



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CAMPUS DO SERTÃO  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LETÍCIA BEZERRA QUEIROZ

**USO DO MÉTODO ANOVA PARA ANÁLISE DE ESTRUTURAS DE PONTES**

DELMIRO GOUVEIA

2019

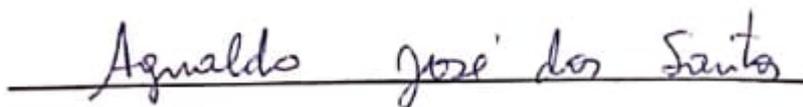
LETÍCIA BEZERRA QUEIROZ

**USO DO MÉTODO ANOVA PARA ANÁLISE DE ESTRUTURAS DE PONTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Alagoas, Campus do Sertão.

Orientador: Dr. Marcelo Felisberto de Lima

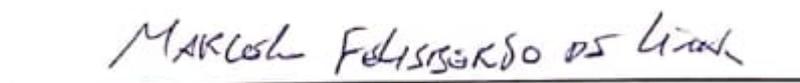
Aprovado em 17 de abril de 2019.



---

Prof. Dr. Agnaldo José dos Santos

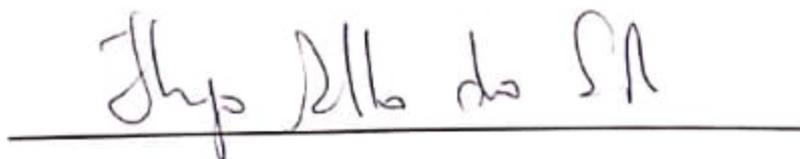
Universidade Federal de Alagoas



---

Prof. Dr. Marcelo Felisberto de Lima

Universidade Federal de Alagoas



---

Prof. Dr. Thiago Alberto da Silva Pereira

Universidade Federal de Alagoas

DELMIRO GOUVEIA

2019

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca do Campus Sertão**  
**Sede Delmiro Gouveia**

Bibliotecária responsável: Renata Oliveira de Souza – CRB-4/2209

Q3u Queiroz, Leticia Bezerra

Uso do método anova para análise de estruturas de pontes / Leticia  
Bezerra Queiroz. – 2019.  
65 f. : il.

Orientação: Prof. Dr. Marcelo Felisberto de Lima.  
Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de  
Alagoas. Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2019.

1. Pontes. 2. Avaliação estrutural. 3. Análise estrutural. 4. Estados  
Unidos. I. Título

CDU: 624.21(72)

A autora gostaria de reconhecer o apoio financeiro fornecido pelo Governo Brasileiro através do Ministério da Educação, pelo Programa Brasileiro de Mobilidade Científica, o Ciência sem Fronteiras. Os conteúdos aqui discutidos baseiam-se unicamente nas observações científicas feitas pela autora usando fontes de dados disponíveis publicamente, e outras partes envolvidas, direta ou indiretamente, não são responsáveis pelo seu conteúdo.

À Deus e ao Universo, em tudo dai graças.

Ao professor Dr. Yail Jimmy Kim, por toda a paciência e orientação. Ao professor Marcelo Felisberto de Lima por toda colaboração durante o desenvolvimento desse trabalho. Aos meus pais, Vera e José, e à minha família, pelo apoio e amor incondicional. À minha irmã e amiga Lívia, por ser de sempre e para sempre. Ao meu namorado Filipe, por todo incentivo e companheirismo. Sem vocês a realização desse sonho não seria possível.

Construímos muros demais e pontes de menos.

Isaac Newton

## RESUMO

Esse trabalho apresenta uma análise de dados da classificação de pontes rodoviárias construídas nos Estados Unidos. Um enorme conjunto de dados compreendendo 1.002.172 decks e superestruturas de pontes foi desenvolvido baseado no Inventário Nacional de Pontes (*National Bridge Inventory*, NBI), divididos entre quatro zonas de serviço como o especificado para design de pontes pela Associação Norte-Americana de Especialistas Rodoviários e de Transporte (*American Association of State Highway Transportation Officials*, AASHTO) Projeto de Fator de Carga e Resistência (*Load and Resistance Factor Design*, LRFD). A classificação da condição das partes das pontes foi examinada estatística e probabilisticamente, em conjunto com o efeito do tráfego ao qual essas pontes são expostas e ao ambiente em que elas estão inseridas (considerando por exemplo frequência de chuvas e variação de temperatura). A caracterização estatística das partes indica que superestruturas de concreto são predominantes nas zonas 1, 2, e 3 (79%, 72% e 85%, respectivamente), assim como superestruturas de aço e madeira representam respectivamente 51% e 21% da zona 4. As pontes construídas nas zonas 1 e 3 estão expostas a um alto carregamento gerado pelo fluxo de tráfego na região quando comparadas às zonas 2 e 4. O efeito térmico é notável nas zonas 1 e 4. Foi observado também que a deterioração do deck da ponte se desenvolve rapidamente nos primeiros anos de construção da estrutura, e se estabiliza com o tempo devido aos esforços investidos em reparo e manutenção. De acordo com uma análise de variância envolvendo dois fatores, a seleção adequada do tipo estrutural melhora a performance e aumenta a longevidade da ponte. A probabilidade de deterioração das pontes construídas nas zonas 1 e 3 é maior do que aquela nas pontes das zonas 2 e 4.

**Palavras-chave:** Base de dados, pontes, avaliação, performance, estruturas.

## ABSTRACT

This paper presents Big Data analytics on the condition evaluation of highway bridges in the United States. A large dataset comprising 1,002,172 bridge decks and superstructures is constructed, based on the National Bridge Inventory (NBI), and categorized into four service zones as specified in the American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO) Load and Resistance Factor Design (LRFD) Bridge Design Specifications. The condition rating of the bridge members is examined statistically and probabilistically, in conjunction with the effect of traffic and environment (i.e., temperature and precipitation). The statistical characterization of the members indicates that concrete-based superstructures are predominant in Zones 1, 2, and 3 (79%, 72%, 85%, respectively), whereas steel- and timber-based superstructures account for 51% and 21% in Zone 4, respectively. The bridges in Zones 1 and 3 are subjected to significantly high traffic-induced loading relative to those in Zones 2 and 4. Thermal loading is noticeable in Zones 1 and 4. It is observed that the deterioration of bridge decks rapidly develops at the bridges' early service life, and stabilizes with time owing to maintenance and repair efforts. According to a two-factor analysis of variance, adequate selection of structural types dependent upon service environments enhances the performance and longevity of constructed bridges. The likelihood of deterioration of bridges constructed in Zones 1 and 3 is higher than that of the bridges in Zones 2 and 4.

