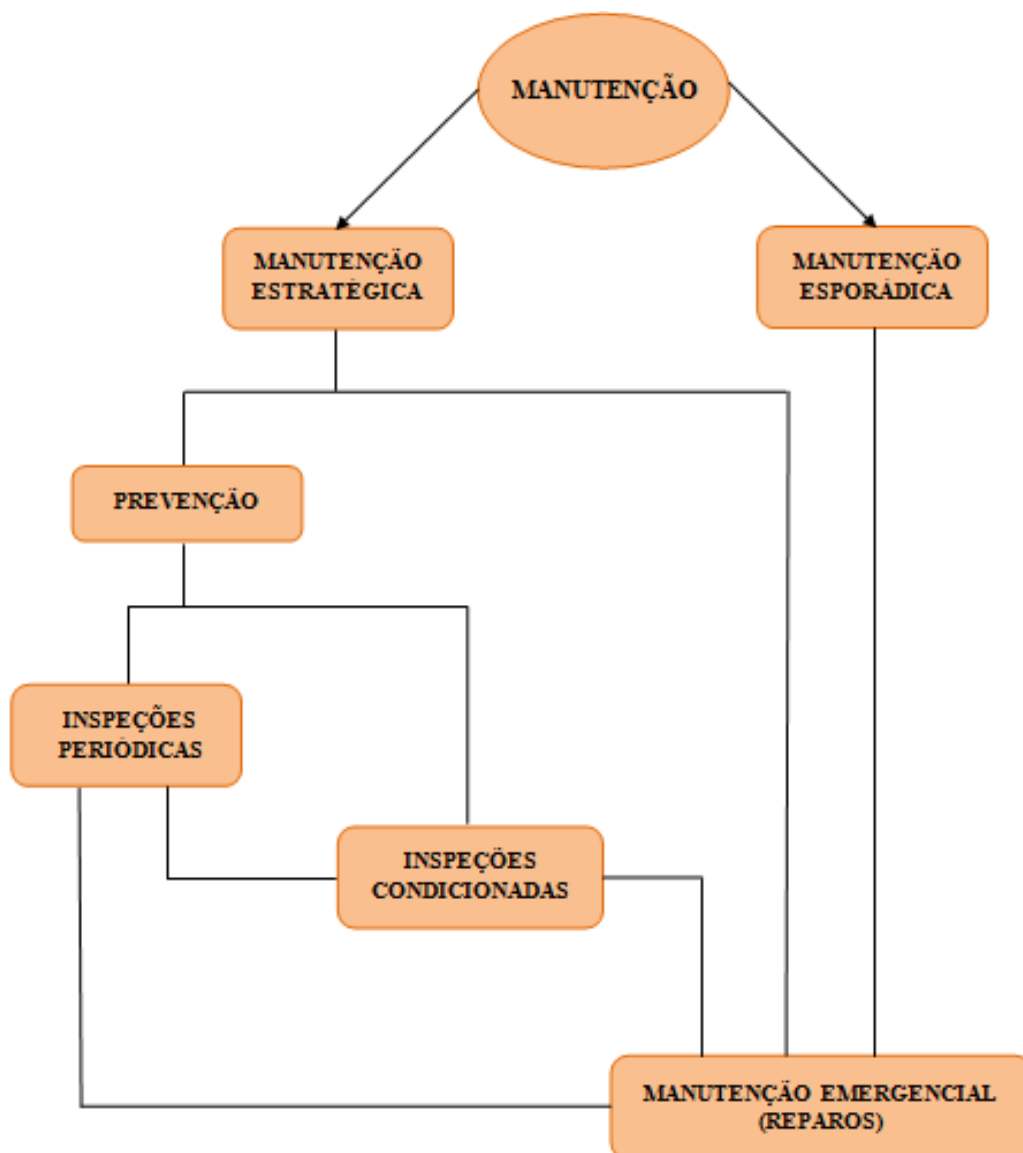
Segundo Santos Filho (2001), são partes integrantes das providências para se garantir que a estrutura atinja os limites de vida útil, uma inspeção regular e sistemática, além da implantação de um serviço rotineiro de manutenção. Ainda, para o autor, entende-se por manutenção como o termo usado para descrever as ações para manter a estrutura em condições de operação satisfatória de acordo com o previsto, já o reparo, é o termo utilizado se intervenções saneadoras não previstas são imprescindíveis na estrutura.

Para Pfeil (1983), a manutenção estrutural e a prevenção de patologias estão intimamente ligadas. O desgaste estrutural é contínuo por estar sujeito a agentes degradantes além da própria degradação natural devido a sua utilização. Conforme a Figura 9, há dois procedimentos que podem ser adotados para realizar a manutenção da estrutura quais sejam, a manutenção estratégica e a manutenção esporádica.

Na manutenção estratégica há um controle contínuo e planejado de inspeções rotineiras, limpezas e pequenos procedimentos de reparos para que se previna a ponte de um quadro patológico mais grave. Tais inspeções possuem como guia um cronograma definido, sendo que eventualmente podem ser realizadas inspeções mais específicas do que as de rotina (PFEIL, 1985).

Em relação à manutenção esporádica, há uma ausência de um programa de manutenção e prevenção patológica sendo que sua ocorrência normalmente se dá

devido a denúncias e reclamações dos usuários. As ações corretivas incidem sobre obras cujas anomalias imponham a necessidade de reparos importantes, como reforço dos componentes da ponte. São executadas conforme os relatórios obtidos nas inspeções da estrutura (PFEIL, 1983).



**Figura 09 – Formas de manutenção estrutural**  
 Fonte: Adaptado de SOUZA E RIPPER (1998).

Considerando-se as intervenções de recuperação dos problemas patológicos, Helene (1992) afirma que “as correções serão muito mais duráveis, mais efetivas, mais fáceis de executar e muito mais baratas quanto mais cedo forem executadas”. As manifestações são evolutivas e tendem a se agravar com o tempo, originando outros problemas decorrentes do inicial, ou seja, toda a providência

adotada na fase de projeto poderá significar uma apreciável economia de recursos no futuro (VITÓRIO, 2013).

Para comprovar tal afirmação há a chamada “Lei de Sitter”, que se aplicada à recuperação demonstra que os custos crescem segundo uma progressão geométrica de razão cinco, conforme Figura 10.

O Valor 1 do eixo custo relativo está associado a diretrizes determinadas ainda na fase de projeto para aprimorar o desempenho e a durabilidade da obra. Caso não sejam adotadas medidas de melhoria durante as fases de construção e manutenção preventiva, o custo final da correção do problema poderá chegar a 125, quando a obra atingir o estágio de manutenção corretiva (VITÓRIO, 2013).

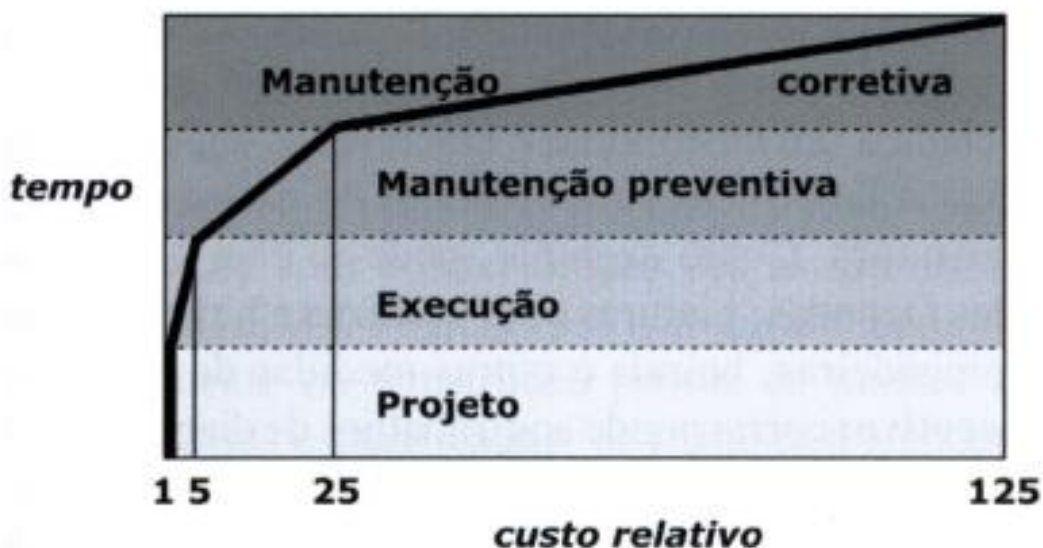


Figura 10 – Lei de Sitter  
Fonte: Projeto da NBR 6118:2003.

## 2.4 ORÇAMENTAÇÃO DE OAEs COM ÊNFASE EM RECUPERAÇÃO

No Brasil há alguns instrumentos que foram criados com o objetivo de estabelecer preços de referências para contratação de obras públicas e auxiliar ao processo de orçamentação de obras públicas. O uso de sistemas referenciais de custos, como o Sicro e o Sinapi, racionaliza o processo de maneira que tais sistemas já apresentam composições de custo padronizadas.

De acordo com o TCU, o sistema Sicro, desenvolvido pelo DNIT, é utilizado para simulação do processo pelo qual empresas privadas precificam obras de infraestrutura rodoviária. Já a tabela Sinapi, criada pela Caixa Econômica Federal em parceria com o IBGE, é uma tabela de preços elaborada para ser utilizada no setor da construção civil focando em insumos de obras de habitação popular. Atualmente, utiliza-se o sistema Sicro completo para a precificação de obras rodoviárias e as tabelas de preços do Sinapi apenas quando se trata de obras no setor de transporte.

No entanto, atualmente, há certa dificuldade em orçar as intervenções de recuperação das pontes rodoviárias, porque boa parte dos itens de recuperação não constam nas planilhas de referência para orçamentação. Isto ocorre porque estes itens não são elaborados por especialistas da área, acarretando na falta ou no esquecimento dos mesmos.

Um orçamento equilibrado é muito importante para evitar problemas durante o planejamento e a execução da obra. Quando um orçamento de referência é mal elaborado, com omissões de serviços ou com preços aviltantes, resulta-se em uma licitação deserta, sem interesse das empresas prestadoras de serviço. No caso de custos subestimados, as empresas licitantes poderão não suportar os encargos contratuais sem a revisão dos valores acordados, gerando obras inacabadas ou causando um grande problema à saúde financeira da empresa. Por outro lado, os custos podem ser superestimados, seja nos quantitativos de serviços ou nos valores unitários, gerando sobrepreço ou superfaturamento no contrato. A Figura 11 exemplifica a importância de um orçamento equilibrado, segundo TCU (2014).



Figura 11 – A importância de um orçamento equilibrado  
Fonte: (TCU, 2014).

## 2.5 SISTEMA DE GESTÃO DE PONTES

Nos últimos anos, a publicação de trabalhos e a realização de estudos e eventos técnicos apontam para uma necessidade em comum: a implantação de sistemas de gestão de pontes, especialmente em países que ainda não adotam um procedimento sistemático para essa questão. Um sistema de gestão de pontes representa para os órgãos responsáveis pela administração das redes viárias um valioso instrumento, pois permite decisões rápidas e eficientes baseadas em parâmetros técnicos e científicos voltados à otimização dos custos de manutenção desses importantes patrimônios públicos (VITÓRIO, 2006).

Para que haja uma gestão de pontes eficaz deve-se ter um rigoroso cadastro das obras existentes e um programa de vistorias sistemáticas. Além disso, devem-se incluir diversas atividades técnicas, administrativas e organizacionais, com o objetivo de instituir e por em prática uma política que englobe a conservação, recuperação, ampliação ou substituição das OAEs. Os dados obtidos contribuem para identificar a intervenção necessária, quando serão estimados os custos de tal ação (VITÓRIO, 2006). A Figura 12, a seguir, exibe o diagrama de um sistema típico de gestão de pontes rodoviárias.

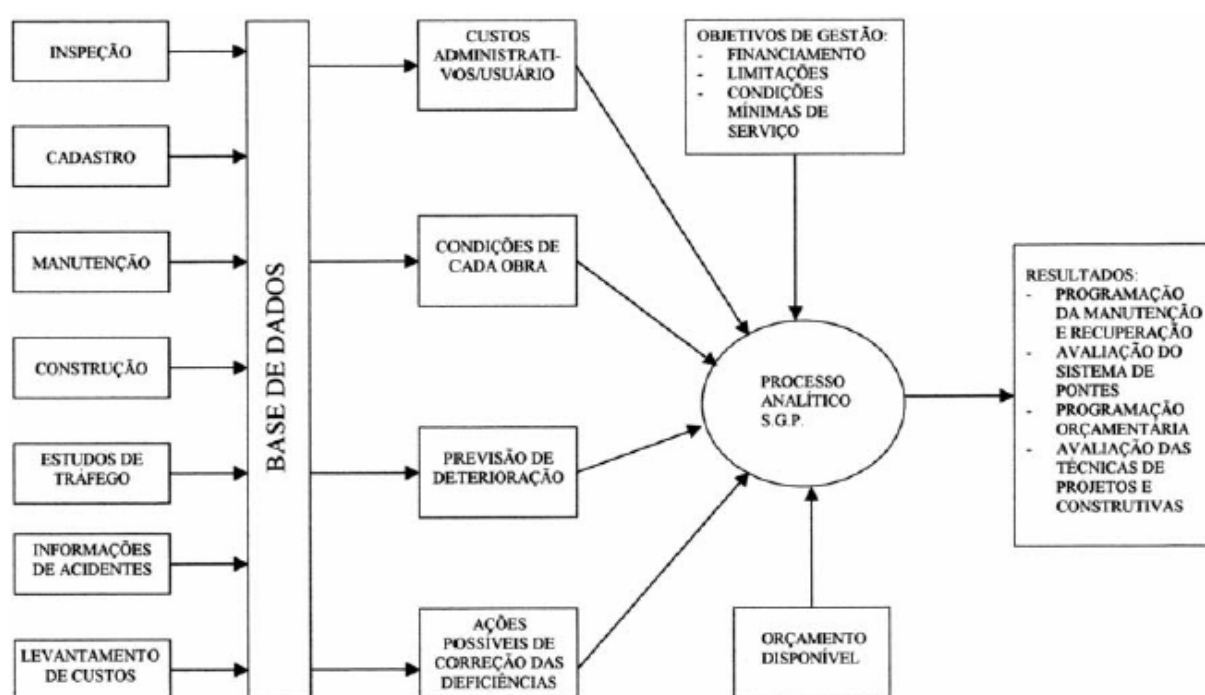


Figura 12 – Diagrama de um sistema típico de gestão de pontes  
Fonte: ORTEGA *apud* VITÓRIO (2006).

Esse tipo de procedimento trará aos usuários, em particular, e à sociedade em geral diversos benefícios, principalmente em relação a segurança e ao conforto dos mesmos. Além disso, considerando-se que estas obras são construídas com dinheiro público, caso existisse um programa de manutenção preventiva adequada o desperdício de verbas aplicadas em obras corretivas, que talvez nem precisassem ser realizadas, poderia ser evitado (VITÓRIO, 2006).

## 2.6 ALARGAMENTO E REFORÇO DE PONTES RODOVIÁRIAS

Em muitos casos, reforçar a estrutura da ponte não é suficiente para resolver o problema do aumento de tráfego. Por isso, visando à solução deste problema e ao aumento da capacidade de carga juntamente com a adição do número de faixas de rodagem da rodovia, recorre-se ao aumento de sua seção transversal seguido do reforço da estrutura. Evidentemente, o gabarito transversal adotado para os tabuleiros de pontes e viadutos varia de acordo com cada rodovia, no entanto, de maneira geral, nas rodovias federais a largura total adotada após o alargamento é de 12,80m, com exceção de pontes situadas nas áreas urbanas, onde o tabuleiro é alargado para 16,10m (VITÓRIO, 2013). Os dados do DNIT, publicados por Mendes (2009), mostram quem entre as 5600 pontes cadastradas nas rodovias federais brasileiras pelo referido órgão:

- 79% das pontes possuem largura total inferior a 12m, considerada estreita pelo padrão atual;
- 90% das pontes foram projetadas com trem tipo de 240 kN ou de 360 kN;

Ao se alterar a utilização da estrutura ou melhorar a sua capacidade para suportar determinado conjunto de solicitações associa-se a necessidade de reforço estrutural na mesma. Caracteriza-se um projeto de reforço estrutural de acordo com cada peculiaridade que a estrutura pode apresentar. Assim, existem atualmente diversas técnicas de reforço cujo desempenho irá depender da configuração geométrica e de carregamento. Portanto, a escolha da técnica que deverá ser aplicada baseia-se nas seguintes considerações (ROBERY e INNES, 1997 *apud* BEBER, 2003).

- a) Custo de Aplicação;
- b) Desempenho do reforço;
- c) Durabilidade do reforço;
- d) Facilidade e rapidez na instalação.

### 2.6.1 Métodos Convencionais de Alargamento de Pontes

De maneira geral, no Brasil, segundo Vitório e Barros (2012), os alargamentos dos tabuleiros das pontes antigas que precisam se adequar aos atuais gabaritos transversais das rodovias são comumente feitos através de quatro métodos: alargamento com concreto armado convencional, alargamento com protensão externa, alargamento com vigas pré-moldadas e alargamento com vigas mistas. Conforme o método escolhido e a condição estrutural da ponte é definido se há a necessidade de reforço (inclusive na fundação), para que assim seja garantida a durabilidade e a estabilidade da obra alargada.

O primeiro método se refere ao alargamento com acréscimo lateral de novas longarinas de concreto armado, moldado *in loco*, que são incorporadas ao tabuleiro antigo, formando uma nova grelha; o segundo processo faz uso da aplicação de protensão transversal e reforço das vigas originais com protensão longitudinal externa, para o alargamento da laje. Já o terceiro método, alargamento com vigas pré-moldadas, consiste no emprego de elementos composto cujas seções resistentes são construídas por elementos pré-moldados de seção parcial, complementadas por concreto moldado no local. Por fim, o método de alargamento com vigas mistas, consiste em alargar a seção transversal da ponte com a utilização de longarinas metálicas unidas à estrutura de concreto já existente através de conectores metálicos (VITÓRIO, 2013). A Figura 13, mostra na prática os quatro métodos aplicados no alargamento de pontes.

A seguir, uma descrição dos dois principais métodos de alargamento aplicados nas pontes de concreto armado de referência deste trabalho: alargamento com concreto armado convencional moldado *in loco* e alargamento com vigas pré-moldadas.



**Figura 13 – Métodos de alargamentos de pontes de concreto**  
 Fonte: Adaptado de VITÓRIO (2013).

#### 2.6.1.1 Alargamento com concreto armado convencional moldado *in loco*

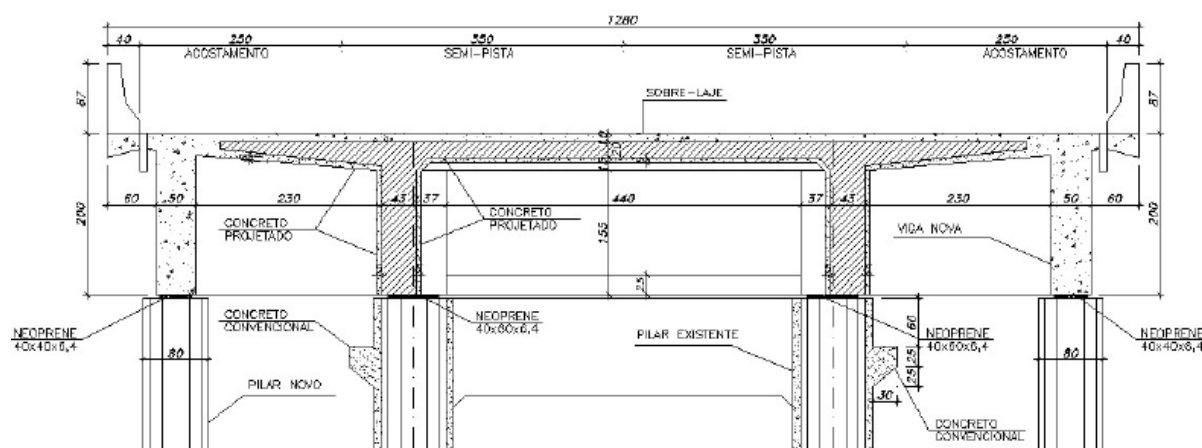
De maneira geral este método é o mais utilizado nas pontes, principalmente nas de pequeno porte. Trata-se de um modelo de grelha, incluindo e solidarizando todas as vigas e lajes (novas e antigas) ao tabuleiro alargado. O uso de softwares avançados de elementos finitos, como o SAP-2000 e o STRAP, que modelam a estrutura permitindo a obtenção dos esforços no tabuleiro alargado com bom nível de aproximação, facilita a análise de esforços e do próprio comportamento da estrutura após o alargamento. Antigamente, o grande problema referente a este método era a dificuldade na avaliação da distribuição das cargas móveis sobre o tabuleiro, pois havia certo grau de incerteza quanto aos valores finais dos esforços no tabuleiro alargado. Com advento dos softwares citados este problema foi minimizado (VITÓRIO, 2013).

Nas Figuras 14 e 15, a seguir, há duas seções transversais cujo tabuleiro foi alargado para 12,80m. Na Figura 14, duas novas vigas de concreto armado

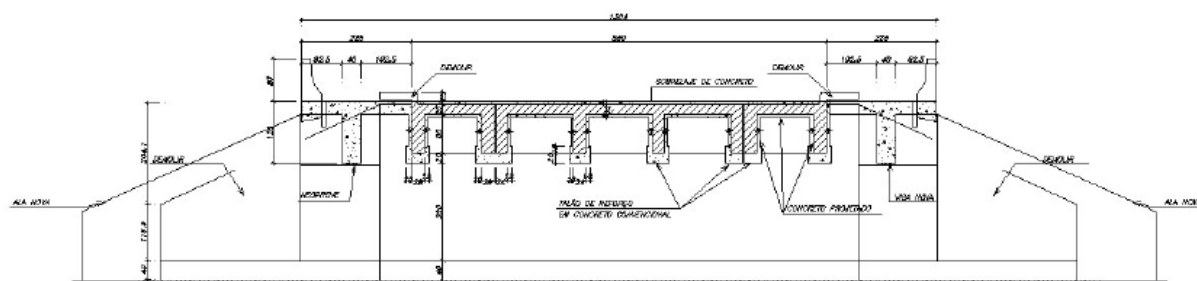


convencional foram acrescentadas, de modo que a nova superestrutura ficou constituída por uma grelha de quatro vigas. Mesmo com o tabuleiro recalculado para o Trem tipo classe 45, as duas vigas não necessitaram ser reforçadas pois não tiveram acréscimo de esforços devido ao efeito de grelha.

Em contrapartida, na Figura 15, é mostrado um caso de alargamento no qual as vigas antigas necessitaram de acréscimo de armaduras de flexão e cisalhamento devido ao aumento nos valores dos esforços. A solidarização entre os tabuleiros original e alargado normalmente é feita por meio de uma sobre laje na parte superior do estrado, conforme mostram as Figuras 14 e 15 (VITÓRIO, 2013). Na Figura 16, observa-se um exemplo do detalhe das armações de reforço das vigas antigas da ponte observada na Figura 15.



**Figura 14 – Seção transversal do alargamento de uma ponte com adição de novas vigas e pilares de concreto armado sem necessidade de reforço nas vigas antigas**  
Fonte: VITÓRIO (2013).



**Figura 15 – Seção transversal do alargamento de uma ponte com a necessidade de reforço das vigas antigas**  
Fonte: VITÓRIO (2013).



**Figura 16 – Armaduras de reforço das vigas antigas de uma ponte alargada**  
Fonte: VITÓRIO (2013).

#### 2.6.1.2 Alargamento com vigas pré-moldadas

A rapidez na execução e a garantia de qualidade do concreto fazem da utilização de vigas pré-moldadas de concreto uma boa opção para o caso de projetos de recuperação e de execução de pontes.

O uso de peças pré-moldadas, no alargamento do tabuleiro de pontes construídas com concreto armado convencional, caracteriza o emprego de elementos compostos, onde as seções resistentes são constituídas por elementos pré-moldados de seção parcial, complementadas com concreto moldado no local, conforme a Figura 17 que mostra um exemplo desta forma de alargamento (VITÓRIO, 2013).

Segundo Vitório (2013), os comportamentos são orientados fundamentalmente pela transferência das tensões de cisalhamento na interface entre o concreto da laje, moldado no local, e o concreto pré-moldado da viga. A Figura 18 exemplifica o comportamento de uma seção composta por viga pré-moldada e a laje moldada no local, onde ocorre a transferência de cisalhamento na interface das duas superfícies atravessadas pela armadura de costura.

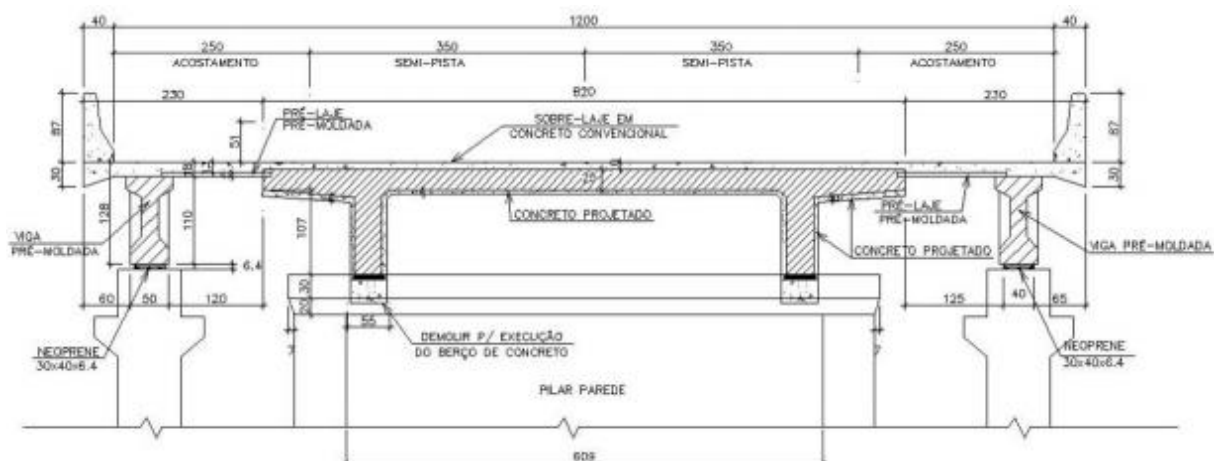


Figura 17 – Alargamento de uma ponte utilizando viga pré-moldada  
Fonte: VITÓRIO (2013).

Ainda, deve-se considerar na análise a ocorrência de dois módulos de elasticidade diferentes, por se tratar de uma seção composta por dois concretos com características diferentes.

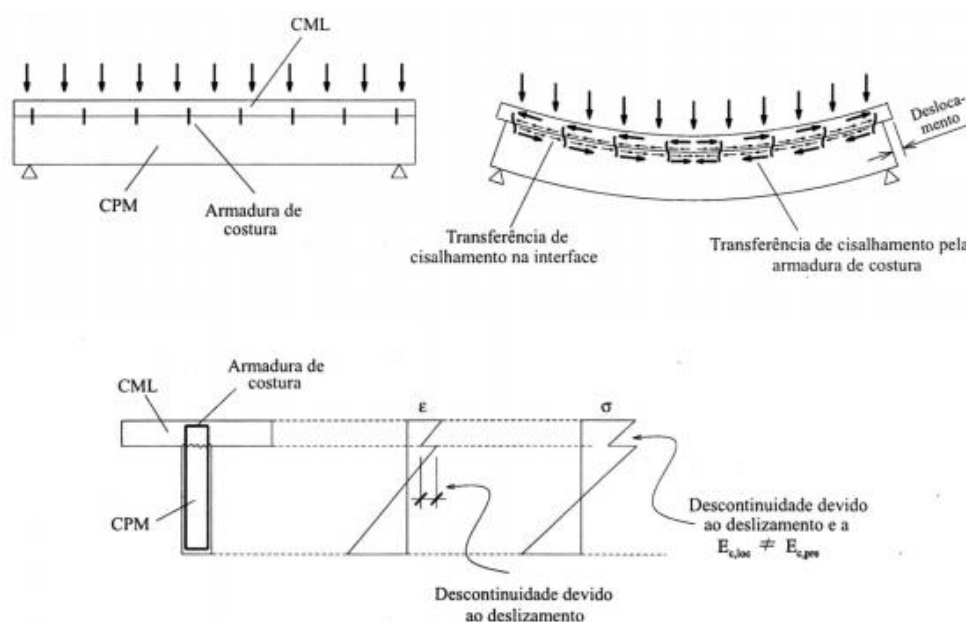


Figura 18 – Comportamento de seção composta com deslizamento na interface entre concreto pré-moldado e moldado no local  
Fonte: EL DEBS (2000) *apud* VITÓRIO (2013).

## 2.7 INFERÊNCIA ESTATÍSTICA

De acordo com Shimakura (2005), a estatística engloba métodos para a condução e o planejamento de um estudo, descrição dos dados coletados e para

predições, tomada de decisões ou inferência sobre os fenômenos representados pelos dados.

Segundo a autora, o planejamento e a condução do estudo e da análise de dados influencia diretamente na qualidade de um estudo, sendo que os métodos estatísticos para análise de dados podem ser classificados como estatística descritiva e inferência estatística, o qual é o método inferencial utilizado neste trabalho de conclusão de curso.

Como normalmente torna-se muito difícil analisar toda uma população, devido aos custos elevados ou as dificuldades operacionais, examina-se uma amostra representativa para que os resultados obtidos sejam generalizados a toda população. No entanto, quando a conclusão determinada pela amostragem é generalizada para a população, apresenta-se um grau de incerteza na análise. Portanto, a inferência estatística consiste em um conjunto de técnicas e procedimentos que permitem dar ao pesquisador um grau de confiabilidade nas afirmações que são feitas para a população, baseadas nos resultados e nas informações das amostras (GUIMARÃES, 2003).

Atualmente, a inferência estatística vem sendo amplamente empregada na engenharia de avaliação de imóveis. Entre todos os métodos empregados na avaliação de imóveis o mais utilizado é o método comparativo de dados, onde se estima o valor do bem através da comparação com dados de mercado semelhantes quanto às características intrínsecas e extrínsecas, ou seja, está diretamente relacionado aos respectivos preços de imóveis que se assemelhem a ele. (NÓR, 2008; DANTAS, 1998). Devido à divergência de imóveis oferecidos pelo mercado imobiliário, torna-se impossível a comparação direta dos preços, mesmo no caso de semelhança entre os imóveis, pois ainda assim existirão fatores que diferenciam os imóveis entre si (NADAL, 2008).

Segundo Nadal (2008), pelos motivos supracitados, torna-se necessário aplicar uma técnica que permita ajustar essas diferenças entre os imóveis. Sendo assim, a análise de regressão linear múltipla, também chamada de Modelo Clássico de Regressão, que é uma técnica de inferência estatística, está sendo muito utilizada para identificar os principais fatores que influenciam a determinação dos preços de imóveis e estimar o valor de mercado das propriedades, além disso, seu uso tem sido muito facilitado, atualmente, pela utilização de *softwares* específicos.

Neste trabalho de conclusão de curso foi aplicada essa mesma técnica de regressão linear múltipla utilizada na avaliação de imóveis, porém para estimar o custo referente ao reforço e alargamento em pontes de concreto de pequenos vãos.

### 2.7.1 Regressão Linear Múltipla

O modelo clássico de regressão surgiu com Gauss durante o período de 1809 a 1821. Atualmente, a análise da regressão é uma das vertentes da teoria estatística mais utilizada na pesquisa científica. É a técnica adequada quando se estuda o comportamento de uma variável (variável dependente) em relação a outras que são responsáveis por sua formação (variáveis independentes) (MICHAEL, 2004).

Desta maneira, define-se por regressão como o estabelecimento de uma relação funcional entre duas ou mais variáveis envolvidas para a descrição de um fenômeno. Descreve-se matematicamente a variável aleatória  $Y$  pela expressão (MARQUES, 2000):

$$Y = f(X) + \epsilon \quad (1)$$

Em que:

$X$  é a variável independente ou variável explicativa;

$Y$  é a variável dependente ou variável resposta;

$\epsilon$  é a componente aleatória da variação de  $Y$ ;

$f$  é a função de regressão.

Usualmente,  $X$  é uma variável que pode ser controlada pelo pesquisador, ao contrário de  $Y$ . Posteriormente, a análise de um gráfico de dispersão sugere uma relação funcional entre as variáveis como, por exemplo, uma exponencial, uma reta, entre outros. Neste caso surge o modelo estatístico denominado de regressão linear simples. Uma generalização desta regressão é denominada por regressão múltipla, o modelo estatístico utilizado neste caso é dado por (NADAL, 2008):

$$y_i = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_u x_u \quad (2)$$

Em que,  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  ...  $b_u$  são os parâmetros da regressão múltipla, que pretende-se obter com o estudo. As variáveis são características notáveis em uma amostra que variam conforme os elementos que a compõe. Tais variáveis representam as características do objeto que será avaliado. Classificam-se em dependentes e independentes, conforme Quadro 2 (NÓR, 2008).