**Keywords:** Big Data; bridge; evaluation; performance; structures.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Zonas de Serviço .....	18
Figura 2 – Dados de pontes ordenados por ano de construção (zona 1, 2014) .....	21
Figura 3 – Dados de pontes ordenados por ano de construção (zona 2, 2014) .....	21
Figura 4 – Dados de pontes ordenados por ano de construção (zona 3, 2014) .....	22
Figura 5 – Dados de pontes ordenados por ano de construção (zona 4, 2014) .....	22
Figura 6 – Dados de pontes por tipo de decks e superestruturas (zona 1, 2014).....	28
Figura 7 – Dados de pontes por tipo de decks e superestruturas (zona 2, 2014).....	29
Figura 8 – Dados de pontes por tipo de decks e superestruturas (zona 3, 2014).....	29
Figura 9 – Dados de pontes por tipo de decks e superestruturas (zona 4, 2014).....	30
Figura 10 – Partes componentes da estrutura de uma ponte.....	32
Figura 11 – Volume de tráfego médio diário por zona de serviço .....	35
Figura 12 – Volume de tráfego médio diário por ponte .....	36
Figura 13 – Variação de temperatura nas capitais dos estados por zona de serviço .....	37
Figura 14 – Média mensal de precipitação nas capitais dos estados por zona de serviço.....	37
Figura 15 – Média dos decks por anos de construção e inspeção .....	39
Figura 16 – Média das superestruturas por anos de construção e inspeção .....	40
Figura 17 – Classificação de deck de acordo com o ano de construção.....	41
Figura 18 – Classificação de superestruturas de acordo com o ano de construção .....	41
Figura 19 – Gradiente dos decks de acordo com o ano de construção .....	42
Figura 20 – Gradiente das superestruturas de acordo com o ano de construção .....	43
Figura 21 – Médias de classificação dos decks de acordo com o tipo de estrutura.....	44
Figura 22 – Médias de classificação das superestruturas de acordo com o tipo de estrutura...	44
Figura 23 – Distribuição de F a 5% .....	49
Figura 24 – Demonstração de F e $F_{0,05}$ ; região crítica.....	49
Figura 25 – Análise de variância para classificação de decks e superestruturas .....	50
Figura 26 – Análise de variância para classificação da superestrutura por ano de inspeção ...	51
Figura 27 – Estatísticas de F ( $F_{0,05} = 3.92$ ).....	53
Figura 28 – Identificando a distribuição de probabilidade .....	54
Figura 29 – Variação da classificação da superestrutura por ano de construção .....	55
Figura 30 – Probabilidade de performance da superestrutura por ano de construção.....	55
Figura 31 – Estimativa do domínio de degradação .....	57

Figura 32 – Efeito do ano de inspeção no fator taxa de degradação para decks .....	57
Figura 33 – Efeito do ano de inspeção no fator taxa de degradação para superestruturas .....	58
Figura 34 – Fator de degradação do deck nas zonas individuais.....	59
Figura 35 – Fator de degradação da superestrutura nas zonas individuais.....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de pontes de acordo com Inventario Nacional de Pontes (NBI) .....	17
Tabela 2 – Tipos de decks e superestruturas .....	19
Tabela 3 – Quantitativo de dados de pontes .....	20
Tabela 4 – Porcentagens por tipo de material.....	31
Tabela 5 - Equações ANOVA .....	48
Tabela 6 – Classificação de condição de superestruturas da Califórnia (ANOVA).....	52
Tabela 7 – Estatísticas de F ( $F_{0.05} = 3.92$ ) .....	52

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....	13
2. BASE DE DADOS .....	16
2.1 CÓDIGO DO INVENTÁRIO NACIONAL DE PONTES .....	16
2.2 QUANTITATIVO DE DADOS .....	20
3. MATERIAIS E ESTRUTURAS .....	24
3.1 TIPOS DE MATERIAL .....	24
3.1.1 Histórico do Concreto .....	25
3.1.2 Histórico do Aço .....	26
3.1.3 Histórico da Madeira .....	27
3.2 PORCENTAGENS E UTILIZAÇÃO .....	28
3.3 ESTRUTURAS DE PONTES .....	31
3.3.1 Ponte Suspensa .....	33
3.3.2 Ponte Estaiada .....	33
3.3.3 Ponte de Treliça .....	33
3.3.4 Ponte Cantiléver .....	34
4. AMBIENTE DE SERVIÇO .....	35
4.1 TRÁFEGO DIÁRIO MÉDIO .....	35
4.2 TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO .....	36
5. CLASSIFICAÇÃO DE CONDIÇÃO .....	39
5.1 CLASSIFICAÇÃO POR ANO DE CONSTRUÇÃO .....	39
5.2.1 Gradiente de Classificação .....	42
5.3 CLASSIFICAÇÃO POR TIPO ESTRUTURAL .....	43
6. ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) .....	46
6.1 DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO .....	50
6.2 MODELAGEM DE DEGRADAÇÃO .....	53

6.2.1 Distribuição da Probabilidade .....	54
6.2.2 Taxa de Degradação .....	56
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	61
8. REFERÊNCIAS .....	63

## 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O surgimento de uma abordagem de análise deu início a uma nova era que trata sobre lidar com problemas complexos utilizando um banco de dados substancialmente grande, o que vem a auxiliar uma análise preditiva para uma tomada de decisões eficientes (Hassanien et al. 2015). Examinando conjuntos de dados massivos, relações científicas entre variáveis de interesse independentes e dependentes podem ser estabelecidas (por exemplo, ambiente de serviço e desempenho da ponte, respectivamente).

Um enorme banco de dados pode ser gerado utilizando a engenharia de pontes. Os desafios associados com a criação desse enorme e complexo banco de dados incluem caracterização do significado físico dos dados compilados e a extração de informações importantes que agreguem valor à comunidade. O Inventário Nacional de Pontes (*National Bridge Inventory*, NBI) é uma compilação de dados de pontes adquiridos de todos os Departamentos de Transportes Estaduais (*Departments of Transportation*, DOTs). Com o auxílio do NBI, dados de uma ampla variedade de pontes em diferentes condições são armazenados e atualizados periodicamente.

O NBI determinou uma escala de classificação de pontes que vai de zero à nove, sendo nove a melhor condição da estrutura, e zero a pior. Vários projetos de pesquisas foram conduzidos utilizando a base de dados construída pelo NBI. Mishalani and Madanat (2002) desenvolveram um modelo de observação estocástica usando 1.460 observações de pontes nas condições de avaliação em escalas 7 e 8. Os parâmetros considerados foram os esforços gerados devido ao tráfego, tipos estruturais, ano de construção da ponte, classe da rodovia, meio ambiente ao qual a ponte estava exposta e os tipos de superfície de desgaste. O método de modelagem proposto tenta superar as limitações técnicas relacionadas à distribuição de probabilidade de uma variável aleatória discreta baseando-se na condição da estrutura de ponte analisada. Os processos mecânicos foram encontrados como sendo fator primário que degradam pontes em um estado de condição 7. Bolukbasi *et al.* (2004) realizaram uma análise de regressão com as classificações de condição de 2.601 pontes em Illinois. As curvas ajustadas mostraram que uma diminuição na classificação de condição de 9 (Excelente) a 4 (Insuficiente) levou cerca de 35-45 anos. Kim e Yoon (2010) identificaram fatores que influenciam a deterioração de pontes em regiões frias. Uma abordagem única consistindo de regressão múltipla e tecnologia de sistema de informação geográfica foi empregada para avaliar o desempenho de 5.289 pontes

em Dakota do Norte. A degradação dessas pontes foi afetada pelo volume de tráfego, pela ação do tempo e pela presença da água. Pontes de concreto se apresentaram mais duráveis do que pontes de aço em um ambiente de região fria. Nasrollahi e Washer (2015) examinaram estatisticamente os dados do NBI para estimar intervalos de inspeção para pontes construídas. A distribuição de dados de 4.270 superestruturas de ponte em Oregon foi avaliada usando um teste de hipóteses chamado método de Anderson-Darling, e utilizando esse método foi possível prever a probabilidade de deterioração para três tipos de superestrutura. Verificou-se que a classificação tempo-condição para as superestruturas foi maior do que os atuais intervalos de inspeção de 24 meses.

Este trabalho aborda um estudo intensivo de dados sobre a avaliação da condição de pontes construídas nos Estados Unidos, com foco nas tendências de deterioração e no desenvolvimento do modelo correspondente. Mais de um milhão de dados foram coletados, categorizados e analisados para avaliar de forma abrangente o desempenho dos membros das pontes. O estado de condição local dos membros individuais é consolidado para identificar seus padrões globais de resposta para domínios geográficos específicos. Uma estrutura de pesquisa de três etapas foi empregada: acesso ao NBI e extração dos dados relevantes para o escopo atual do trabalho, processamento de dados para explorar a cinética das classificações de condição de pontes, e interpretação técnica para elucidar a significância física dos dados compilados, incluindo os modelos de degradação de desempenho dos membros de pontes *in situ*. A condição das subestruturas está fora do interesse da investigação atual, porque elas são geralmente muito mais duráveis que as superestruturas e os decks.