Existe ainda, segundo Nór (2008), uma segunda classificação de acordo com a natureza das variáveis, o Quadro 3 exemplifica as variáveis quantitativas, qualitativas, *proxy* e dicotômicas.

Para que o modelo encontrado por meio da análise de regressão tenha validade, as condições básicas devem ser garantidas. Para isso existem vários métodos matemáticos para obter os coeficientes dos modelos, no entanto o mais conhecido, e que será aplicado neste estudo, é o método dos mínimos quadrados (MICHAEL, 2004).

| Variáveis     | Descrição   |
|---------------|---|
| Dependentes   | Variável relacionada à forma de expressão dos preços (por exemplo: preço total unitário, moeda de referência, etc).   |
| Independentes | São características físicas, de localização e econômicas. Devem ser escolhidas com base em teorias existentes, conhecimentos adquiridos, senso comum, entre outros atributos. |

**Quadro 2 – Descrição dos tipos de variáveis**

Fonte: Adaptado de NÓR (2008).

Ainda, de acordo com Michael (2004), caso as condições básicas não sejam respeitadas haverá um problema na análise, tais como a omissão de variáveis importantes nos modelos e as condições dos resíduos, que não devem se correlacionar e com variância constante e finita. Além disso, é importante a análise de *outliers*, procurando entender o comportamento espúrio de algumas observações, eventualmente.

Entende-se por *outliers* como observações extremas, que criam dificuldades de análise, principalmente com o uso do método de mínimos quadrados que busca o ajuste a todos os pontos observados. Estes pontos não são necessariamente más observações, então devem ser examinados cuidadosamente para verificar-se a razão da disparidade. Sendo assim, não se indica que seja feita a remoção automática, pois o dado pode ser útil para explicar combinações não usuais de

circunstâncias. A remoção deve ser feita caso seja encontrado um erro de medição, especificação, ou outra causa que foi identificada (TRIVELLONI, 1998).

| <b>Variáveis Quantitativas</b> |   |
|--------------------------------|---|
| <b>Discretas</b>               | Possuem números inteiros, sem frações e são conjuntos finitos. Por exemplo: idade da construção em anos completos.  |
| <b>Contínuas</b>               | Possuem número que podem ser fracionados. Por exemplo: área total.  |
| <b>Variáveis Qualitativas</b>  |   |
| <b>Categoria nominal</b>       | Cada categoria é independente, sem inter-relações. Por exemplo, topografia de um terreno (plano ou aclone).         |
| <b>Categoria ordinal</b>       | Cada categoria mantém uma relação de ordem com as outras, podendo ou não ser regular.                               |
| <b>Variáveis Proxy</b>         |   |
| <b>Proxy</b>                   | Utilizadas para substituir variáveis de difícil mensuração e que guarda relação de pertinência com outras variáveis |
| <b>Variáveis Dicotômicas</b>   |   |
| <b>Dicotômica</b>              | Assumem somente dois valores, normalmente expressam a ausência ou não de atributos do elemento                      |

**Quadro 3 – Descrição das variáveis quantitativas e qualitativas**  
 Fonte: Adaptado de NÓR (2008).

Na análise proposta por este trabalho, considerando-se a equação 2 citada anteriormente,  $y$  representa o valor do custo de reforço e alargamento das pontes em moeda corrente e  $x$  representa as variáveis como: extensão da ponte, razão de alargamento, idade da estrutura, entre outros, formando um sistema de  $n$  equações denominado de equações de observações, onde as incógnitas  $a, b_1, b_2 \dots b_u$  são os objetos de determinação.

#### 2.7.1.1 Considerações a respeito da regressão linear múltipla

Para a validação dos modelos de regressão é necessário atender a alguns pressupostos, com o objetivo de obter avaliações não tendenciosas, eficientes e consistentes. O atendimento a esses pressupostos é feito através da verificação dos efeitos descritos a seguir:

## I. Coeficientes de correlação ( $r$ ) e determinação ( $r^2$ )

De acordo com Pelli (2003), o coeficiente de correlação representa o quanto as variáveis são relacionadas entre si. Segundo Dantas (1998), o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) indica o poder de explicação do modelo em função das variáveis independentes.

Sendo assim, quanto mais próximos a 1 os coeficientes estiverem melhor, pois indica que as variáveis adotadas estão com ótimo poder de explicação. No entanto, é importante verificar que a presença de *outliers* contribui para um aumento do coeficiente.

Caso o modelo escolhido apresente esses coeficientes com valores baixos (abaixo de 0,5) significa que o mesmo é inadequado, pois as variáveis não estão bem definidas ou a variação total a ser explicada é pequena e que os dados são homogêneos, portanto outros resultados devem-se ser analisados (PELLI, 2003).

## II. Normalidade dos resíduos

É uma das etapas mais importantes na definição da equação. Faz-se análise gráfica da dispersão dos dados em torno da média. A situação ideal é uma distribuição homogênea dos dados em torno da reta representativa da média, com os resíduos tendendo a uma distribuição normal, ou seja, nenhum elemento da amostra acima de dois desvios padrões (PELLI, 2003).

## III. Verificação da significância

Utiliza-se a distribuição de Snedecor, por meio da análise da variância, para testar a significância dos modelos de regressão. Nesta análise constata-se a relação entre as variáveis independentes e a variável dependente. Calcula-se um coeficiente F e então se faz a comparação com valores tabelados da distribuição de Snedecor, verificando-se a existência ou não de regressão (DANTAS, 1998; MENDONÇA, 1998).

Portanto, através do nível de significância verifica-se a possibilidade de se cometer erros referentes à análise de uma variável sobre a outra, e quanto maior o nível maior a probabilidade de o erro ocorrer. Por isso, adotam-se valores de



significância inferiores a 5%. Além disso, a presença de *outliers* pode aumentar o nível de significância.

Em relação à significância dos regressores utiliza-se a distribuição t de Student. Essa distribuição é semelhante a uma distribuição normal, e é muito utilizada quando se necessita compreender as médias populacionais de uma amostra com desvios padrão desconhecidos, pois se estima o mesmo através dos dados amostrais. Calcula-se o t por meio da relação entre o coeficiente da variável testada e o desvio padrão correspondente a essa variável (DANTAS, 1998).

Deve ser analisado se o t calculado é maior do que o t tabelado, pois indica que a variável independente correspondente é importante na formação do modelo encontrado (MANUAL DO INFER 32®, 2004).

#### IV. Homocedasticidade

Para Mendonça (1998), é fundamental que a regressão satisfaça a condição de homocedasticidade. No caso de heterocedasticidade, variância não constante, os coeficientes de regressão são afetados pelos valores extremos das variáveis independentes. Isto provoca perturbações nas estimativas da variável dependente.

A verificação desta condição é feita por meio da análise do gráfico de resíduos da variável dependente *versus* valores estimados da variável dependente. O gráfico deve apresentar os pontos dispostos de maneira aleatória, sem nenhum padrão definido.

#### V. Inexistência de autocorrelação dos erros

A autocorrelação deriva da influência sobre os resíduos de variáveis independentes importantes, não consideradas na equação. O modelo sem autocorrelação deve apresentar resíduos independentes, distribuídos de maneira próxima à distribuição normal. A verificação é feita da mesma maneira que a homocedasticidade, ou seja, no gráfico dos resíduos *versus* valores estimados, os pontos devem estar distribuídos de maneira aleatória, sem nenhuma tendência definida (MENDONÇA, 1998).

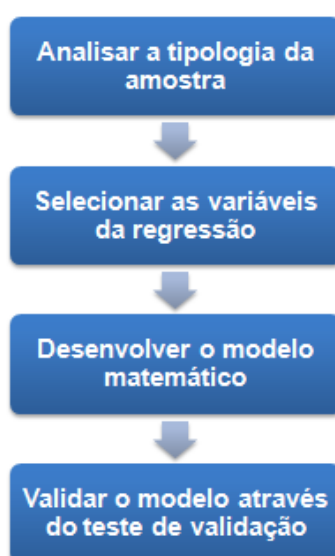
## VI. Inexistência de multicolinearidade

Entende-se por multicolinearidade como a elevada correlação entre duas ou mais variáveis independentes em um modelo de regressão linear múltipla. Isto deve ser evitado, pois causa perturbações ao modelo, resultando em valores estimados imprecisos (MENDONÇA, 1998).

Segundo Sartoris (2003), para reduzir os efeitos da multicolinearidade recomenda-se aumentar a amostra. Além disso, não é recomendado que o modelo de regressão linear múltipla possua muitas variáveis independentes, pois isso pode tornar o resultado pouco confiável.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia proposta para a obtenção de um modelo numérico que possa ser extrapolado, utilizando-se inferência estatística. Na Figura 19, observa-se o fluxograma das etapas do procedimento desenvolvido nesta metodologia. No caso deste trabalho, o modelo final obtido irá estimar o custo de reforço e alargamento de pontes de concreto de pequenos vãos.



**Figura 19 – Fluxograma das etapas da metodologia**  
Fonte: Autoria própria.

#### 3.1 TIPOLOGIA DAS PONTES DE REFERÊNCIA

Para compor a amostra do estudo deste trabalho de conclusão de curso foram selecionados projetos de OAEs de pequenos vãos, de concreto armado e protendido, para servirem de referência. As estruturas escolhidas possuem diferentes soluções em projetos estruturais de alargamento e reforço, justamente para oferecer maior abrangência e amplitude ao modelo desenvolvido. Os projetos foram elaborados pela empresa AAD Projetos Consultoria e Engenharia, situada em Curitiba – PR.

Tais pontes limitam-se ao estado do Paraná, e estão localizadas em trechos de rodovia entre as cidades de Maringá, Paiçandu, Nova Londrina, Tibagi, Lapa, São

Mateus e União da Vitória. Todos os dados referentes às estruturas analisadas provêm dos próprios projetos executivos de reforço e alargamento, bem como, de memoriais descritivos e orçamentos de execução.

Segundo classificação de acordo com o sistema estrutural da superestrutura, observaram-se pontes em estrutura hiperestática (pórticos) e em estrutura isostática (vigas), sendo muito comum o emprego da laje associada às longarinas de seção transversal retangular, seção T e seção I. Já em relação ao processo construtivo, as pontes foram construídas em concreto armado moldado no local ou com elementos em concreto pré-moldado. Entre as principais características geométricas observadas estão os vãos principais entre 15 metros e 35 metros e a extensão total entre 15 metros e 85 metros.

Além disso, as pontes sofreram alterações em seu gabarito transversal para se adequar aos gabaritos das rodovias e se adaptar ao trem tipo de classe 45 em vigor. A largura original dos tabuleiros das pontes variou entre 2,6 metros e 12,15 metros. Os métodos executivos destes reforços e alargamentos da amostra foram por meio do concreto armado convencional moldado *in loco*, vigas pré-moldadas e vigas em concreto protendido.

A amostra escolhida representa um grupo de OAEs com sistemas estruturais compatíveis e, portanto, a equação não pode ser extrapolada para obras com outros sistemas, tais como seções caixão, estruturas metálicas, passarelas de pedestres, entre outros.

### 3.2 SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS QUE SERÃO CONSIDERADAS PARA REGRESSÃO

Como os elementos que compõe a amostra apresentam características heterogêneas, há a necessidade de utilização de variáveis visando à obtenção do modelo estatístico.

Nesta fase foram identificadas as variáveis independentes que devem influenciar a variável dependente deste trabalho, o custo de reforço e alargamento de pontes de concreto. O valor do custo final da intervenção é proveniente de planilhas orçamentárias de execução com valores alusivos ao ano de 2015 (SICRO 2 e SINAPI) para que a análise seja feita com os valores reais de mercado. Além disso, os dados que satisfazem as variáveis dependentes foram coletados nos

projetos estruturais de reforço e alargamento das estruturas. As variáveis independentes utilizadas para a modelagem dos dados foram as seguintes:

- **Largura original:** largura inicial do tabuleiro da ponte - variável quantitativa;
- **Razão de alargamento:** razão entre a largura final e largura inicial do tabuleiro da ponte - variável quantitativa;
- **Número de linhas de apoio:** número de linhas de apoio consideradas para o dimensionamento - variável quantitativa;
- **Extensão Total:** comprimento total da obra, expresso em metros - variável quantitativa;
- **Idade da estrutura:** estimacão da idade da estrutura - variável quantitativa;
- **Número de vigas:** quantidade de vigas do alargamento - variável quantitativa;
- **Tipo das vigas do alargamento:** viga moldada *in loco* (1), viga pré-moldada (2) - variável dicotômica;
- **Tipologia da estrutura:** sistema estrutural em pórtico (1), em viga (2) - variável dicotômica;
- **Tipo de concreto aplicado nas vigas do alargamento:** concreto armado ou concreto protendido - CA (1), CP (2) - variável dicotômica;
- **Reforço Estrutural:** tipo de reforço que pode ser aplicado - aumento de seção transversal (1), fibra de carbono (2), protensão externa (3), adiçãõ de novos pilares (4), sem reforço (5) - variável qualitativa;

Observam-se no Quadro 05 as variáveis utilizadas no trabalho, de acordo com a sua natureza: quantitativa, qualitativa e dicotômica.

| Quantitativas  | Qualitativas   | Dicotômica  |
|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Razão de alargamento</li> <li>• Largura original</li> <li>• Extensão total</li> <li>• N° de linhas de apoio</li> <li>• Idade da Estrutura</li> <li>• Número de vigas</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reforço Estrutural</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo das vigas do alargamento</li> <li>• Tipologia da estrutura</li> <li>• Tipo de concreto aplicado nas <u>vigas</u></li> </ul> |

**Quadro 04 – Resumo das variáveis utilizadas no estudo**  
Fonte: Autoria própria.

### 3.2.1 Considerações a Respeito das Variáveis que Necessitam de Levantamento em Base de Dados

Ao estimar o custo de reforço e alargamento da OAE, por meio do modelo matemático desenvolvido, é necessário que as variáveis independentes referentes à tipologia e as características originais da estrutura sejam levantadas em uma base de dados já existente como seus projetos originais e relatórios de inspeção.

No entanto, como grande parte dos projetos originais das pontes brasileiras, principalmente das mais antigas, não existe mais nos arquivos dos órgãos que as construíram anos atrás, é necessário que sejam realizadas inspeções especiais para coletar informações referentes à OAE. Através das inspeções é possível avaliar e determinar as características físicas da estrutura original, como comprimento total, vão principal e tipologia da estrutura e, conseqüentemente, definir essas variáveis no modelo matemático.

Além disso, ainda para o caso da falta dos projetos originais, a idade das pontes deve ser estimada por meio das características da seção transversal do tabuleiro, considerando a evolução do gabarito transversal desde 1940 até a data atual, conforme informações do Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias do DNIT. Outra maneira de obter a idade das obras cujos projetos não mais existem, é buscando informações disponíveis em placas de inauguração, depoimento de moradores das proximidades e observando as tipologias estruturais que caracterizaram as épocas em que foram construídas.

### 3.3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO

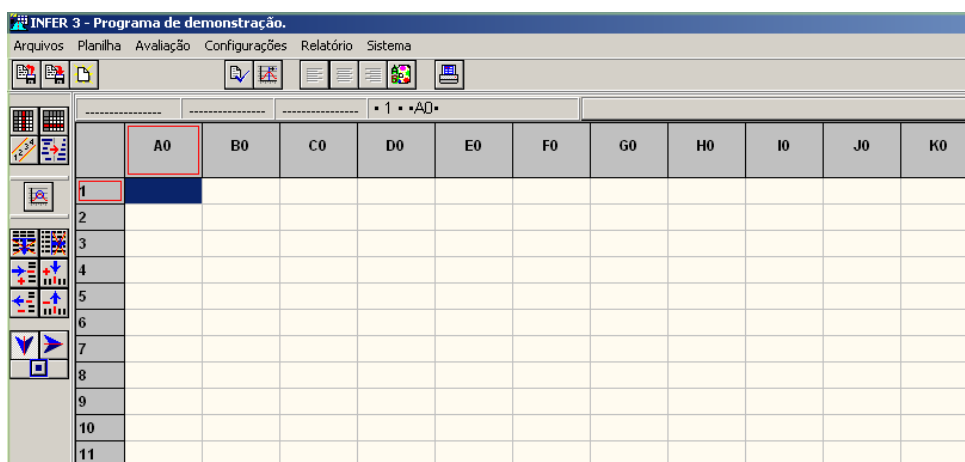
O modelo matemático desenvolvido apresentará como resultado uma equação que estime o custo de reforço e alargamento de pontes de pequenos vãos, por meio das variáveis dependentes que foram determinadas anteriormente. Será dispensado aos dados obtidos da amostra um tratamento por meio de inferência estatística. Esse processo permite encontrar estimativas não tendenciosas de custo, estabelecendo intervalos de confiança para as mesmas.