Metodologias de avaliação existentes usando os dados do NBI concentram-se em componentes de pontes individuais, o que pode não ser suficiente para utilizar completamente os dados acumulados. A fusão de dados locais do NBI coletados independentemente pode fornecer informações globais sobre o desempenho de pontes distribuídas espacialmente. Com base na interpretação de dados estatísticos heterogêneos adquiridos de quatro diferentes regiões do país, a presente pesquisa tenta compreender a complexa cinética de degradação das pontes construídas. Outro interesse é a interação entre múltiplos fatores que influenciam a classificação da condição dos membros da ponte. A compilação de mais de um milhão de membros de pontes amplia o limite restringido (e regionalmente tendencioso) da pesquisa de engenharia de pontes existente.

Ao analisar o volume de dados compilados, associados ao desempenho de pontes, o conhecimento considerado anteriormente como disperso é integrado para gerar informações

práticas, que podem auxiliar os profissionais de forma geral no planejamento, gerenciamento e operação da infraestrutura rodoviária. A complexidade inerente latente na grande quantidade de dados do NBI para classificação de condição e sua interação com os atributos que contribuem para esse ranking de classificação (por exemplo, tipos estruturais e as zonas de construção) são caracterizados probabilisticamente para examinar a taxa de degradação das pontes construídas.

O desenvolvimento desse estudo será importante para a proposta de criação de uma base de dados, permitindo o acompanhamento remoto das estruturas estudadas, além da possibilidade de prever o comportamento dessa estrutura dentro de um espaço de tempo definido. O tópico se apresenta importante não só para conhecimento acadêmico, como também para os órgãos responsáveis por construção e manutenção de estruturas de pontes. O tema levantado surge baseado no modelo norte americano de construção de dados de estruturas de pontes, o NBI. A partir da coleta e classificação desses dados foi possível utilizar equações que demonstram a degradação da ponte ao longo do tempo, como também prever o comportamento da estrutura com base em fatores como tráfego e temperatura. O desenvolvimento desse modelo se apresenta de grande viabilidade, uma vez que consegue descrever o comportamento de uma ponte, facilitando e incentivando sua manutenção. Outra razão que suporta a viabilidade do estudo é a falta de literatura específica na área. A análise proposta por este trabalho resulta em inúmeras vantagens que não são obtidas nas observações existentes com um número limitado de amostras de dados, dada a tendência atual da cinética de dados, a interação entre parâmetros constituintes em uma escala global e a previsão de eventos futuros. Assim, o estudo contribui com o conhecimento geral a respeito de estruturas de pontes.

## 2. BASE DE DADOS

A classificação de pontes é feita considerando uma análise da estrutura de forma geral. Todas as partes são avaliadas por meio da vistoria para que a estrutura receba a classificação final. De acordo com o código do NBI, estruturas de pontes representam o maior investimento dentre todos os elementos do sistema rodoviário e deficiências nessa estrutura representam uma redução no investimento original. Além disso, e ainda mais importante, deficiências na estrutura de uma ponte podem representar o maior risco de todas as falhas potenciais nas rodovias: a perda de vidas.

Os departamentos estaduais de transporte, agências locais e outros proprietários de pontes enfrentam desafios significativos para atender às necessidades quando há uma infraestrutura envelhecida. Devido a fundos limitados e maior competição por recursos entre os ativos rodoviários, o desafio em questão é preservar e manter as pontes de maneira econômica para suportar a mobilidade geral das rodovias. No entanto, ter uma abordagem de ‘pior primeiro’ para o gerenciamento de pontes, concentrando-se apenas na substituição de pontes pobres, ignorando as necessidades de manutenção de pontes boas, é ineficiente e proibitivo em termos de custos a longo prazo. Um programa de pontes de sucesso procura uma abordagem equilibrada para a preservação e reabilitação ou substituição.

### 2.1 CÓDIGO DO INVENTÁRIO NACIONAL DE PONTES

Um dos dados a ser considerado para o teste das hipóteses é a classificação de situação das pontes. Anualmente os inspetores técnicos responsáveis fazem o levantamento dos dados e a classificação das pontes de acordo com a condição dos membros de sua estrutura. Essa classificação é estipulada pelo Inventário Nacional de Pontes (*National Bridge Inventory* – NBI). As pontes inspecionadas são classificadas com valores que variam de zero (0) a nove (9), sendo zero o menor valor, significando falha total da estrutura, e nove o maior valor, significando estrutura em perfeitas condições de funcionamento. Vale ressaltar que cada ponte é visitada de dois em dois anos, porém o levantamento dos dados é feito de forma anual, sendo trabalhado um rodízio entre as estruturas para que cada ponte seja atendida no período necessário, garantindo a segurança e manutenção da estrutura. Baseada no código do NBI, a tabela 1 detalha informações a respeito da classificação de condição das pontes.

Tabela 1 – Classificação de pontes de acordo com Inventário Nacional de Pontes (NBI)

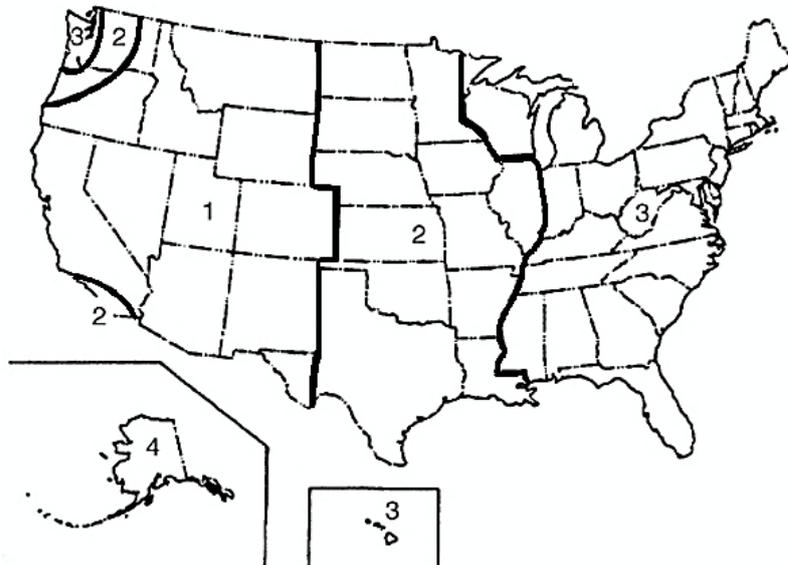
Classificação	Condição	Descrição
N	Não se aplica	Classificação não se aplica.
9	Excelente	Os elementos da ponte se encontram em excelentes condições.
8	Muito bom	Nenhum problema notável.
7	Bom	Alguns pequenos problemas.
6	Satisfatório	Elementos estruturais mostram uma pequena deterioração.
5	Razoável	Todos os elementos estruturais primários são sólidos, mas podem sofrer perda de seção, rachaduras, fragmentação ou erosão.
4	Insuficiente	Perda avançada de seção da ponte, deterioração, fragmentação ou erosão.
3	Péssima	A perda de seção, a deterioração, a fragmentação ou a erosão afetaram seriamente os componentes estruturais primários. Falhas locais são possíveis. Fissuras por fadiga em aço ou fissuras por cisalhamento no concreto podem estar presentes.
2	Crítica	Deterioração avançada de elementos estruturais primários. Fissuras por fadiga em aço ou trincas de cisalhamento no concreto podem estar presentes ou a erosão pode ter danificado o suporte da subestrutura. A menos que seja monitorada de perto, pode ser necessário fechar a ponte até que sejam tomadas ações corretivas.
1	Falha eminente	Grande deterioração ou perda de seção presente em componentes estruturais críticos, ou ainda movimento vertical ou horizontal afetando a estabilidade da estrutura. A ponte está fechada ao tráfego, mas a ação corretiva pode recolocar a ponte em serviço, a um tráfego leve.
0	Falha total	Fora de serviço.

Fonte: Código NBI (2016)

O desempenho dos membros das pontes foi avaliado seguindo a escala de classificação de condição de nove pontos do NBI. Reconhece-se que as pontes classificadas como quatro e abaixo de quatro são categorizadas como estruturalmente deficientes, exigindo grandes ações técnicas, como a reabilitação.

As pontes estão ainda divididas em quatro zonas de serviço, que foram determinadas geograficamente considerando como fatores primários a variação de temperatura e a umidade. O órgão responsável pela divisão das zonas é a Associação Norte Americana de Especialistas Rodoviários e de Transporte (AASHTO). Abaixo, a figura 1 ilustra as zonas de serviço.

Figura 1 – Zonas de Serviço



Fonte: AASHTO, Design de Pontes (2010)

Foram escolhidos dois estados representando cada zona, com exceção da zona 4, que possui apenas um estado. A escolha se baseou em termos de representatividade do estado dentro da zona, considerando a quantidade de pontes e também a variação média de temperatura na capital de cada estado. Os estados escolhidos foram:

- Zona 1: Califórnia e Colorado
- Zona 2: Illinois e Minnesota
- Zona 3: Flórida e Havaí
- Zona 4: Alasca

De acordo com as quatro zonas de gradiente de temperatura especificadas na AASHTO, dois estados representativos por zona (exceto a Zona 4, que tem apenas um estado) foram

selecionados. Os dados das pontes em cada zona foram descentralizados, sem interação mútua. Por exemplo, as pontes construídas na Zona 1 não estão necessariamente sujeitas às condições de tráfego e de carga ambiental aplicadas àquelas na Zona 4, e a deterioração das pontes na Zona 2 não influencia a operação das pontes na Zona 3. Portanto, as classificações de condição registradas no NBI representam, independentemente, a resposta característica de pontes nas respectivas zonas (isto é, agrupamento exclusivo do ponto de vista de análise de dados).

A Tabela 2 lista os tipos desses membros de ponte em conjunto com os números de item e as designações de código do NBI.

Tabela 2 – Tipos de decks e superestruturas

Código	Descrição	
	Tipo de Superestrutura (NBI – Item 43)	Tipo de Deck (NBI – Item 107)
1	Concreto	Concreto moldado in loco
2	Concreto contínuo	Concreto pré-moldado
3	Aço	Grade aberta
4	Aço contínuo	Grade fechada
5	Concreto protendido	Chapa de aço
6	Concreto protendido contínuo	Aço corrugado
7	Madeira	Alumínio
8	Alvenaria	Madeira
9	Alumínio, ferro forjado ou ferro fundido	Concreto protendido
10	Outros	Outros

Fonte: Código NBI (2016)

Os metadados do NBI foram extraídos para criar arquivos de dados separados, necessários para analisar eficientemente o desempenho das pontes consideradas com identificadores únicos subsequentes: ano construído (Código NBI, Item 27), tráfego diário médio (Código NBI, Item 29), tipos e condições de superestrutura (Código NBI, Itens 43 e 59, respectivamente) e tipos e condições de deck (Código NBI, Itens 107 e 58, respectivamente). Todos os dados foram processados para estabelecer padrões cinéticos no desempenho da ponte. Diferentemente do caso da análise de dados descritivos, o banco de dados construído é classificado como dados estruturados. Os detalhes dos dados da ponte são examinados para identificar tendências de construção, tipos estruturais preferidos e as condições de serviço.

## 2.2 QUANTITATIVO DE DADOS

A tabela 3 reúne o quantitativo de pontes inspecionadas considerando o deck e a superestrutura da ponte. O número total de pontes analisado é 501.086, porém como a análise é feita para dois membros de forma separada, são então consideradas 1.002.172 amostras.

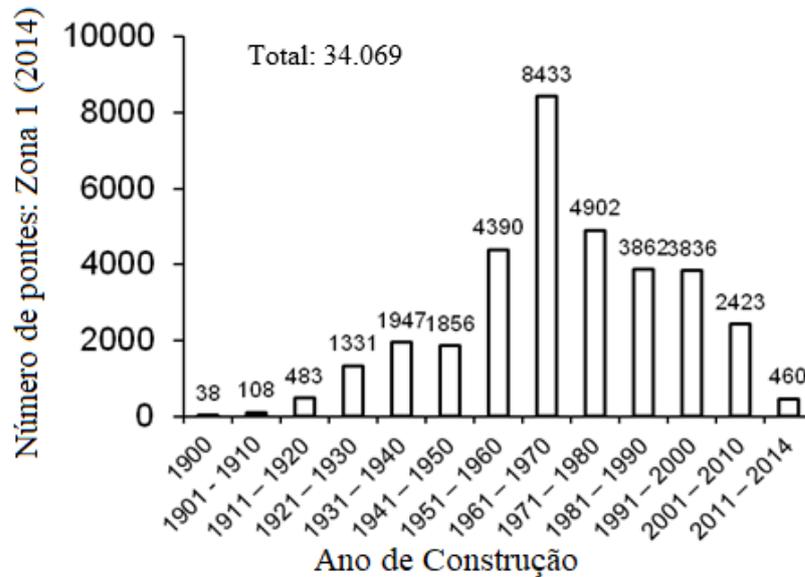
Tabela 3 – Quantitativo de dados de pontes

Ano de Inspeção	Zona						
	1		2		3		4
	Califórnia (A)	Colorado (B)	Illinois (C)	Minnesota (D)	Flórida (E)	Havaí (F)	Alasca (G)
2010	33.557	9.551	30.157	16.031	15.908	1.216	1.250
2011	33.678	9.612	30.473	16.058	16.004	1.213	1.269
2012	34.062	9.688	30.611	16.064	16.034	1.212	1.286
2013	24.955	8.612	26.621	13.137	12.070	1.125	1.196
2014	25.401	8.668	26.588	12.961	12.137	1.137	1.544
Subtotal	151.653	46.131	144.450	74.251	72.153	5.903	6.545
Total	501,086 (elementos de deck e superestrutura considerados = 1.002.172)						

Fonte: A autora (2016)

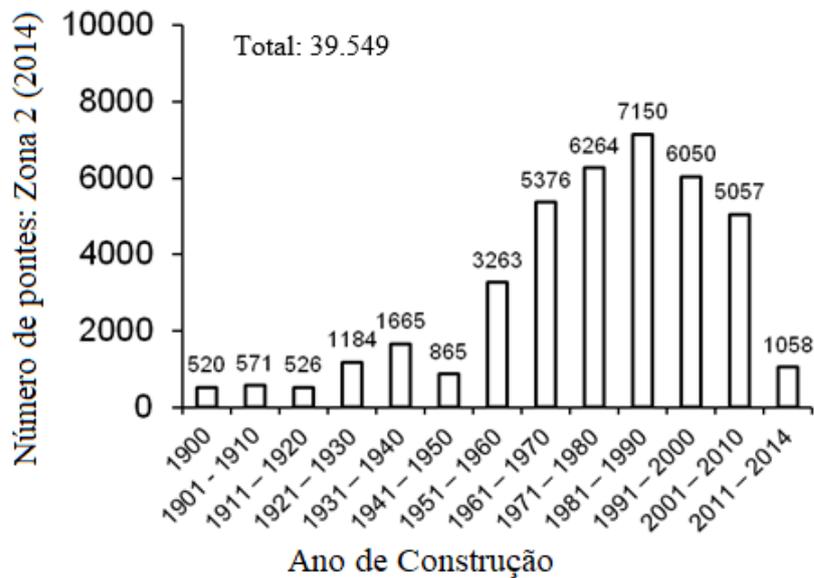
As figuras 2, 3, 4, e 5 mostram para as quatro zonas de serviço a quantidade de estruturas construídas, distribuídas por ano de construção, com inspeção em 2014 (outros anos de inspeção exibem distribuições similares, e os dados completos estão disponíveis na tabela 3)