### 3.3.1 Inserção e Processamento da Amostra no INFER 32®

O programa utilizado neste trabalho, o INFER 32® (versão demonstrativa), trata-se de um software estatístico desenvolvido pela empresa Ária Informática. O mesmo foi utilizado para avaliar a amostra selecionada usando estatística inferencial, pesquisando o modelo matemático que melhor a representa, através de regressão linear por mínimos quadrados e da análise da regressão. O procedimento referente à modelagem e avaliação da amostra por estatística inferencial conta algumas etapas que serão descritas a seguir.

Inicialmente, criou-se um novo arquivo no INFER 32® para inserção das variáveis das amostras, conforme a imagem da tela inicial na Figura 20.

Após estabelecer as variáveis que influenciam a estimativa do custo de reforço e alargamento das pontes selecionadas, foram inseridas as mesmas, juntamente com a variável custo nas colunas correspondentes.

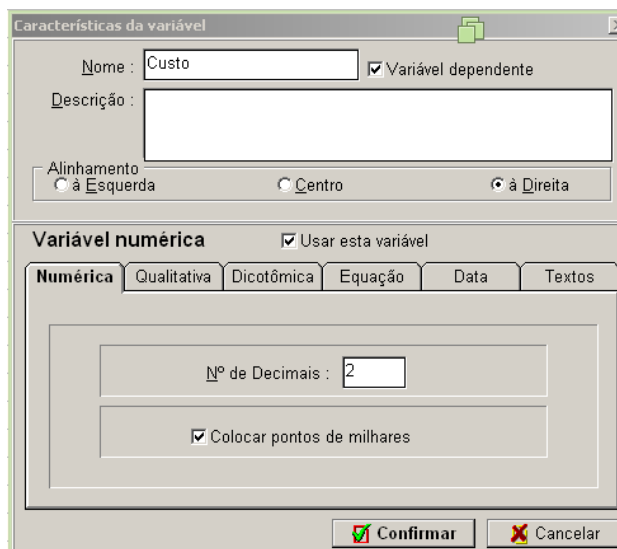


|    | A0 | B0 | C0 | D0 | E0 | F0 | G0 | H0 | I0 | J0 | K0 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 2  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 3  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 4  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 5  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 6  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 7  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 8  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 9  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 10 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 11 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

**Figura 20 – Tela inicial do INFER 32®**

Fonte: Autoria própria.

Deve-se configurar cada variável independente de acordo com a sua natureza: numérica (quantitativa), qualitativa ou dicotômica, conforme a Figura 21. Como o custo é a variável dependente da análise, deve ser demarcado como tal. Após a inserção e configuração das variáveis, foram preenchidas as colunas com os dados de entrada das doze OAEs que compõe a amostra estudada.



Características da variável

Nome :   Variável dependente

Descrição :

Alinhamento  
 à Esquerda  Centro  à Direita

Variável numérica  Usar esta variável

Numérica  Qualitativa  Dicotômica  Equação  Data  Textos

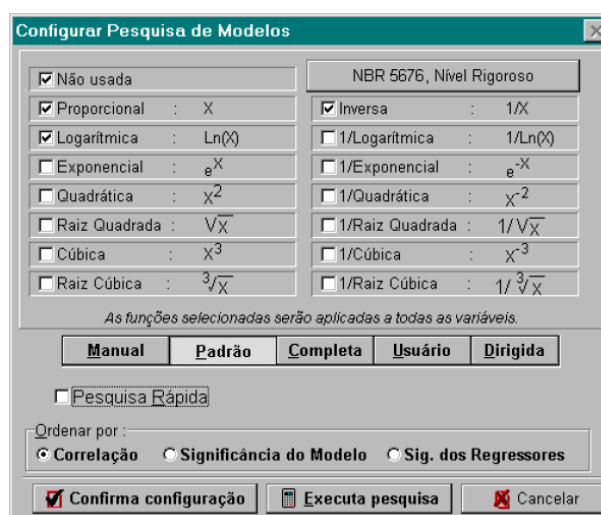
Nº de Decimais :

Colocar pontos de milhares

Confirmar  Cancelar

**Figura 21 – Janela de configuração das variáveis**  
 Fonte: Autoria própria.

Em seguida, processou-se a pesquisa do modelo matemático de ajustes de curvas que melhor se adapta a amostra. O INFER 32® possui 15 funções de transformação que podem ser aplicadas sobre cada uma das variáveis da planilha, de forma a buscar uma equação que melhor se ajuste ao modelo, conforme a Figura 22.



Configurar Pesquisa de Modelos

Não usada

Proporcional :  $X$

Logarítmica :  $\ln(X)$

Exponencial :  $e^X$

Quadrática :  $X^2$

Raiz Quadrada :  $\sqrt{X}$

Cúbica :  $X^3$

Raiz Cúbica :  $\sqrt[3]{X}$

NBR 5676, Nível Rigoroso

Inversa :  $1/X$

1/Logarítmica :  $1/\ln(X)$

1/Exponencial :  $e^{-X}$

1/Quadrática :  $X^{-2}$

1/Raiz Quadrada :  $1/\sqrt{X}$

1/Cúbica :  $X^{-3}$

1/Raiz Cúbica :  $1/\sqrt[3]{X}$

As funções selecionadas serão aplicadas a todas as variáveis.

Manual Padrão Completa Usuário Dirigida

Pesquisa Rápida

Ordenar por :  
 Correlação  Significância do Modelo  Sig. dos Regressores

Confirma configuração  Executa pesquisa  Cancelar

**Figura 22 – Modelos de transformação para aplicar na análise**  
 Fonte: Autoria própria.

Após configurar as transformações das variáveis executou-se a pesquisa. Durante o processamento, o programa armazena as informações sobre os 50 modelos (as 50 melhores equações) que melhor se adaptam ao critério escolhido. Ao final da pesquisa é mostrada uma janela contendo esses 50 modelos, permitindo



a escolha do mais representativo. Além disso, o programa fornece diversos dados para a escolha do modelo a ser analisado como, por exemplo, gráficos de dispersão dos resíduos, teste de hipóteses, coeficientes de determinação e correlação, transformação das variáveis para ajuste do modelo, além de outras ferramentas estatísticas disponíveis.

Uma vez escolhidos os modelos gerou-se o relatório correspondente aos mesmos. O relatório do INFER 32® é composto por tabelas contendo os resultados estatísticos referentes à avaliação da amostra, e de gráficos, que permitem uma visualização de todos os testes estatísticos realizados.

Por fim, após a análise, foi escolhido o modelo final que melhor representou a amostra, atendendo aos pressupostos de regressão linear múltipla definidos no item 2.7.1.1 do capítulo 2.

### 3.4 COMPARAÇÃO DA VARIÁVEL RESULTADO COM UMA OAE CONTIDA FORA DA AMOSTRA

O modelo numérico gerado, através de inferência estatística, tem por objetivo estimar o custo de reforço e alargamento de pontes de pequenos vãos, ou seja, a variável resultado. Nesta etapa foi demonstrado como aplicar o teste de validação da equação de regressão linear múltipla resultante, aplicando-a a uma OAE contida fora da amostra, comparando o resultado final ao custo de reforço e alargamento orçado. Com essa extrapolação pretendeu-se apresentar uma orientação de como validar o modelo numérico desenvolvido, já que sua validação dependeria de um número mínimo de OAES para compor os testes de aplicação.

## 4 ESTUDO DE CASO

Este capítulo destina-se a apresentar um exemplo de aplicação da metodologia desenvolvida. Nele será descrito as principais características das OAEs que alimentam a planilha do INFER 32®, bem como, os resultados provenientes do programa e suas respectivas análises para a escolha do modelo final de regressão linear múltipla.

Por fim, realiza-se a aplicação da equação final a uma OAE contida fora da amostra, comparando o custo de reforço e alargamento obtido com o custo orçado.

### 4.1 DESCRIÇÕES DAS OBRAS DE ARTES ESPECIAIS QUE COMPÕE A AMOSTRA

Para a descrição de como aplicar o método proposto apresenta-se um modelo com foco em OAEs de pequenos vãos com diferentes características geométricas entre si, justamente para oferecer maior amplitude no estudo. A seguir será apresentada uma descrição das OAEs que compõe a amostra deste estudo.

#### 4.1.1 Viaduto Sobre Ferrovia: Rodovia PR-323

Trata-se de um viaduto sobre ferrovia localizado na rodovia PR 323 (trecho Maringá – Paiçandu) de 40 metros de extensão e 12,15 metros de largura, com vão principal de 33 metros. O viaduto, constituído por um sistema estrutural em vigas, necessitou de ampliação e foi alargado com adição de novas vigas e pilares de concreto. O gabarito foi alargado ficando com a largura total de 22,80 metros, adotando-se um sistema estrutural com 6 longarinas protendidas, sendo 2 em cada vão, além de transversinas e vigas de apoio. Na Figura 23 e na Figura 24 nota-se, respectivamente, a vista lateral e frontal da obra de alargamento da estrutura.



**Figura 23 – Vista lateral do viaduto na Rodovia PR 323 em fase de execução do alargamento**  
Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.



**Figura 24 – Vista frontal do viaduto na Rodovia PR 323 em fase de execução do alargamento**  
Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.

#### 4.1.2 Ponte Sobre o Rio Tigre

Trata-se de uma ponte localizada na BR-376 (trecho Paranavaí – Nova Londrina) sobre o rio Tigre. Possui 69 metros de extensão, 10 metros de largura e vão principal de 23 metros. A ponte, constituída por um sistema estrutural em vigas, necessitou de ampliação e foi alargada com adição de novas vigas e pilares em concreto. O gabarito foi alargado para 12,80 metros, dimensionado de acordo com o Trem-tipo Classe 45, adotando-se para tal um sistema estrutural com 6 vigas pré moldadas em concreto armado, em toda a obra. Observa-se na Figura 25 e na Figura 26, respectivamente, a vista frontal e lateral da ponte original.



**Figura 25 – Vista frontal da ponte original sobre o rio Tigre**  
Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.



**Figura 26 – Vista lateral da ponte original sobre o rio Tigre**  
Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.

#### 4.1.3 Ponte Sobre o Rio Fortaleza

Trata-se de uma ponte localizada na Fazenda Monte Alto, na cidade de Tibagi. Possui 60 metros de extensão, 2,60 metros de largura original e vão principal de 15 metros. A ponte, constituída por um sistema estrutural em vigas, necessitou de ampliação e foi alargada com adição de novas vigas e reforçada com o aumento da seção transversal dos pilares existentes. O gabarito foi alargado para 5,60m e dimensionado de acordo com o Trem-tipo classe 30, adotando-se para tal um sistema estrutural de 8 vigas pré-moldadas em concreto armado convencional, em

toda a obra. Nas figuras 27 e 28, respectivamente, pode-se observar a ponte original e durante a execução do alargamento.



**Figura 27 – Vista frontal da ponte original sobre o rio Fortaleza**  
Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.



**Figura 28 – Vista frontal da ponte sobre o rio Fortaleza durante a execução de reforço e alargamento**  
Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.

#### 4.1.4 Ponte Sobre o Banhado do Rio Iguaçu

Trata-se de uma ponte localizada na BR-476 (trecho Curitiba – União da Vitória), sobre o banhado do rio Iguaçu. Possui 21 metros de extensão, 8,30 metros de largura original e vão de 7,9 metros. O gabarito foi alargado para 16,30m e dimensionado de acordo com o Trem-tipo classe 45, adotando-se para tal um sistema estrutural com 4 vigas pré-moldadas em concreto armado convencional. Ainda, a meso e infraestrutura foram reforçadas com perfis metálicos. Nas Figuras 29 e 30, respectivamente, pode-se observar a ponte durante a execução do alargamento e após a finalização do mesmo.



**Figura 29 – Vista lateral da ponte sobre o banhado do rio Iguaçu durante a execução do alargamento**

**Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.**



**Figura 30 – Vista frontal da ponte sobre o banhado do rio Iguaçu após a execução do alargamento**

**Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.**

#### 4.1.5 Ponte Sobre o Rio Passa Dois

Trata-se de uma ponte localizada na BR-476 (trecho Curitiba – União da Vitória), sobre o rio Passa Dois. Possui 23,50 metros de extensão, 8,30 metros de largura original e vão de 16,0 metros. O gabarito foi alargado para 13,0 m, adotando-se um sistema estrutural com 4 vigas pré moldadas em concreto armado convencional. A meso e infraestrutura foram reforçadas com 12 perfis metálicos e, além disso, foi feito o reforço estrutural das longarinas existentes por meio do aumento de suas seções transversais. Nas Figuras 31 e 32, respectivamente, pode-se observar a vista frontal e lateral da ponte original.



**Figura 31 – Vista frontal da ponte original sobre o rio Passa Dois**  
**Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.**



**Figura 32 – Vista lateral da ponte original sobre o rio Passa Dois**  
**Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.**

#### 4.1.6 Ponte Sobre o Rio Água Amarela I

Trata-se de uma ponte localizada na BR-476 (trecho Curitiba – União da Vitória), sobre o rio Água Amarela I. Possui 22,40 metros de extensão, 8,30 metros de largura original e vão de 14,90 metros. O gabarito foi alargado para 13,0 metros, adotando-se um sistema estrutural com 4 vigas pré moldadas em concreto armado convencional. A meso e infraestrutura foram reforçadas com 12 perfis metálicos e, além disso, foi feito o reforço estrutural das longarinas existentes por meio do aumento de suas seções transversais. Nas Figuras 33 e 34, respectivamente, pode-se observar a vista frontal e lateral da ponte alargada e reforçada.



**Figura 33 – Vista frontal da ponte alargada sobre o rio Água Amarela I**  
Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.



**Figura 34 – Vista lateral da ponte alargada sobre o rio Água Amarela I**  
Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.

#### 4.1.7 Ponte Sobre o Rio Água Amarela II

Trata-se de uma ponte localizada na BR-476 (trecho Curitiba – União da Vitória), sobre o rio Água Amarela II. Possui 14,00 metros de extensão, 8,30 metros de largura original e vão de 9,35 metros. O gabarito foi alargado para 13,0 metros, adotando-se um sistema estrutural com 4 vigas pré moldadas em concreto armado convencional. A meso e infraestrutura foram reforçadas com 12 perfis metálicos e, além disso, foi feito o reforço estrutural das longarinas existentes por meio do aumento de suas seções transversais. Nas Figuras 35 e 36, respectivamente, pode-se observar a vista frontal e lateral da ponte alargada e reforçada.





**Figura 35 – Vista frontal da ponte alargada sobre o rio Água Amarela II**  
Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.



**Figura 36 – Vista lateral da ponte alargada sobre o rio Água Amarela II**  
Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.

#### 4.1.8 Ponte Sobre o Rio Vargem Grande

Trata-se de uma ponte localizada na BR-476 (trecho Curitiba – União da Vitória), sobre o rio Vargem Grande. Possui 20,00 metros de extensão, 8,25 metros de largura original e vão de 15,90 metros. O gabarito foi alargado para 13,0 metros, adotando um sistema estrutural com 4 vigas pré moldadas em concreto armado convencional. A meso e infraestrutura foram reforçadas com 12 perfis metálicos e, além disso, foi feito o reforço estrutural das longarinas existentes por meio do aumento de suas seções transversais. Nas Figuras 37 e 38, respectivamente, pode-se observar a vista frontal e lateral da ponte alargada e reforçada.



**Figura 37 – Vista frontal da ponte alargada sobre o rio Vargem Grande**  
Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.



**Figura 38 – Vista lateral da ponte alargada sobre o rio Vargem Grande**  
Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.

#### 4.1.9 Ponte Sobre o Rio Maciel

Trata-se de uma ponte localizada na BR-476 (trecho Curitiba – União da Vitória), sobre o rio Maciel. Possui 12,20 metros de extensão, 8,25 metros de largura original e vão de 12,00 metros. O gabarito foi alargado para 13,0 m, adotando-se um sistema estrutural com 4 vigas pré moldadas em concreto armado convencional. A meso e infraestrutura foram reforçadas com 12 perfis metálicos e, além disso, foi feito o reforço estrutural das longarinas existentes por meio do aumento de suas seções transversais. Nas Figuras 39 e 40, respectivamente, pode-se observar a ponte alargada.