Figura 2 – Dados de pontes ordenados por ano de construção (zona 1, 2014)



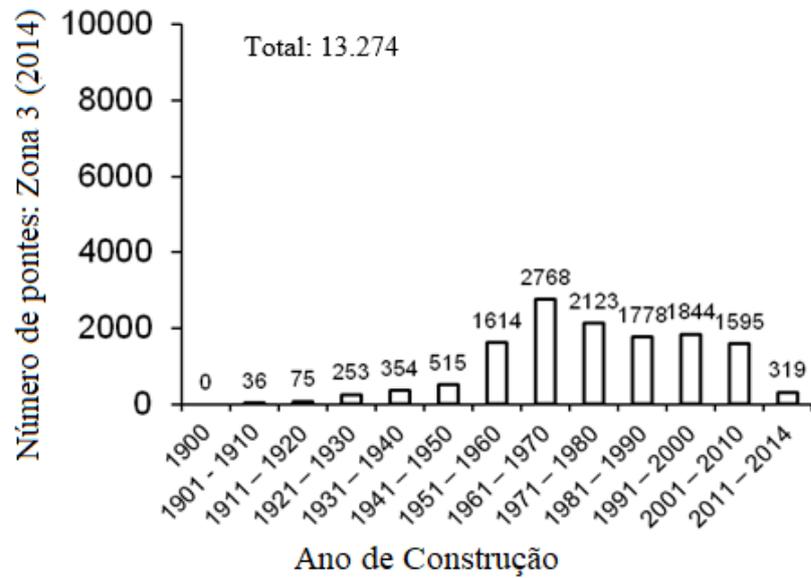
Fonte: A autora (2016)

Figura 3 – Dados de pontes ordenados por ano de construção (zona 2, 2014)



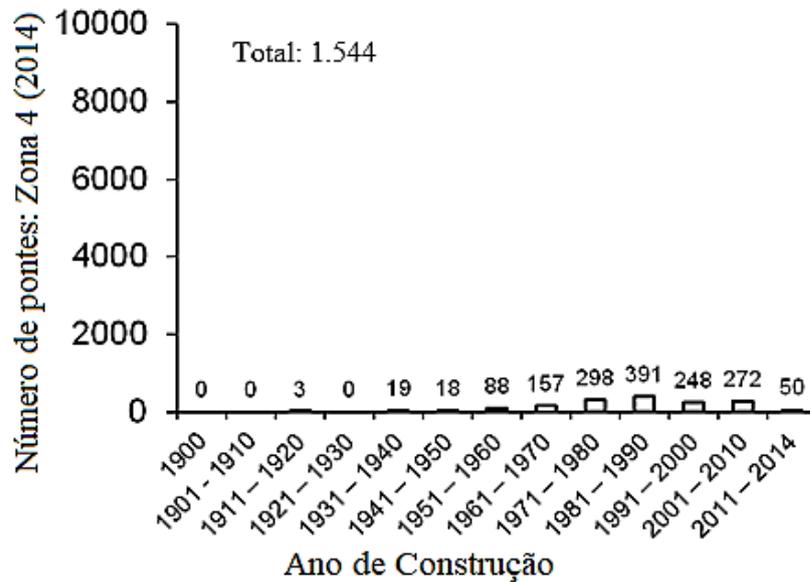
Fonte: A autora (2016)

Figura 4 – Dados de pontes ordenados por ano de construção (zona 3, 2014)



Fonte: A autora (2016)

Figura 5 – Dados de pontes ordenados por ano de construção (zona 4, 2014)



Fonte: A autora (2016)

Como mostrado na figura 2, o número de pontes construídas na Zona 1 aumentou exponencialmente até 1970, seguido por uma queda súbita (1971-1980), então um padrão de construção estabilizado (1981-2000). Esta observação indica que o desenvolvimento de infraestrutura na Zona 1 cresceu rapidamente e atingiu o pico em 1961-1970. Os estados da Zona 2 começaram a investir recursos em infraestrutura mais cedo do que outros, como

mostrado na figura 3, evidenciada significativamente por mais pontes erguidas antes de 1910 em relação às pontes da Zona 1. O desenvolvimento da infraestrutura na Zona 2 continuou até 1990, depois decaiu gradualmente. A tendência de construção de pontes na Zona 3 foi semelhante à da Zona 1, como mostrado na figura 4, embora o número de pontes da terceira zona tenha sido apenas 39% se comparado à primeira zona. O crescimento da infraestrutura de pontes na Zona 4 começou depois de 1951 e atingiu seu pico entre 1981 e 1990, e é representado pela figura 5. No geral, a construção da ponte em todas as zonas estava saturada após 2011, conforme comprovado pelo baixo número de pontes recém-construídas. A crise econômica de 2008 – 2010 também influenciou negativamente o planejamento e a implementação das construções nesse período.

### 3. MATERIAIS E ESTRUTURAS

A escolha dos materiais de construção é considerada como fator determinante para o bom desempenho da estrutura. Aliado a isso, o design estrutural deve ser criativo, e ao mesmo tempo racional. A estrutura deve prover segurança, com uma performance satisfatória, desempenhando corretamente a função para qual foi desenvolvida. Na escolha da estrutura correta para cada situação deve ser considerada também a economia; a estrutura deve ser econômica desde a construção até sua manutenção. E em parceria com a arquitetura, a estrutura deve ser esteticamente agradável. O processo de concepção estrutural envolve vários passos, e o engenheiro deve estar ciente das variações que podem ocorrer de acordo com o tipo de estrutura a ser projetada. Em se tratando de pontes, a regra brasileira que se aplica é a NBR 7187, que trata de forma mais específica sobre a construção de pontes de concreto e suas variações. Com base na norma brasileira, as estruturas devem ser concebidas, calculadas e detalhadas de forma a satisfazer os requisitos de qualidade definidos.

#### 3.1 TIPOS DE MATERIAL

Das pontes analisadas nesse trabalho, considerando como objeto de estudo o deck e a superestrutura das pontes, além das estruturas de concreto é notável também a participação de estruturas de aço e madeira. Esses materiais têm ampla participação no ramo da construção civil, sendo utilizados de forma dinâmica, com várias opções de apresentação do material. A partir de uma análise minuciosa considerando os tipos de materiais utilizados na construção das pontes que formam a base de dados desse trabalho, podemos destacar:

- Concreto convencional
- Concreto pré-moldado
- Concreto protendido
- Concreto moldado in loco
- Aço
- Madeira

Design pode significar o desenvolvimento do layout estrutural, ou até como se dá o arranjo dos membros, mas especificamente para a construção de pontes, o termo design refere-se à escolha adequada dos membros para resistir aos esforços solicitados. Assim, conhecendo

o histórico de cada material, é possível compreender os fatores determinantes para a escolha do componente de cada parte da estrutura que foi projetada levando em conta a situação à qual cada ponte está exposta.

### 3.1.1 Histórico do Concreto

Concreto é um material construtivo obtido a partir da combinação de cimento, agregado e água. A história do concreto tem suas primeiras impressões em Roma, a aproximadamente 2000 anos atrás. Segundo Jezek (2006), naquele tempo, o material misturado era utilizado em aquedutos e estradas. Essa mistura consistia de cascalho e areia grossa adicionados à cal e água. Evidências constataam que sírios e babilônios usaram também argila para dar liga à mistura. Mesmo os Egípcios são conhecidos por utilizar cal e cimento para fabricação de concreto. Contudo, os Romanos ganharam destaque no uso do concreto para construir estradas, construindo aproximadamente 8.400 quilômetros de estradas. Evidências também apontam que Romanos, além de sangue animal, usavam pozolana, gordura animal, e leite como aditivos. Porém o primeiro registro de uso do material na forma como conhecemos atualmente aponta para o ano 1756, quando John Smeaton produziu concreto a partir da mistura de agregado graúdo e cimento. Em 1793, ele construiu com o uso de cimento hidráulico o Eddystone Lighthouse em Cornwall, Inglaterra.

Conhecido como o mais resistente material de construção, o concreto encontrou maior emprego em represas, rodovias, prédios, edificações e outros tipos de construções. O concreto pode ser considerado como material plástico, que pelo processo de moldagem é capaz de adquirir a forma desejada antes de entrar em processo de endurecimento. A partir desse processo, o concreto adquire resistência suficiente para absorver os esforços solicitados. Diferentemente dos tempos atuais, que conta com o emprego de formas para suportar o concreto fresco até que ele endureça, os romanos empregavam em suas construções formas de pedra ou tijolo, a depender da intenção de uso. A escassez de madeira no império Romano incentivou a criatividade para elaborar formas de diferentes materiais. Foi a técnica de construção com concreto que constituiu a base para a arquitetura romana.

Ainda sobre de uso do concreto no império Romano, vale destacar a construção de estradas, que representam verdadeiras obras de engenharia em termos de dimensionamento de fundações, que sobrepõem camadas de crescente resistência a uma camada de areia que atua

como camada de drenagem. O pavimento era escolhido conforme o tráfego, podendo ser de concreto ou paralelepípedo. A ideia de associar barras metálicas à pedra ou argamassa para aumentar a resistência do material às solicitações também veio dos tempos romanos.

O concreto evoluiu bastante com o passar dos anos, e para acompanhar essa evolução e adaptar aos novos usos foi criada uma infinidade de tipos de concretos, utilizando uma gama de cimentos, agregados, adições, aditivos e variadas formas de aplicação. O grande desafio da tecnologia que estuda o concreto atualmente parece ser tornar as estruturas mais duráveis, recuperar as partes danificadas e entender o arranjo químico e mecânico dos cimentos e concretos. Para isto, uma nova geração de concretos está sendo desenvolvida e métodos tradicionais de execução e cálculo de concreto estão sendo revistos.

### 3.1.2 Histórico do Aço

A tendência da engenharia é acompanhar o desenvolvimento e buscar sempre inovações, buscando redução de custos, construções mais eficientes e menor tempo de obra. A constante procura de alternativas que consigam cumprir com esses requisitos conduziu à introdução do aço no campo da construção civil. O aço é, de forma simples, o resultado da interação entre o ferro (Fe) e o carbono (C). O material pode ser dito como uma liga metálica, e é amplamente utilizado em obras devido à suas propriedades. Sua flexibilidade e resistência são atrativos que justificam a atuação do aço e outras ligas metálicas na construção.

Uma das grandes vantagens da utilização do aço é que, em relação ao concreto, as seções de pilares e vigas de aço são menores, implicando na redução do espaço ocupado pela estrutura, aumentando assim a área útil do projeto e implicando em uma melhor utilização do espaço disponível. Em contrapartida, as construções no Brasil demoraram um pouco mais para ter o aço incluído como parte do projeto, sendo um dos principais motivos para esse atraso a necessidade de temperaturas altíssimas para o processo de fundição do aço, encarecendo sua fabricação e dificultando sua comercialização e popularização.

No Brasil, o uso do aço foi fortalecido na indústria da construção civil no século XIX, pelo desenvolvimento do concreto armado, em primeiro momento como fruto da importação de peças. Só em 1946, com a criação da Companhia Siderúrgica Nacional Belgo-Mineira, foi que o país começou a produzir suas próprias peças. A partir de 2003 com o crescimento

econômico e industrial, o aço começou a ganhar notoriedade no âmbito da construção civil, conhecido pela sua qualidade e resistência.

O diferencial do aço como material de construção está ligado de forma intrínseca às suas propriedades. Não só exclusivas do aço, mas de todos os metais, essas propriedades trouxeram uma nova visão ao campo rígido de construções com concreto. Em oposição a essa rigidez, temos a elasticidade, que pode ser definida como a capacidade do material voltar à sua forma original quando removida a força deformante. Em testes de resistência, a barra metálica irá apresentar uma deformação progressiva quando submetida a um esforço de tração crescente. A partir do estudo dessa deformação podemos destacar suas características. Dentre os variados tipos de aço, podemos também destacar a plasticidade como propriedade inversa à elasticidade, ou seja, a capacidade de manter a deformação causada por forças atuantes, não permitindo ao material voltar ao seu estado inicial após a remoção das cargas. Dentre outras propriedades, é importante destacar também a ductilidade, qualidade do material sofrer deformação prévia a seu rompimento, que pode ser útil no quesito segurança como um indicador do Estado Limite Último (ELU), em que a estrutura deixa de atender os requisitos necessários de funcionamento.

### 3.1.3 Histórico da Madeira

Desde os primórdios a carpintaria está presente na história da construção, sendo a madeira um dos materiais com presença mais antiga registrada. A arquitetura e construção dos primeiros edifícios foi influenciada de forma direta por este material. Os conhecimentos sobre o comportamento das estruturas e as características da madeira permitiram a realização de obras notáveis desde o século XVI. A madeira teve um breve destaque na construção civil no Brasil, logo perdendo espaço para materiais como aço e concreto, que possuem perfis de formas e dimensões variadas. De forma paralela, o rápido progresso no cálculo de estruturas e conhecimento das propriedades do aço e do concreto substituíram o emprego empírico e tradicional da madeira. Os usos e aplicações deste material levantam opiniões divergentes ao redor do mundo. Em contrapartida, nos últimos anos existe um esforço representativo para reabilitar a madeira como principal material de construção, a exemplo das casas nos Estados Unidos, que são em sua grande maioria construídas de madeira.

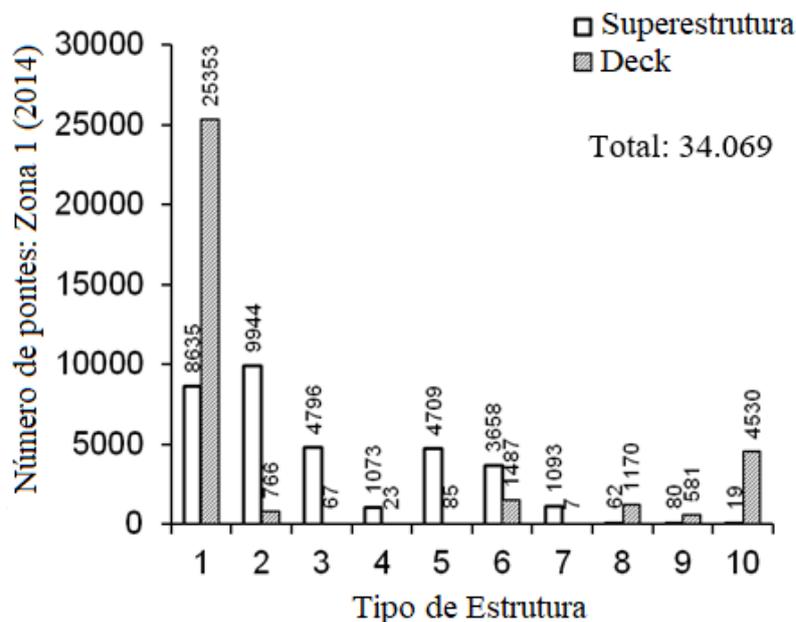
Com o avanço da tecnologia na construção civil, os métodos clássicos construtivos estão sendo substituídos por meios mais eficazes, que envolvem de forma dinâmica as

particularidades da madeira, a depender de seu tipo, cujas características podem se aproximar do aço. Formas variadas, peças de seções compostas, estruturas em aglomerado e lâminas coladas permitem as mais distintas aplicações no meio construtivo. A relação entre madeira e a construção no Brasil é uma discussão que está ganhando força, mas ainda sofre com o preconceito e a falta de conhecimento quanto a este material, principalmente em relação ao desenvolvimento do conceito de sustentabilidade. Esse assunto traz uma preocupação simultânea envolvendo o meio social, econômico e ambiental.