**Figura 39 – Vista frontal da ponte alargada sobre o rio Maciel**  
**Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.**



**Figura 40 – Vista lateral da ponte alargada sobre o rio Maciel**  
**Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.**

#### 4.1.10 Ponte Sobre o Rio Espingarda

Trata-se de uma ponte localizada na BR-476 (trecho Curitiba – União da Vitória), sobre o rio Espingarda. Possui 85 metros de extensão, 10,4 metros de largura original e vãos de 7,95 metros. O gabarito será alargado para 12,75 metros, adotando-se um sistema estrutural com 2 vigas pré moldadas em concreto protendido. Nas Figuras 41 e 42, respectivamente, pode-se observar a vista frontal e inferior da ponte original.



**Figura 41 – Vista frontal da ponte original sobre o rio Espingarda**  
Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.



**Figura 42 – Vista inferior da ponte original sobre o rio Espingarda**  
Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.

#### 4.1.11 Ponte Sobre o Rio Macacos

Trata-se de uma ponte localizada na BR-476 (trecho Curitiba – União da Vitória), sobre o rio Macacos. Possui 12,80 metros de extensão, 8,08 metros de largura original e vão de 11,40 metros. O gabarito será alargado para 12,75 metros, adotando-se um sistema estrutural com 2 vigas pré moldadas em concreto armado. Nas Figuras 43 e 44, respectivamente, pode-se observar a vista frontal e lateral da ponte original.



**Figura 43 – Vista frontal da ponte original sobre o rio Macacos**  
Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.



**Figura 44 – Vista lateral da ponte original sobre o rio Macacos**  
Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.

#### 4.1.12 Ponte Sobre o Rio Lajeado

Trata-se de uma ponte localizada na BR-476 (trecho Curitiba – União da Vitória), sobre o rio Lajeado. Possui 15,00 metros de extensão, 8,60 metros de largura original e vão de 9,15 metros. O gabarito foi alargado para 12,75 metros, adotando-se um sistema estrutural com 2 vigas pré moldadas em concreto armado. Nas Figuras 45 e 46, respectivamente, pode-se observar a vista frontal e lateral da ponte original.



**Figura 45 – Vista frontal da ponte original sobre o rio Lajeado**  
Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.



**Figura 46 – Vista lateral da ponte original sobre o rio Lajeado**  
Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.

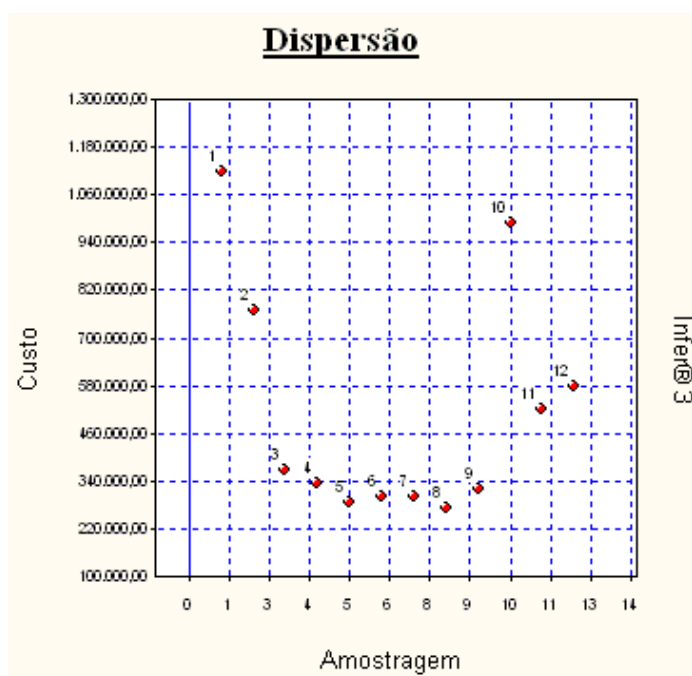
#### 4.2 MODELAGEM DE DADOS: VERIFICAÇÃO DOS PRESSUPOSTOS DE REGRESSÃO

Após a inserção das variáveis da amostra no INFER® 32 foram realizadas três combinações entre as 15 funções de transformação que podem ser aplicadas sobre cada uma das variáveis. Em cada combinação foi realizado o processamento e então selecionado o melhor modelo dentre os 50 oferecidos pelo *software*. A configuração dos critérios estatísticos estabelecidos no programa é a seguinte:

- Regressores testados a um nível de significância de 5,00%;

- Critério de identificação de *outlier*: Intervalo de +/- 2,00 desvios padrões em torno da média;
- Intervalos de confiança de 80,0% para os valores estimados.

O gráfico da variável dependente apresentado na Figura 47 indica como os valores referentes ao custo das OAEs que compõe a amostra estão distribuídos. Observou-se que em grande parte das pontes o custo de reforço e alargamento está na faixa de 270 a 380 mil reais, apesar disso, com os valores das pontes 1, 2, 10, 11 e 12 foi possível aumentar a amplitude da análise.



**Figura 47 – Gráfico de dispersão dos elementos**  
**Fonte: INFER 32®.**

A seguir são apresentadas as análises dos pressupostos de regressão linear múltipla que satisfizeram os modelos A, B e C selecionados após um primeiro processamento. Em seguida, será escolhido dentre os três para ser analisado e ajustado, o modelo que melhor representou a amostra.

#### a) Modelo A

Na primeira combinação foi configurada a pesquisa de modelos padrão do INFER® 32 com as seguintes funções: proporcional (x), logarítmica (Ln (x)) e inversa

(1/x). Após o processamento foi escolhida a equação número 1 disponibilizada pelo programa, pois apresentou os maiores coeficientes de correlação (r) e determinação ( $r^2$ ).

Na Tabela 01 observam-se os valores obtidos, juntamente com o valor da estatística t de Student para respectivo coeficiente de correlação. O coeficiente  $r^2$  ajustado significa que aproximadamente 99,37% da variação dos valores dos custos pode ser explicada pelo conjunto de variáveis independentes selecionadas no modelo.

**Tabela 01 – Valores estatísticos correspondentes ao modelo A**

| <b>Correlação do Modelo A</b>         |   |
|---------------------------------------|---|
| Coeficiente de correlação (r)         | 0,9994  |
| Valor t calculado                     | 41,82   |
| Valor t tabelado (t crítico)          | 1,886 (para o nível de significância de 20,0 %) |
| Coeficiente de determinação ( $r^2$ ) | 0,9989  |
| Coeficiente $r^2$ ajustado            | 0,9937  |

Fonte: Adaptado de INFER 32®.

A normalidade foi verificada através da frequência relativa dos resíduos padronizados nos intervalos e respectivas probabilidades da distribuição normal. A Tabela 02 mostra como os resíduos estão distribuídos percentualmente, comparando com a distribuição normal, portanto nesse quesito os resultados foram satisfatórios. Além disso, nenhuma amostragem foi encontrada fora do critério de identificação de *outlier*, portanto não existem *outliers* no modelo escolhido.

**Tabela 02 – Distribuição dos resíduos normalizados do modelo A**

| <b>Intervalo</b> | <b>Distribuição de Gauss</b> | <b>% de Resíduos no Intervalo</b> |
|------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| -1; +1           | 68,3 %                       | 91,67 %                           |
| -1,64; +1,64     | 89,9 %                       | 100,00 %                          |
| -1,96; +1,96     | 95,0 %                       | 100,00 %                          |

Fonte: Adaptado de INFER 32®.

No modelo “A” a variável independente “Tipo de concreto aplicado nas vigas do alargamento” não foi considerada uma regressora e foi inutilizada pelo programa.



A equação escolhida que descreve a relação entre o custo de reforço e alargamento e as variáveis independentes é:

- $\text{Custo} = - 60,6580 \times 10^6 - 8314750 / [\text{Largura Inicial}] - 682834 / [\text{Razão de alargamento}] + 6113988 \times \text{Ln} ([\text{N}^\circ \text{ de Linhas de Apoio}]) + 11822 \times [\text{Extensão Total}] + 1,7248 \times 10^7 \times \text{Ln} ([\text{Idade da Estrutura}]) - 193439 \times [\text{No de Vigas}] + 6498520 \times [\text{Tipo das vigas do alargamento}] - 27955 \times [\text{Tipologia da Estrutura}] - 3411167 \times \text{Ln} ([\text{Reforço Estrutural}])$

A significância do modelo é determinada através da análise da variância. O INFER 32® a calcula através do teste F de Snedecor. Como o F calculado (194,3) é maior que o F tabelado (19,38), aceita-se a hipótese de existência de regressão pois essa condição está satisfeita. A significância do modelo é igual a 0,5%, quanto menor a significância menor a probabilidade de se cometer erros na análise.

A significância individual dos regressores também foi analisada. O programa realizou o teste da hipótese bicaudal (significância de 5%), para cada coeficiente da equação de regressão. A variável correspondente é importante para o modelo caso o t calculado seja maior que o t crítico (4,3027). Conforme a Tabela 03, pode-se observar que o único caso em que o t calculado foi menor que o t crítico foi na variável “Tipologia da Estrutura”.

Consequentemente, a variável apresentou o nível de significância maior do que o limite de 5% não estando em conformidade com as hipóteses estabelecidas, portanto ela não é importante para o modelo e deve ser retirada do mesmo na análise final.

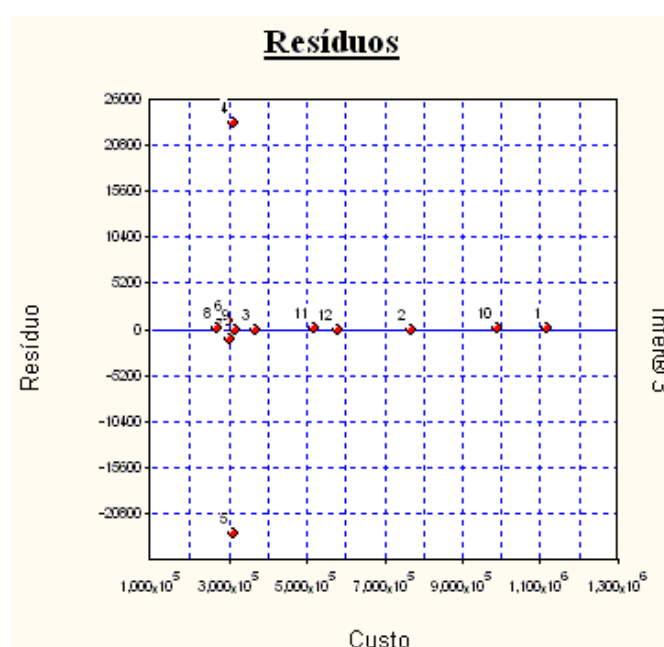
**Tabela 03 – Significância dos Regressores do modelo A**

| Variável                      | Coefficiente | t Calculado | Significância          | Aceito |
|-------------------------------|--------------|-------------|------------------------|--------|
| Largura Inicial               | b1           | -93,96      | 1,1x10 <sup>-2</sup> % | Sim    |
| Razão de alargamento          | b2           | -9,812      | 1,0%                   | Sim    |
| Nº de Linhas de Apoio         | b3           | 193,4       | 2,7x10 <sup>-3</sup> % | Sim    |
| Extensão Total                | b4           | 39,76       | 0,06%                  | Sim    |
| Idade da Estrutura            | b5           | 203,7       | 2,4x10 <sup>-3</sup> % | Sim    |
| Nº de Vigas                   | b6           | -78,97      | 1,6x10 <sup>-2</sup> % | Sim    |
| Tipo das vigas do alargamento | b7           | 266,7       | 1,4x10 <sup>-3</sup> % | Sim    |
| Tipologia da Estrutura        | b8           | -2,047      | 18%                    | Não    |
| Reforço Estrutural            | b9           | -304,1      | 1,1x10 <sup>-3</sup> % | Sim    |

Fonte: INFER 32®.

Através do gráfico dos resíduos *versus* valores estimados pela regressão, observado na Figura 48, foi possível observar que o modelo não satisfaz a condição de homocedasticidade, pois não apresentou uma nuvem de pontos distribuídos de maneira aleatória. Isso significa que os coeficientes de regressão são afetados pelos valores extremos das variáveis independentes, acarretando em perturbações na estimativa do custo.

A inexistência da autocorrelação dos erros também pode ser avaliada pelo gráfico de resíduos *versus* valor estimado da Figura 48. Como não existe tendência dos pontos esta condição está satisfeita.



**Figura 48 – Gráfico de resíduos X valor estimado (modelo A)**

Fonte: INFER 32®

Os valores das correlações entre as variáveis independentes e a dependente estão apresentados na Tabela 04. É desejável que a variável dependente tenha uma correlação com as independentes alta (próximo a 1, em módulo). No caso analisado, novamente a variável “Tipologia da Estrutura” apresenta um resultado insatisfatório, confirmando que deve ser retirada do modelo.

Por último, foram analisados os cálculos das correlações entre as variáveis independentes que constam na Tabela 05. Foi utilizado o teste t das correlações parciais, cujo valor apresentado para as variáveis independentes entre si devem ser menores que o coeficiente t tabelado (1,886). Conforme indicado na tabela, apenas

as variáveis independentes “Nº de Vigas” e “Tipo das vigas do alargamento” são fortemente correlacionadas, podendo apresentar multicolinearidade.

**Tabela 04 – Correlações parciais do modelo A**

|                                      | <b>Custo</b> |
|--------------------------------------|--------------|
| <b>Custo</b>                         | 1,0000       |
| <b>Largura Inicial</b>               | -0,3055      |
| <b>Razão de alargamento</b>          | 0,3420       |
| <b>Nº de Linhas de Apoio</b>         | 0,3777       |
| <b>Extensão Total</b>                | 0,6052       |
| <b>Idade da Estrutura</b>            | 0,2728       |
| <b>Nº de Vigas</b>                   | 0,3962       |
| <b>Tipo das vigas do alargamento</b> | 0,6478       |
| <b>Tipologia da Estrutura</b>        | 0,0664       |
| <b>Reforço Estrutural</b>            | 0,9128       |

Fonte: INFER 32®.

No entanto, há coerência nesse caso de elevada correlação, pois os tipos das vigas do alargamento influenciam no número total de vigas solução estrutural. Sendo assim, o modelo ainda é satisfatório.

**Tabela 05 – Teste t das correlações parciais do modelo A**

|                                   | <b>X1</b> | <b>X2</b> | <b>X3</b> | <b>X4</b> | <b>X5</b> | <b>X6</b> | <b>X7</b> | <b>X8</b> | <b>X9</b> |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Custo</b>                      | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         |
| <b>Largura Inicial</b>            | ∞         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         |
| <b>Razão de Alargamento</b>       | -0,9190   | ∞         | -         | -         | -         | -         | -         | -         | -         |
| <b>Nº de Linhas de Apoio</b>      | 0,5770    | 0,3420    | ∞         | -         | -         | -         | -         | -         | -         |
| <b>Extensão Total</b>             | 0,3170    | 0,6010    | 1,7610    | ∞         | -         | -         | -         | -         | -         |
| <b>Idade da Estrutura</b>         | -0,202    | 0,7450    | -0,185    | 0,7260    | ∞         | -         | -         | -         | -         |
| <b>Nº de Vigas</b>                | 0,3720    | -0,8320   | -0,1      | 0,3820    | 0,2091    | ∞         | -         | -         | -         |
| <b>Tipo das Vigas do Alargame</b> | -0,3060   | -0,4630   | -0,185    | 0,1000    | -0,129    | 1,9150    | ∞         | -         | -         |
| <b>Tipologia da Estrutura</b>     | -0,3180   | 0,2404    | 0,2689    | -0,193    | -0,3730   | -0,9910   | -0,3730   | ∞         | -         |
| <b>Reforço Estrutural</b>         | -0,4870   | 0,7320    | 0,5780    | 1,6750    | 0,8660    | 0,6550    | 0,8660    | -0,139    | ∞         |

Fonte: INFER® 32.

Em que:

X1 = Largura inicial; X2 = Razão de alargamento; X3 = Nº de linhas de apoio; X4 = Extensão total; X5 = Idade da estrutura; X6 = Nº de vigas; X7 = Tipo das vigas do alargamento; X8 = Tipologia da estrutura; X9 = Reforço estrutural.

## b) Modelo B

Na segunda combinação foi configurada a pesquisa de modelos do INFER® 32 com as seguintes funções: logarítmica ( $\ln(x)$ ), inversa ( $1/x$ ), raiz quadrada ( $x^{1/2}$ ), exponencial ( $e^x$ ) e exponencial negativa ( $e^{-x}$ ). Após o processamento foi escolhida a equação número 1 disponibilizada pelo programa, pois apresentou os maiores coeficientes de correlação ( $r$ ) e determinação ( $r^2$ ).

Na Tabela 06 observam-se os valores obtidos, juntamente com o valor da estatística  $t$  de Student para respectivo coeficiente de correlação. O coeficiente  $r^2$  ajustado significa que aproximadamente 99,87% da variação dos valores dos custos pode ser explicada pelo conjunto de variáveis independentes selecionadas no modelo.

**Tabela 06 – Valores estatísticos correspondentes ao modelo B**

| Correlação do Modelo B                |   |
|---------------------------------------|---|
| Coeficiente de correlação ( $r$ )     | 0,9999  |
| Valor $t$ calculado                   | 91,9  |
| Valor $t$ tabelado ( $t$ crítico)     | 1,886 (para o nível de significância de 20,0 %) |
| Coeficiente de determinação ( $r^2$ ) | 0,9998  |
| Coeficiente $r^2$ ajustado            | 0,9987  |

Fonte: Adaptado de INFER 32®.

A normalidade foi verificada através da frequência relativa dos resíduos padronizados nos intervalos e respectivas probabilidades da distribuição normal. A Tabela 07 mostra como os resíduos estão distribuídos percentualmente, comparando com a distribuição normal, portanto nesse quesito os resultados foram satisfatórios. Além disso, nenhuma amostragem foi encontrada fora do critério de identificação de *outlier*, portanto não existem *outliers* no modelo escolhido.

**Tabela 07 – Distribuição dos resíduos normalizados do modelo B**

| Intervalo    | Distribuição de Gauss | % de Resíduos no Intervalo |
|--------------|-----------------------|----------------------------|
| -1; +1       | 68,3 %                | 91,67 %                    |
| -1,64; +1,64 | 89,9 %                | 100,00 %                   |
| -1,96; +1,96 | 95,0 %                | 100,00 %                   |

Fonte: Adaptado de INFER 32®.

No modelo B a variável independente “Tipo das vigas do alargamento” não foi considerada um regressor e foi inutilizada pelo programa. A equação escolhida que descreve a relação entre o custo de reforço e alargamento e as variáveis independentes é:

- $\text{Custo} = (6,4413 \times 10^{18} + 1,9478 \times 10^{18} \times \text{Exp}(-[\text{Largura Inicial}]) + 4,0112 \times 10^{14} / [\text{Razão de alargamento}] - 1,1344 \times 10^{16} \times \text{Exp}([\text{N}^\circ \text{ de Linhas de Apoio}]) - 9,2666 \times 10^{19} \times \text{Exp}(-[\text{Extensão Total}]) - 1,8610 \times 10^{18} \times \text{Ln}([\text{Idade da Estrutura}]) + 6,4687 \times 10^{14} / [\text{N}^\circ \text{ de Vigas}] - 2,3219 \times 10^{13} \times [\text{Tipologia da Estrutura}] + 5,3515 \times 10^{17} \times [\text{Tipo de Concreto Aplicado}] - 1,5327 \times 10^{18} \times \text{Exp}(-[\text{Reforço Estrutural}]))^{1/2}$

A significância do modelo é determinada através da análise da variância. O INFER 32® a calcula através do teste F de Snedecor do modelo. Como o F calculado (938,4) é maior que o F tabelado (19,38), aceita-se a hipótese de existência de regressão pois essa condição está satisfeita. A significância do modelo é igual a 0,11%, e quanto menor a significância menor a probabilidade de se cometer erros na análise.

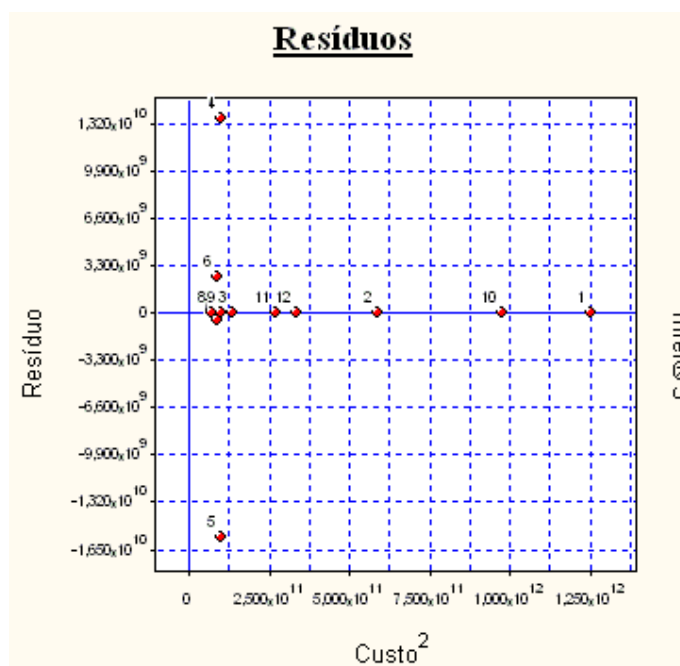
A significância individual dos regressores também foi analisada. O programa realizou o teste da hipótese bicaudal (significância de 5%), para cada coeficiente da equação de regressão. A variável correspondente é importante para o modelo caso o t calculado seja maior que o t tabelado (4,3027). Conforme a Tabela 08 pode-se observar que todas as variáveis são importantes para o modelo.

**Tabela 08 – Significância dos Regressores do modelo B**

| Variável                  | Coefficiente | t Calculado             | Significância           | Aceito |
|---------------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|--------|
| Largura Inicial           | b1           | 9,695x10 <sup>6</sup>   | 1,1x10 <sup>-12</sup> % | Sim    |
| Razão de alargamento      | b2           | 9435                    | 1,1x10 <sup>-6</sup> %  | Sim    |
| Nº de Linhas de Apoio     | b3           | -36,402x10 <sup>6</sup> | 7,5x10 <sup>-14</sup> % | Sim    |
| Extensão Total            | b4           | -17119                  | 3,4x10 <sup>-7</sup> %  | Sim    |
| Idade da Estrutura        | b5           | -35,971x10 <sup>6</sup> | 7,7x10 <sup>-14</sup> % | Sim    |
| Nº de Vigas               | b6           | 21586                   | 2,1x10 <sup>-7</sup> %  | Sim    |
| Tipologia da Estrutura    | b7           | -2783                   | 1,3x10 <sup>-5</sup> %  | Sim    |
| Tipo de Concreto Aplicado | b8           | 3,596x10 <sup>7</sup>   | 7,7x10 <sup>-14</sup> % | Sim    |
| Reforço Estrutural        | b9           | -56,397x10 <sup>6</sup> | 3,1x10 <sup>-14</sup> % | Sim    |

Fonte: INFER 32®.

Através do gráfico dos resíduos *versus* valores estimados pela regressão, observado na Figura 49, foi possível observar que o modelo não satisfaz a condição de homocedasticidade, pois não apresentou uma nuvem de pontos distribuídos de maneira aleatória. Isso significa que os coeficientes de regressão são afetados pelos valores extremos das variáveis independentes, acarretando em perturbações na estimativa do custo.



**Figura 49 – Gráfico de resíduos X valor estimado (modelo B)**  
**Fonte: INFER 32®.**

A inexistência da autocorrelação dos erros também pode ser avaliada pelo gráfico de resíduos versus valor estimado da Figura 48. Como não existe tendência dos pontos esta condição está satisfeita.

Os valores das correlações entre as variáveis independentes e a dependente estão apresentados na Tabela 09. É desejável que a variável dependente tenha uma correlação com as independentes alta (próximo a 1, em módulo). No caso analisado, apenas as variáveis “Tipo de concreto aplicado no alargamento” e “Reforço estrutural” satisfazem esse quesito.

Por último, foram analisados os cálculos das correlações entre as variáveis independentes que constam na Tabela 10. Utilizou-se o teste t das correlações parciais, cujo valor apresentado para as variáveis independentes entre si devem ser menores que o coeficiente t tabelado (1,886).

**Tabela 09 – Correlações parciais do modelo B**

|                           | <b>Custo</b> |
|---------------------------|--------------|
| Custo                     | 1,0000       |
| Largura Inicial           | -0,1685      |
| Razão de alargamento      | 0,2772       |
| Nº de Linhas de Apoio     | 0,4574       |
| Extensão Total            | -0,0587      |
| Idade da Estrutura        | 0,1970       |
| Nº de Vigas               | -0,0116      |
| Tipologia da Estrutura    | 0,0200       |
| Tipo de Concreto Aplicado | -0,7241      |
| Reforço Estrutural        | -0,9114      |

Fonte: INFER 32®.

Conforme indicado na Tabela 10, nenhuma variável é fortemente correlacionada, portanto o modelo é satisfatório, pois não apresenta multicolinearidade.

**Tabela 10 – Teste t das correlações parciais do modelo B**

|                                  | X1     | X2                    | X3     | X4     | X5     | X6     | X7     | X8    | X9 |
|----------------------------------|--------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|----|
| <b>Custo</b>                     | -      | -                     | -      | -      | -      | -      | -      | -     | -  |
| <b>Largura Inicial</b>           | ∞      | -                     | -      | -      | -      | -      | -      | -     | -  |
| <b>Razão de Alargamento</b>      | -0,863 | ∞                     | -      | -      | -      | -      | -      | -     | -  |
| <b>Nº de Linhas de Apoio</b>     | 0,2493 | 0,655                 | ∞      | -      | -      | -      | -      | -     | -  |
| <b>Extensão Total</b>            | -0,142 | 2,643x10 <sup>-</sup> | -0,182 | ∞      | -      | -      | -      | -     | -  |
| <b>Idade da Estrutura</b>        | -0,132 | 0,745                 | -0,162 | -0,144 | ∞      | -      | -      | -     | -  |
| <b>Nº de Vigas</b>               | -0,515 | 0,843                 | 0,588  | 0,897  | -0,368 | ∞      | -      | -     | -  |
| <b>Tipologia da Estrutura</b>    | -0,371 | 0,2404                | 0,42   | 0,614  | -0,373 | 1,515  | ∞      | -     | -  |
| <b>Tipo de Concreto Aplicado</b> | 0,133  | 0,463                 | 0,1623 | 0,1443 | 0,1291 | 0,683  | 0,373  | ∞     | -  |
| <b>Reforço Estrutural</b>        | 0,2569 | -0,732                | -0,753 | 0,28   | -0,866 | 0,1875 | 0,1387 | 0,866 | ∞  |

Fonte: INFER 32®.

Em que:

X1 = Largura inicial; X2 = Razão de alargamento; X3 = Nº de linhas de apoio; X4 = Extensão total; X5 = Idade da estrutura; X6 = Nº de vigas; X7 = Tipologia da estrutura; X8 = Tipo de concreto aplicado; X9 = Reforço estrutural.

### c) Modelo C

Na terceira e última combinação foi configurada a pesquisa de modelos do INFER® 32 com as seguintes funções: proporcional (x), logarítmica (Ln(x)), inversa (1/x), exponencial (e<sup>x</sup>) e 1/Quadrática (1/x<sup>2</sup>). Após o processamento foi escolhida a

equação número 1 disponibilizada pelo programa, pois apresentou os maiores coeficientes de correlação ( $r$ ) e determinação ( $r^2$ ).

Na Tabela 11 observam-se os valores obtidos, juntamente com o valor da estatística  $t$  de Student para respectivo coeficiente de correlação. O coeficiente  $r^2$  ajustado significa que aproximadamente 98,74% da variação dos valores dos custos pode ser explicada pelo conjunto de variáveis independentes selecionadas no modelo.

**Tabela 11 – Valores estatísticos correspondentes ao modelo C**

| <b>Correlação do Modelo C</b>         |   |
|---------------------------------------|---|
| Coeficiente de correlação ( $r$ )     | 0,9994  |
| Valor $t$ calculado                   | 29,57   |
| Valor $t$ tabelado ( $t$ crítico)     | 3,078 (para o nível de significância de 20,0 %) |
| Coeficiente de determinação ( $r^2$ ) | 0,9989  |
| Coeficiente $r^2$ ajustado            | 0,9874  |

Fonte: Adaptado de INFER 32®.

A normalidade foi verificada através da frequência relativa dos resíduos padronizados nos intervalos e respectivas probabilidades da distribuição normal. A Tabela 12 mostra como os resíduos estão distribuídos percentualmente, comparando com a distribuição normal, portanto nesse quesito os resultados foram satisfatórios. Além disso, nenhuma amostragem foi encontrada fora do critério de identificação de outlier, portanto não existem outliers no modelo escolhido.

**Tabela 12 – Distribuição dos resíduos normalizados do modelo C**

| <b>Intervalo</b> | <b>Distribuição de Gauss</b> | <b>% de Resíduos no Intervalo</b> |
|------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| -1; +1           | 68,3 %                       | 100,00 %                          |
| -1,64; +1,64     | 89,9 %                       | 100,00 %                          |
| -1,96; +1,96     | 95,0 %                       | 100,00 %                          |

Fonte: Adaptado de INFER 32®.

No modelo C todas as variáveis foram considerados regressores pelo programa. A equação escolhida que descreve a relação entre o custo de reforço e alargamento e as variáveis independentes é:



- $\text{Custo} = -10,4033 \times 10^8 + 22,150 \times \text{Exp}([\text{Largura Inicial}]) + 34118 \times \text{Exp}([\text{Razão de alargamento}]) + 1817431 \times \text{Exp}([\text{N}^\circ \text{ de Linhas de Apoio}]) + 11822 \times [\text{Extensão Total}] + 3,0990 \times 10^8 \times \text{Ln}([\text{Idade da Estrutura}]) - 8026,6 \times \text{Exp}([\text{N}^\circ \text{ de Vigas}]) + 1,3668 \times 10^9 \times [\text{Tipo das vigas do alargamento}] - 28575 \times [\text{Tipologia da Estrutura}] - 2,2350 \times 10^7 \times [\text{Tipo de Concreto Aplicado}] - 1672924 \times \text{Exp}([\text{Reforço Estrutural}])$

A significância do modelo é determinada através da análise da variância. O INFER 32® a calcula através do teste F de Snedecor do modelo. Como o F calculado (87,44) é menor que o F tabelado (241,9), rejeita-se a hipótese de existência de regressão, pois essa condição não foi satisfeita. A significância do modelo é igual a 8,3%, sendo maior que o nível máximo de 5% estabelecido.

A significância individual dos regressores também foi analisada. O programa realizou o teste da hipótese bicaudal (significância de 5%), para cada coeficiente da equação de regressão. A variável correspondente é importante para o modelo caso o t calculado seja maior que o t crítico (6,3138), conforme a Tabela 13 pode-se observar que o t calculado foi menor que o t crítico foi nas variáveis “Razão de Alargamento” e “Tipologia da Estrutura”.

Conseqüentemente, tais variáveis apresentaram um nível de significância maior do que o limite de 5% não estando em conformidade com as hipóteses estabelecidas, portanto não são importantes para o modelo e deve ser retirada do mesmo na análise final.

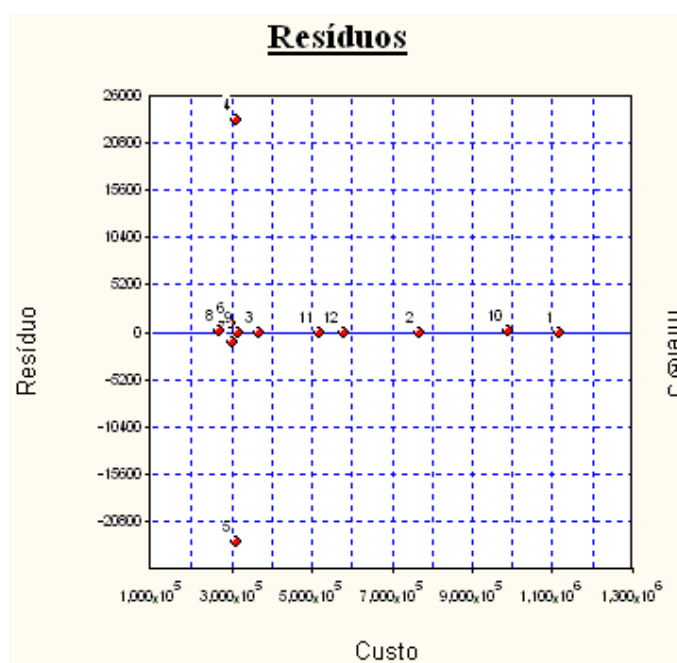
**Tabela 13 – Significância dos Regressores do modelo C**

| Variável                      | Coefficiente | t Calculado | Significância          | Aceito |
|-------------------------------|--------------|-------------|------------------------|--------|
| Largura Inicial               | b1           | 118,4       | 0,5%                   | Sim    |
| Razão de Alargamento          | b2           | 5,203       | 12%                    | Não    |
| Nº de Linhas de Apoio         | b3           | 2519        | $2,5 \times 10^{-2}\%$ | Sim    |
| Extensão Total                | b4           | 28,11       | 2,3%                   | Sim    |
| Idade da Estrutura            | b5           | 2588        | $2,5 \times 10^{-2}\%$ | Sim    |
| Nº de Vigas                   | b6           | -37844      | $1,7 \times 10^{-3}\%$ | Sim    |
| Tipo das Vigas do Alargamento | b7           | 39671       | $1,6 \times 10^{-3}\%$ | Sim    |
| Tipologia da Estrutura        | b8           | -1,479      | 38%                    | Não    |
| Tipo de Concreto Aplicado     | b9           | -648,7      | 0,10%                  | Sim    |
| Reforço Estrutural            | b10          | -3947       | $1,6 \times 10^{-2}\%$ | Sim    |

Fonte: INFER 32®.