### 3.2 PORCENTAGENS E UTILIZAÇÃO

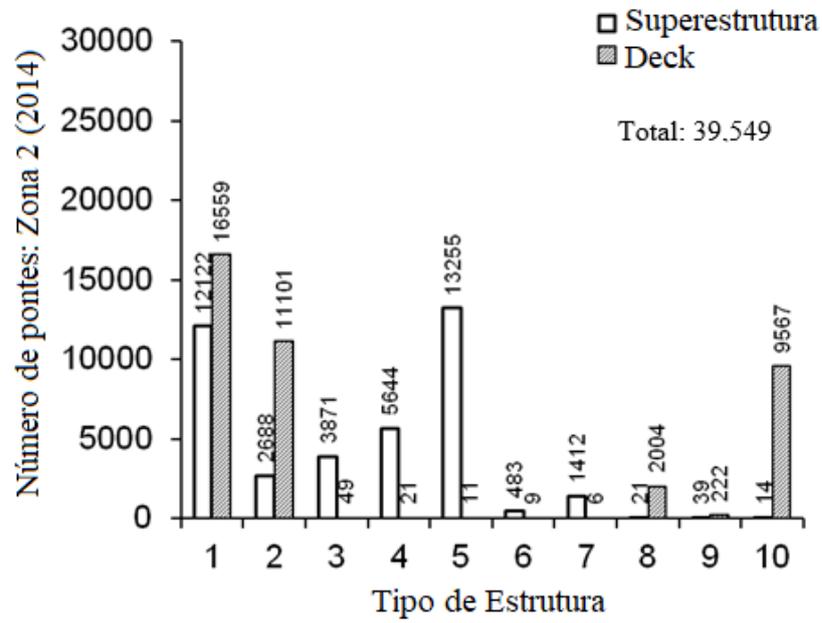
Os tipos de materiais estão resumidos nas figuras 6, 7, 8, e 9, separadas por zona de serviço, com base no ano de inspeção de 2014 para consistência (o código para cada tipo se encontra na tabela 2, citada anteriormente). Vale destacar a presença massiva do concreto nas Zonas 1, 2, e 3, e da madeira na Zona 4. A escolha do material dependendo da zona de serviço é um dos fatores a ser observado. Essa escolha é determinística para o desempenho da ponte, pois o material selecionado é na maioria das vezes adaptável, a depender dos fatores aos quais a estrutura é exposta, prezando sempre pela segurança, performance e economia da obra.

Figura 6 – Dados de pontes por tipo de decks e superestruturas (zona 1, 2014)



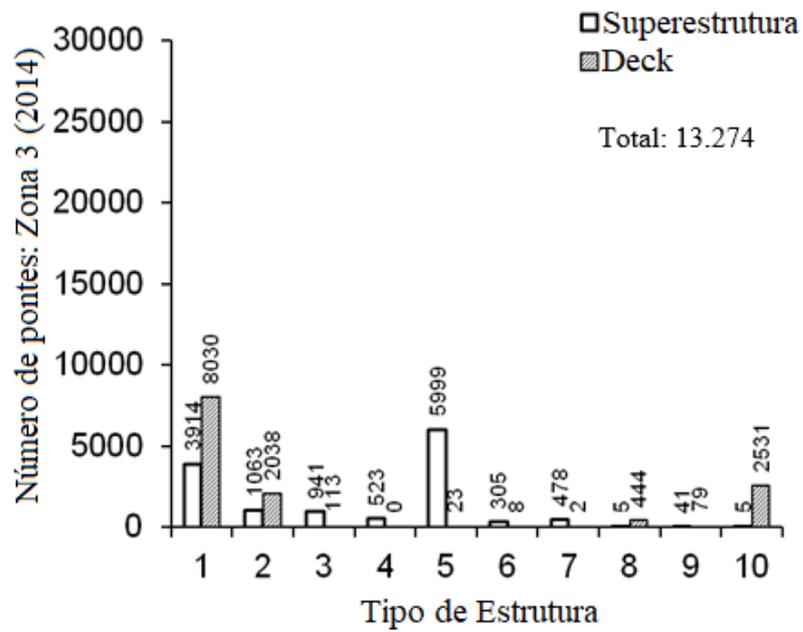
Fonte: A autora (2016)

Figura 7 – Dados de pontes por tipo de decks e superestruturas (zona 2, 2014)



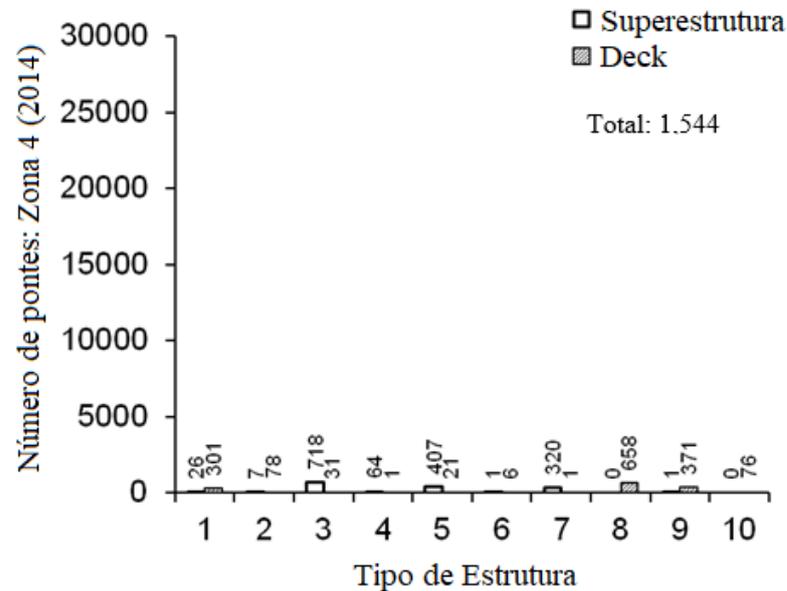
Fonte: A autora (2016)

Figura 8 – Dados de pontes por tipo de decks e superestruturas (zona 3, 2014)



Fonte: A autora (2016)

Figura 9 – Dados de pontes por tipo de decks e superestruturas (zona 4, 2014)



Fonte: A autora (2016)

O sistema de superestrutura mais usado na Zona 1 foi concreto (54% para os tipos 1 e 2: concreto / concreto contínuo, conforme especificado na tabela 2), seguido por concreto protendido (25% para os tipos 5 e 6: concreto protendido / concreto protendido contínuo), aço (17% para os tipos 3 e 4: aço / aço contínuo) e madeira (3% para o tipo 7: madeira). No caso da Zona 2, as superestruturas de concreto e de concreto protendido foram erguidas quase que em mesmo número (37% e 35%, respectivamente), e as superestruturas de aço e madeira representaram 24% e 4%, respectivamente. Os tipos de superestrutura da Zona 3 foram primariamente baseados em concreto (85%), e o uso de superestruturas de aço foi notavelmente baixo (11%). As superestruturas de madeira foram similarmente empregadas (4%) em comparação entre as Zonas 1 e 2. Em contraste, a preferência da Zona 4 foi nas superestruturas de aço e madeira (51% e 21%, respectivamente), e a porção das superestruturas de concreto e concreto protendido foi de 2% e 26%, respectivamente. Estas observações implicam que cada zona tinha propensões distintas para a construção de superestruturas, e apoiam a adequação da classificação das pontes construídas de acordo com as zonas geográficas ou de serviço do AASHTO.