Através do gráfico dos resíduos *versus* valores estimados pela regressão, observado na Figura 50, foi possível observar que o modelo não satisfaz a condição de homocedasticidade, pois não apresentou uma nuvem de pontos, ou seja, distribuídos de maneira aleatória. Isso significa que os coeficientes de regressão são afetados pelos valores extremos das variáveis independentes, acarretando em perturbações na estimativa do custo.

A inexistência da autocorrelação dos erros também pode ser avaliada pelo gráfico de resíduos *versus* valor estimado da figura anterior. Como não existe tendência dos pontos esta condição está satisfeita.



**Figura 50 – Gráfico de resíduos X valor estimado (modelo C)**  
**Fonte: INFER 32®.**

Os valores das correlações entre as variáveis independentes e a dependente estão apresentados na Tabela 14. A variável dependente deve ter uma correlação com as independentes alta (próximo a 1, em módulo). No caso analisado, as variáveis “Razão de Alargamento” e “Tipologia da Estrutura” apresentam um resultado insatisfatório, confirmando que devem ser retiradas do modelo.

Por último, foram analisadas as correlações entre as variáveis independentes. Foi utilizado o teste t das correlações parciais, cujo valor apresentado para as variáveis independentes entre si devem ser menores que o coeficiente t tabelado (3,078).

Tabela 14 – Correlações parciais do modelo C

|                                      | <b>Custo</b> |
|--------------------------------------|--------------|
| <b>Custo</b>                         | 1,0000       |
| <b>Largura Inicial</b>               | 0,7620       |
| <b>Razão de alargamento</b>          | -0,2025      |
| <b>Nº de Linhas de Apoio</b>         | 0,4628       |
| <b>Extensão Total</b>                | 0,6052       |
| <b>Idade da Estrutura</b>            | 0,2728       |
| <b>Nº de Vigas</b>                   | 0,6465       |
| <b>Tipo das vigas do alargamento</b> | 0,6478       |
| <b>Tipologia da Estrutura</b>        | 0,0664       |
| <b>Tipo de Concreto Aplicado</b>     | -0,6478      |
| <b>Reforço Estrutural</b>            | 0,9128       |

Fonte: INFER 32®.

Conforme indicado na Tabela 15, as variáveis independentes “Largura inicial” e “Nº de vigas”, “Largura inicial” e “Tipo das vigas do alargamento”, “Nº de vigas” e “Tipo das vigas do alargamento”, “Nº de Vigas” e “Tipo de concreto aplicado” são fortemente correlacionadas, acarretando na multicolinearidade do modelo. Além disso, as variáveis “Tipo das vigas do alargamento” e “Tipo de concreto aplicado” não são independentes. Sendo assim, neste critério, novamente rejeita-se a hipótese de que há regressão.

Tabela 15 – Teste t das correlações parciais do modelo C

|                                      | X1                      | X2      | X3      | X4      | X5      | X6       | X7      | X8      | X9     | X10 |
|--------------------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|--------|-----|
| <b>Custo</b>                         | -                       | -       | -       | -       | -       | -        | -       | -       | -      | -   |
| <b>Largura Inicial</b>               | ∞                       | -       | -       | -       | -       | -        | -       | -       | -      | -   |
| <b>Razão de Alargamento</b>          | 0,1665                  | ∞       | -       | -       | -       | -        | -       | -       | -      | -   |
| <b>Nº de Linhas de Apoio</b>         | $2,151 \times 10^{-2}$  | -0,192  | ∞       | -       | -       | -        | -       | -       | -      | -   |
| <b>Extensão Total</b>                | 0,2181                  | -0,0962 | 1,139   | ∞       | -       | -        | -       | -       | -      | -   |
| <b>Idade da Estrutura</b>            | $-5,786 \times 10^{-1}$ | -0,363  | -0,1148 | 0,513   | ∞       | -        | -       | -       | -      | -   |
| <b>Nº de Vigas</b>                   | 5,3210                  | 0,298   | -0,1122 | 0,0779  | -0,0908 | ∞        | -       | -       | -      | -   |
| <b>Tipo das Vigas do Alargamento</b> | 5,4610                  | 0,284   | -0,1148 | 0,0707  | -0,0913 | 55,6800  | ∞       | -       | -      | -   |
| <b>Tipologia da Estrutura</b>        | -0,2253                 | -0,1512 | 0,297   | -0,1364 | -0,2635 | -0,27    | -0,2635 | ∞       | -      | -   |
| <b>Tipo de Concreto Aplicado</b>     | -5,461                  | -0,284  | 0,1148  | -0,0707 | 0,0913  | -55,6800 | ∞       | 0,2635  | ∞      | -   |
| <b>Reforço Estrutural</b>            | 0,882                   | -0,297  | 0,532   | 1,184   | 0,612   | 0,61     | 0,612   | -0,0981 | -0,612 | ∞   |

Fonte: INFER® 32.

Em que:

X1 = Largura inicial; X2 = Razão de alargamento; X3 = Nº de linhas de apoio; X4 = Extensão total; X5 = Idade da estrutura; X6 = Nº de vigas; X7 = Tipo das vigas do alargamento; X8 = Tipologia da estrutura; X9 = Tipo do concreto aplicado; X10 = Reforço estrutural.

### 4.3 DISCUSSÃO E RESULTADOS

Em uma primeira análise, após o primeiro processamento, constatou-se que o modelo A foi o que melhor representou a amostra. Apesar do modelo B possuir maiores coeficientes de determinação e correlação, e menor significância, verificou-se que o modelo A apresentou melhor correlação entre os seus regressores e a variável dependente “Custo”. Isso significa que as variáveis são importantes na concepção do modelo final, confirmando a hipótese de que influenciam na estimativa do custo de reforço e alargamento. Caso o modelo B fosse escolhido, variáveis fundamentais para estimativa do custo, como extensão total, largura inicial e número de vigas do alargamento teriam que ser excluídas da análise final, diminuindo a confiabilidade do modelo. Na tabela 16 comparam-se os valores estatísticos obtidos dos três modelos.

**Tabela 16 – Comparação dos valores obtidos nos modelos A, B e C**

|   | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>C</b> |
|---|----------|----------|----------|
| Coeficiente de correlação (r)                 | 0,9994   | 0,9999   | 0,9994   |
| Valor t calculado                             | 41,82    | 91,9     | 29,57    |
| Valor t tabelado (t crítico)                  | 1,886    | 1,886    | 3,078    |
| Coeficiente de determinação (r <sup>2</sup> ) | 0,9989   | 0,9998   | 0,9989   |
| Coeficiente r <sup>2</sup> ajustado           | 0,9937   | 0,9987   | 0,9874   |

**Fonte: Adaptado de INFER 32®.**

Por sua vez, o modelo C não satisfaz alguns pressupostos da regressão linear, como nível de significância e multicolinearidade, portanto foi rejeitada a hipótese da existência de regressão linear múltipla no mesmo.

Além disso, os três modelos não atenderam ao pressuposto da homocedasticidade. No entanto, na análise do modelo final, foi feito o ajuste do mesmo para satisfazer a todos os pressupostos de regressão linear múltipla definido.

#### 4.3.1 Modelo final

Foi realizado um segundo processamento no modelo A para ajustá-lo aos itens observados na primeira análise. Com base no processamento anterior, as variáveis “Razão de alargamento” e “Idade da estrutura” foram retiradas da análise, pois apresentaram baixo coeficiente de correlação com a variável dependente. A variável “Tipologia da Estrutura” também foi excluída, pois superou o limite definido para o nível de significância, sendo assim ambas as variáveis não são importantes para a formulação do modelo.

A variável “Tipo das vigas do alargamento” que pode ser viga moldada *in loco* ou viga pré-moldada teve grande influencia no valor do custo. Para comprovar, foi realizado no INFER 32® um teste hipotético do modelo, comparando os valores dos dois tipos de viga. Para o modelo com viga moldada *in loco* o custo de reforço e alargamento estimado foi incoerente, estando muito acima da realidade. Justifica-se o ocorrido devido ao fato de haver apenas uma OAE, dentre as 12 unidades da amostra, que foi alargada com viga moldada *in loco* e em concreto protendido, a qual apresentou o maior custo da amostra. No entanto, sabe-se que a protensão é a responsável pelo encarecimento da intervenção, portanto optou-se por desconsiderar essa variável a fim de não influenciar negativamente o resultado, oferecendo maior confiabilidade ao modelo.

Finalmente, após o processamento obteve-se um coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 0,9962. Ou seja, 99,62% da variação no custo são explicadas através das variáveis utilizadas e 0,38% são explicadas por variáveis que não constam no modelo.

O modelo apresentou elevada confiabilidade, de aproximadamente 99,98%, devido ao nível de significância obtido. Quanto menor o valor, menor a probabilidade de haver cometido algum erro durante a modelagem. Além disso, a normalidade do modelo foi atestada, pois a distribuição de resíduos está de acordo com a distribuição normal. Os resultados finais da análise estatística constam na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultados da estatística

| Descrição                           | Resultado            |
|-------------------------------------|----------------------|
| <b>Dados</b>                        | 12                   |
| <b>Dados considerados</b>           | 12                   |
| <b>Variáveis</b>                    | 10                   |
| <b>Variáveis consideradas</b>       | 6                    |
| <b>Coefficiente de Correlação</b>   | 0,9981               |
| <b>Coefficiente de Determinação</b> | 0,9962               |
| <b>F Calculado</b>                  | 216,2                |
| <b>Significância do modelo</b>      | $7,2 \times 10^{-4}$ |
| <b>Distribuição dos resíduos</b>    | 83,33% - 100% - 100% |

Fonte: Adaptado de INFER 32®.

Em relação à significância dos regressores, o modelo foi satisfatório, visto que todos estão abaixo do limite de 5%, conforme valores expressos na Tabela 18.

Tabela 18 – Significância dos regressores (modelo final)

| Variável                  | Coefficiente | t Calculado | Significância          | Aceito |
|---------------------------|--------------|-------------|------------------------|--------|
| Largura Inicial           | b1           | 9,708       | $2,0 \times 10^{-2}\%$ | Sim    |
| No de Linhas de Apoio     | b2           | -8,929      | 0,03%                  | Sim    |
| Extensão Total            | b3           | -8,097      | 0,05%                  | Sim    |
| Nº de Vigas               | b4           | 23,77       | $2,5 \times 10^{-4}\%$ | Sim    |
| Tipo de Concreto Aplicado | b5           | -18,23      | $9,1 \times 10^{-4}\%$ | Sim    |
| Reforço Estrutural        | b6           | 27,80       | $1,1 \times 10^{-4}\%$ | Sim    |

Fonte: Adaptado de INFER 32®.

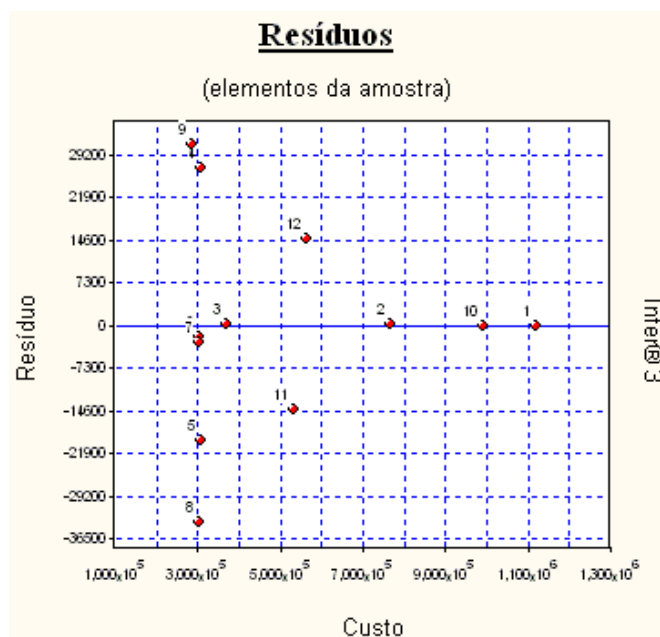
Analisando-se a correlação parcial entre as variáveis independentes e a dependente, notou-se que o tipo do concreto aplicado nas vigas do alargamento, o reforço estrutural e a extensão total da OAE possuem grande influencia na determinação do custo, conforme os valores que constam da Tabela 19.

Tabela 19 – Correlações parciais do modelo final

|                           | Custo   |
|---------------------------|---------|
| Custo                     | 1,0000  |
| Largura Inicial           | -0,3055 |
| Nº de Linhas de Apoio     | 0,4020  |
| Extensão Total            | -0,4490 |
| Nº de Vigas               | 0,0710  |
| Tipo de Concreto Aplicado | -0,6478 |
| Reforço Estrutural        | 0,9128  |

Fonte: Adaptado de INFER 32®.

Através do gráfico dos resíduos *versus* valores estimados pela regressão, exibido na Figura 51, foi possível constatar que o modelo apresentou a condição de homocedasticidade, pois os pontos estão distribuídos de maneira aleatória.



**Figura 51 – Gráfico de resíduos X valor estimado (modelo final)**  
Fonte: INFER 32®.

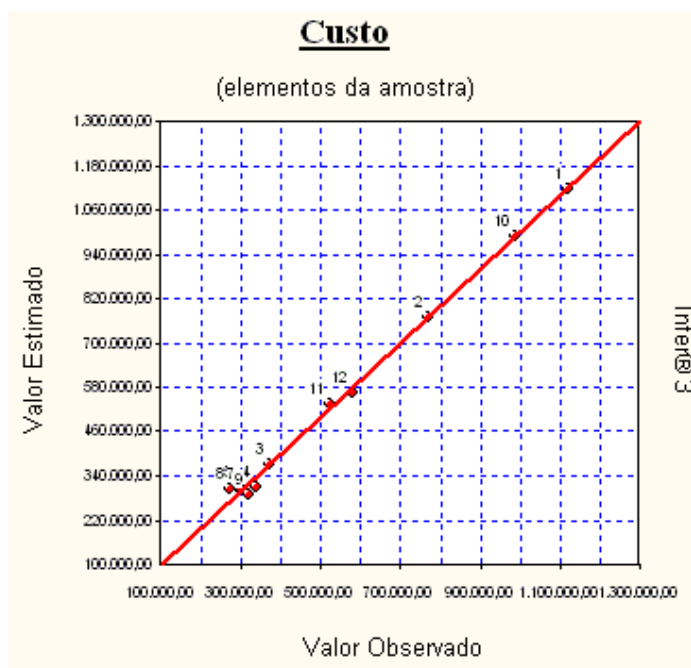
Analisando-se o mesmo gráfico da Figura 51 é possível observar a inexistência de multicolinearidade, visto que os pontos estão distribuídos de maneira aleatória e não seguem uma tendência.

Portanto, a equação de regressão linear múltipla que melhor descreveu a relação entre custo de reforço e alargamento de pontes de pequenos vãos e as variáveis independentes é:

- $\text{Custo} = 570767 + 996151 / [\text{Largura Inicial}] - 117134 \times [\text{N}^\circ \text{ de Linhas de Apoio}] - 3245514 / [\text{Extensão Total}] + 1351870 / [\text{N}^\circ \text{ de Vigas}] - 514934 \times [\text{Tipo de Concreto Aplicado}] + 167053 \times [\text{Reforço Estrutural}]$

Finalmente, de acordo com o gráfico dos valores estimados pelo modelo em função dos valores da variável dependente de cada amostragem da Figura 52, confirmou-se que a equação final obtida se adequou a amostra estudada, pois

quanto mais próximos os dois valores estiverem e mais próximo à reta, melhor o ajuste do modelo.



**Figura 52 – Gráfico de ajuste do modelo final**  
Fonte: INFER 32 ®.

#### 4.3.2 Comparação da Variável Resultado com uma OAE Contida Fora da Amostra

Foi realizada aplicação da equação obtida a uma OAE contida fora da amostra, para orientar como deve ser feito o teste de validação da equação de regressão linear múltipla. Nesse teste de validação comparou-se o resultado final ao custo de reforço e alargamento orçado, cujo quantitativo de materiais e serviços encontra-se no ANEXO A deste trabalho.

Trata-se de uma ponte localizada na BR-476 (trecho Curitiba – União da Vitória), sobre o rio Carazinho. Possui 12,20 metros de extensão e 8,10 metros de largura original. O gabarito foi alargado para 13,0 metros, adotando um sistema estrutural com 2 vigas pré-moldadas em concreto armado convencional. Foi feito o reforço estrutural das longarinas existentes por meio do aumento de suas seções transversais. Nas Figuras 53 e 54, respectivamente, pode-se observar a vista frontal e lateral da ponte original.





**Figura 53 – Vista frontal da ponte original sobre o rio Carazinho**  
Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.



**Figura 54 – Vista lateral da ponte original sobre o rio Carazinho**  
Fonte: AAD Projetos Consultoria e Engenharia.

O custo de reforço e alargamento da ponte sobre o rio Carazinho, orçado por meio do quantitativo de materiais e serviços, foi de 536.510,74 reais. Já, por meio da equação definida, estimou-se um valor de 521.509,25 reais, desse modo o erro foi de aproximadamente 3% o que caracteriza que o modelo foi bem ajustado.

Ainda, o INFER 32® determinou um intervalo de confiança de 30% para o valor estimado pela equação, sendo assim o valor mínimo obtido da análise é de 508.512,89 reais e o valor máximo é de 534.505,60 reais, estando muito próximo ao valor real.

Com essa extrapolação demonstrou-se como deveria ser aplicado o teste de validação do modelo numérico desenvolvido, já que para sua validação é necessário um número mínimo de OAEs para compor a amostra.

## 5. CONCLUSÃO

No Brasil, diversas pontes da malha rodoviária federal encontram-se desatualizadas em relação as suas dimensões transversais e ao carregamento suportado, carecendo de reforço e alargamento para readequação. Além disso, muitas estão em estado precário de conservação, necessitando urgentemente de intervenções para oferecer maior nível de conforto e segurança ao usuário. Considerando as restrições econômicas atuais, o custo tornou-se um fator fundamental no planejamento e execução dessas intervenções.

Por meio deste trabalho de conclusão de curso foi possível desenvolver um procedimento para geração de modelos numéricos que possam ser extrapolados, para estimar o custo de reforço e alargamento de pontes em concreto armado e protendido de pequenos vãos. Através deste, pretendeu-se facilitar a análise da viabilidade econômico-financeira das intervenções necessárias, a ser utilizada pelos órgãos responsáveis nas fases de planejamento e organização de investimentos.

Foi realizado um estudo de caso a fim de aplicar a metodologia desenvolvida, a qual se mostrou muito eficiente. Para a amostra analisada no estudo, com foco em pontes de concreto de pequenos vãos, foi obtida uma equação de regressão linear múltipla que apresentou 99,98% de confiabilidade. No teste de validação, o custo estimado pela equação foi muito satisfatório, visto que ficou muito próximo ao custo orçado. Sendo assim, quanto à fundamentação matemática utilizada, afirma-se que a inferência estatística é uma ótima ferramenta para análise de dados.

Em suma, pode-se concluir em relação ao modelo numérico final que:

- Todas as variáveis utilizadas apresentaram um alto índice de confiabilidade;
- O modelo apresentou poder de explicação indicando que 97% do custo das OAEs analisadas são explicados pelas variáveis independentes da equação;
- As variáveis “Tipo de concreto aplicado” e “Reforço estrutural” têm elevada correlação com a variável dependente, ou seja, possuem alta influencia sobre o custo.

Devido à amostra ser pequena algumas variáveis independentes tiveram de ser desconsideradas durante o ajuste do modelo final, caso contrário alguns pressupostos para a existência de regressão não seriam satisfeitos. A variável “Tipo de viga do alargamento” mesmo sendo importante na formação do modelo foi excluída para aumentar a confiabilidade, pois a mesma se mostrou incoerente quanto a sua influência sobre custo final. Outra variável importante excluída da análise foi a “Razão de alargamento”, visto que os valores correspondentes as OAEs são muito próximos entre si e, portanto, o programa dispensou da equação. No entanto, sabe-se que esse é um parâmetro importante e útil na estimativa do custo final.

Estas conclusões estão baseadas na amostragem utilizada, podendo em análise com outro grupo de amostragem que as variáveis se apresentem de maneira diferente e, conseqüentemente, originando modelos diferentes.

A amostra escolhida representa um grupo de OAEs com sistemas estruturais compatíveis e, portanto, a equação não pode ser extrapolada para obras com outros sistemas. Deste modo, como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se o estudo com OAEs de diferentes tipologias, tais como grandes vãos, seções caixão, estruturas metálicas, passarelas de pedestres, entre outros. Ainda, sugere-se a modelagem deste mesmo conjunto de OAEs analisadas, porém com um número mínimo de pontes a fim se obter a validação do mesmo.

Além disso, podem-se adotar outras e novas variáveis, na busca de equações cada vez mais próximas a realidade, retratando com eficiência a composição de custos de reforço e alargamento de Obras de Artes Especiais, utilizando esta ferramenta estatística.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projetos de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 7188: Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre**. Rio de Janeiro, 1984.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – **NORMA 010/2004 – PRO Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **Manual de inspeção de pontes rodoviárias**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2004.

BEBER, Andriei J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

CURCIO, Ronald C. L. **Pontes rodoviárias: Levantamento das principais patologias estruturais**. Monografia (Graduação). Universidade São Francisco. Itatiba, 2008.

DANTAS, R. A. **Engenharia de avaliações: uma introdução à metodologia científica**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1998.

EL DEBS, M. K; TAKEYA, T. **Introdução às pontes de concreto**. Texto de apoio à disciplina de pontes. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BETÓN. **Structural Concrete: Textbook on behavior, design and performance, Bulletins 1, 2, 3**. Laussane, 1999.

GIOVANNETTI, Ana Carolina V. P. **Avaliação do estado de conservação de pontes – estudo de caso**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

GUIMARÃES, Paulo R. B. **Apostila da disciplina inferência estatística I**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2003.

HELENE, Paulo R. L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1992.

LENCIONI, Julia W. **Proposta de manual para inspeção de pontes e viadutos em Concreto Armado – Discussão sobre a influência dos fatores ambientais na degradadação de obras-de-arte especiais**. Tese (Mestrado). Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, 2005.

MARQUES, J. M. **Estatística – Curso de Engenharia**. Universidade Federal do Paraná, 2000.

MANUAL DO INFER 32, Ária informática, 2004.

MASON, J. **Pontes em concreto armado e protendido**. Rio de Janeiro: LTC, 1977.

MENDES, P.T.C **Contribuição para um modelo de gestão de pontes de concreto aplicado à rede de rodovias brasileiras**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

MENDONÇA, M.C. **Fundamentos de avaliações patrimoniais e perícias de engenharia**. Curso Básico do IMAPE. São Paulo: Pini, 1998.

MICHAEL, Rosemeri. **Avaliação em massa de imóveis com uso de inferência estatística e análise de superfície de tendência**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

MÜLLER, Ricardo. **Critérios para o planejamento e execução de recuperações estruturais em pontes e viadutos rodoviários no estado do Paraná**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.

NADAL, Carlos A. **Avaliação de imóveis pelo método dos mínimos quadrados**. 1. Ed. Curitiba: Departamento de Geomática – UFPR, 2008.

NÓR FILHO, Nelson N. **Engenharia de Avaliações**. São Paulo: Pini, 2008.

OLIVEIRA, Caroline B. L; CALIXTO, José M. F. **Análise da Eficácia de Métodos de Reforço em Ponte Rodoviária de Concreto Armado – Estudo de Caso, VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas**. Rio de Janeiro: ABECE, 2014.

PELLI NETO, A. **Curso de engenharia de avaliação imobiliária – Fundamentos e aplicação da estatística Inferencial**. Belo Horizonte, 2003.

PFEIL, Walter. **Pontes: Curso Básico: Projetos, construção e manutenção**. Rio de Janeiro: Campus, 1983.

SAHUINCO, Melquiades H. C. **Utilização de métodos não destrutivos e semi-destrutivos na avaliação de pontes de concreto**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

SANTOS, José Manuel M. N. dos. **Avaliação da Integridade Estrutural de Pontes em Betão - o caso da Ponte Nossa Senhora da Guia**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2008.

SANTOS FILHO, M. L. **Patologia das estruturas: notas de aula**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2001.

SARTURI, Francis D. M. **Simulação computacional de estruturas de concreto reforçadas com aço e compósitos de fibra de carbono**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

SARTORIS, A. **Estatística e introdução a econometria**. São Paulo: Saraiva, 2003.

SAYDAM, D.; FRANGOPOL, D. M. **Time-dependent performance indicators of damaged bridge superstructures**. USA: Elsevier Journal, 2011.

SERAFIM, Maria Clara S. **Análise de políticas públicas para infraestrutura de transporte no Brasil a partir da década de 90**. Monografia (Bacharelado). Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2009.

SHIMAKURA, Silvia E. **Bioestatística Avançada I**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

SOUZA, V. C, de; RIPPER T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

TEJEDOR, Cristina M. **Patologias, recuperação e reforço com protensão externa em estruturas de pontes**. Projeto (Graduação). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

TCU – TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO, **Orientações para elaboração de planilhas orçamentárias de obras públicas**. Brasília, 2014.

TRIVELLONI, C. A. P. **Metodologia para avaliação em massa de apartamentos por inferência estatística e técnicas de análise multivariada – Uma análise exploratória**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1998.

VITÓRIO, José A. P. **Vistorias, Conservação e Gestão de Pontes e Viadutos de Concreto, 48º Congresso Brasileiro do Concreto**. Rio de Janeiro: IBRACON, 2006.

\_\_\_\_\_. **Avaliação do grau de risco estrutural de pontes rodoviárias em concreto, 50º Congresso Brasileiro do Concreto**. Rio de Janeiro: IBRACON, 2008.

\_\_\_\_\_. **Um estudo comparativo sobre métodos de alargamento de pontes rodoviárias de concreto armado, com a utilização das normas brasileiras e Eurocódigos**. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2013.

\_\_\_\_\_. ;BARROS, Rui M. C. de **Análise paramétrica de projetos de alargamento e reforço de pontes rodoviárias de concreto armado, XXXV Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural**. Rio de Janeiro: ASAAE, 2012.

## ANEXO A – Quantitativos de serviços e materiais

| QUANTITATIVO DE MATERIAIS E SERVIÇOS - PONTE SOBRE O RIO CARAZINHO |                 |            |                |                       |
|--|-----------------|------------|----------------|-----------------------|
| DISCRIMINAÇÃO  | UNIDADE         | QUANTIDADE | CUSTO UNITÁRIO | CUSTO TOTAL           |
| <b>1. RECUPERAÇÃO E REFORÇO DA ESTRUTURA EXISTENTE</b>             |                 |            |                |                       |
| 1.1 Remoção de Revestimento em CBUQ                                | m <sup>3</sup>  | 6,13       | R\$ 12,78      | R\$ 78,37             |
| 1.2 Execução de Corte no Concreto com Prof. De 2,5 cm              | m               | 52         | R\$ 14,61      | R\$ 759,72            |
| 1.3 Demolição de Dispositivos em Concreto Armado                   | m <sup>3</sup>  | 5,57       | R\$ 539,75     | R\$ 3.005,33          |
| 1.4 Plataforma de Trabalho Apoiada                                 | m <sup>2</sup>  | 97,2       | R\$ 24,46      | R\$ 2.377,51          |
| 1.5 Limpeza e Tratamento de Armadura Oxidada                       | m <sup>2</sup>  | 13         | R\$ 19,50      | R\$ 253,50            |
| 1.6 Fornecimento e Aplicação de Grout para Reparos                 | m <sup>3</sup>  | 0,65       | R\$ 33,56      | R\$ 21,81             |
| 1.7 Apicoamento de Superfície de Concreto                          | m <sup>2</sup>  | 13         | R\$ 27,00      | R\$ 351,00            |
| 1.8 Limpeza de Superfícies com Jato de Água Fria com Alta Pressão  | m <sup>2</sup>  | 13         | R\$ 6,29       | R\$ 81,77             |
| 1.9 Aço CA-50 - Forn, dobr e colocação                             | kg              | 2430       | R\$ 9,87       | R\$ 23.984,10         |
| 1.10 Concreto C30 - Preparo, lançamento e cura                     | m <sup>3</sup>  | 14,58      | R\$ 396,72     | R\$ 5.784,18          |
| 1.11 Forma de placa compensada plastificada                        | m <sup>2</sup>  | 48,6       | R\$ 60,85      | R\$ 2.957,31          |
| <b>2. INFRA-ESTRUTURA</b>  |                 |            |                |                       |
| 2.1 Execução de Estacas Raiz d=31 cm em solo                       | m               | 64         | R\$ 516,08     | R\$ 33.029,12         |
| 2.2 Execução de Estacas Raiz d=31 cm em rocha                      | m               | 64         | R\$ 1.108,70   | R\$ 70.956,80         |
| 2.3 Escavação Manual de Cavas em Mat de 1a cat                     | m <sup>3</sup>  | 12,48      | R\$ 59,26      | R\$ 739,56            |
| 2.4 Confecção e lançamento de lastro de concreto magro             | m <sup>3</sup>  | 1,2        | R\$ 312,92     | R\$ 375,50            |
| 2.5 Formas de placa compensada resinada                            | m <sup>2</sup>  | 50,4       | R\$ 57,78      | R\$ 2.912,11          |
| 2.6 Concreto C30 - Preparo, lançamento e cura                      | m <sup>3</sup>  | 13,44      | R\$ 396,72     | R\$ 5.331,92          |
| 2.7 Aço CA-50 - Forn, dobr e colocação                             | kg              | 1612,8     | R\$ 9,87       | R\$ 15.918,34         |
| <b>3. MESO-ESTRUTURA</b>   |                 |            |                |                       |
| 3.1 Forma de placa compensada plastificada                         | m <sup>2</sup>  | 228,9      | R\$ 60,85      | R\$ 13.929,59         |
| 3.2 Concreto C30 - Preparo, lançamento e cura                      | m <sup>3</sup>  | 81,7       | R\$ 396,72     | R\$ 32.410,06         |
| 3.3 Aço CA-50 - Forn, dobr e colocação                             | kg              | 16339,0    | R\$ 9,87       | R\$ 161.266,01        |
| 3.4 Aparelho de Apoio de Elastômero Fretado                        | dm <sup>3</sup> | 42,4       | R\$ 41,58      | R\$ 1.762,99          |
| <b>4. SUPERESTRUTURA</b>   |                 |            |                |                       |
| 4.1 Escoramento de Madeira (Cimbramento)                           | m <sup>3</sup>  | 334,8      | R\$ 57,94      | R\$ 19.398,31         |
| 4.2 Forma de placa compensada plastificada                         | m <sup>2</sup>  | 119,7      | R\$ 60,85      | R\$ 7.283,75          |
| 4.3 Forma de placa compensada resinada                             | m <sup>2</sup>  | 20,16      | R\$ 57,78      | R\$ 1.164,84          |
| 4.4 Concreto C30 - Preparo, lançamento e cura                      | m <sup>3</sup>  | 27,9       | R\$ 396,72     | R\$ 11.068,49         |
| 4.5 Concreto C25 - Preparo, lançamento e cura                      | m <sup>3</sup>  | 36,3       | R\$ 376,80     | R\$ 13.673,32         |
| 4.6 Aço CA-50 - Forn, dobr e colocação                             | kg              | 10911,96   | R\$ 9,87       | R\$ 107.701,05        |
| <b>5. SERVIÇOS COMPLEMENTARES</b>                                  |                 |            |                |                       |
| 5.1 Drenos PVC D=100mm - Forn. E colocação                         | unid            | 8          | R\$ 20,39      | R\$ 163,12            |
| 5.2 Revestimento de CBUQ sobre a Ponte                             | m <sup>3</sup>  | 10,5       | R\$ 69,47      | R\$ 729,44            |
| 5.3 Pintura com Tinta Mineral Impermeável                          | m <sup>2</sup>  | 194,4      | R\$ 18,20      | R\$ 3.538,08          |
| <b>TOTAL</b>   |                 |            |                | <b>R\$ 536.510,74</b> |