No que diz respeito aos decks, o concreto moldado in loco (tipo 1) foi exclusivamente empregado e representava mais de 74% e 60% nas Zonas 1 e 3, respectivamente. O uso deste tipo de deck foi, no entanto, apenas 42% e 19% para as Zonas 2 e 4, respectivamente. Painéis

pré-moldados de concreto (tipo 2) foram amplamente explorados na Zona 2 (28%) em comparação com outras zonas (2%, 15% e 5% para as Zonas 1, 3 e 4, respectivamente). Os decks de madeira (tipo 8) na Zona 4 foram contabilizados em 43%, porém não foram utilizados com frequência em outras zonas (3%, 5% e 3% para as Zonas 1, 2 e 3, respectivamente). Acredita-se que a disponibilidade e a produção de madeira como material de construção na Zona 4 levaram à sua prevalência sobre outros materiais, o que exigiu fabricação e instalação especializadas. As informações estão organizadas na tabela abaixo por tipo de material e porcentagem correspondente a cada zona.

Tabela 4 – Porcentagens por tipo de material

	Superestrutura				Deck		
	Concreto	Aço	Madeira	Outros	Concreto	Madeira	Outros
Zona 1	79%	17%	3%	1%	76%	2%	22%
Zona 2	72%	24%	2%	2%	70%	5%	25%
Zona 3	85%	11%	4%	0%	75%	3%	22%
Zona 4	28%	51%	21%	0%	24%	43%	33%

Fonte: A autora (2016)

### 3.3 ESTRUTURAS DE PONTES

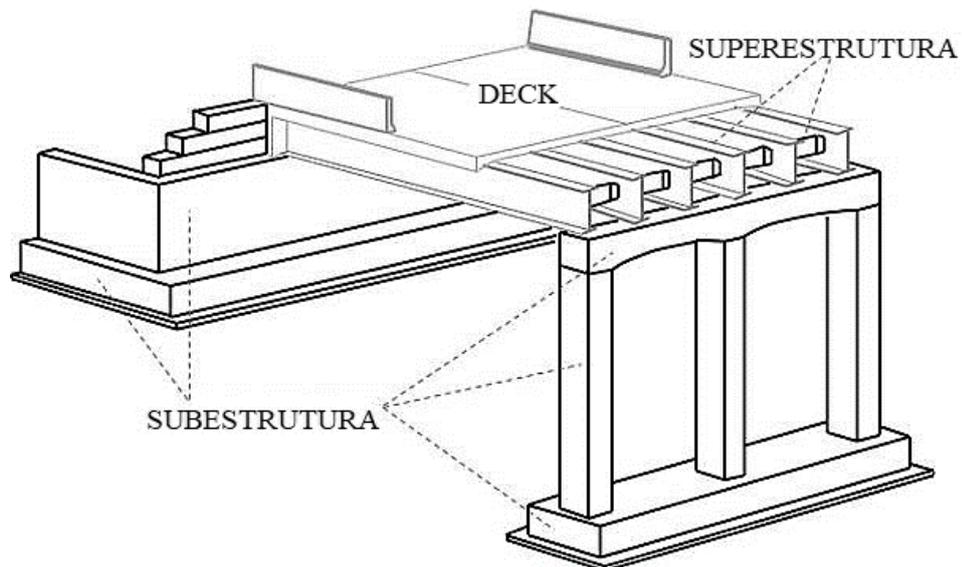
Segundo Penner e Almeida (2001), a avaliação do comportamento estrutural de pontes deve ser baseado no conhecimento das propriedades representativas da mobilidade do sistema, além dos esforços solicitantes e dos deslocamentos da estrutura. É relevante destacar as estruturas mais comumente encontradas em se tratando de construções de pontes. De forma simples, a estrutura de uma ponte pode ser descrita como contendo três partes principais a serem conhecidas:

- o tabuleiro ou deck da ponte, parte que recebe diretamente as cargas se utilização da ponte;

- a superestrutura, são as vigas responsáveis por interligar o vão, recebendo a totalidade das cargas aplicadas;
- a subestrutura, que é constituída pelos apoios e são responsáveis pela transmissão das cargas ao solo.

Esse trabalho considera como estruturas de interesse o deck e a superestrutura, uma vez que a deterioração natural e o desgaste dessas peças é maior em relação à subestrutura. A figura 10 a seguir exemplifica as partes citadas.

Figura 10 – Partes componentes da estrutura de uma ponte



Fonte: I-84 Waterbury Widening (2019)

Dentre os tipos de estrutura de pontes existentes, quatro podem ser destacados como fundamentais. São as pontes suspensa, estaiada, cantiléver e a treliça. Na execução desses projetos, ganham destaque os sistemas de protensão, tratamento para aumentar a resistência do concreto, que consiste em dar tensão aos cabos de aço antes que a massa fresca endureça, garantindo a absorção correta da energia acumulada. Uma vantagem desse sistema é a redução no risco de quebra das pontes, que aliada à flexibilidade garante maior estabilidade e segurança à obra.

### 3.3.1 Ponte Suspensa

Uma ponte em suspensão tem seu deck pendurado por cabos de sustentação. Esses cabos, também chamados de cabos secundários, se encontram na posição vertical e se conectam a um cabo de longa extensão, dito como cabo primário. Esse cabo se conecta entre as torres, fazendo a transmissão dos esforços. As torres são os elementos que fazem a conexão entre a ponte e o solo, sendo necessário pelo menos duas torres para fazer a conexão entre os cabos. Elas são as responsáveis por suportar os esforços transmitidos pelo sistema de cabos, e descarregar esses esforços no solo. O deck é construído utilizando o sistema de protensão citado, garantindo assim uma melhora na dispersão de energia, e diminuindo os riscos de quebra do concreto. Como o deck absorve grande parte da energia resultante do tráfego, a estrutura precisa de um nível controlado de flexibilidade para transmitir essa energia para o solo.

### 3.3.2 Ponte Estaiada

Aparentemente similar à ponte suspensa, a ponte estaiada tem cabos de sustentação diretamente conectados à torre, excluindo a necessidade de um cabo principal. Além disso, as pontes estaiadas não precisam de duas torres (pelo menos) para garantir sua estabilidade. Nesse modelo estrutural os cabos ficam na posição diagonal, fazendo a ligação entre a torre e a extensão da ponte. Os esforços sobre a torre podem ser diminuídos quando utilizado o sistema de protensão, garantindo maior segurança e absorção dos impactos sobre o deck.

### 3.3.3 Ponte de Treliça

Treliças são estruturas rígidas que transferem os esforços atuantes em um ponto para todo o restante da estrutura através da propagação que ocorre nas barras conectadas. As pontes de treliça têm barras de aço entrelaçadas funcionando como elemento de sustentação do deck. Essas barras, quando juntas, têm a capacidade de apoiar grandes pesos. Além de ser relativamente econômica, a ponte de treliça utiliza os materiais de forma eficiente quanto à absorção das cargas. Uma desvantagem desse modelo estrutural é as vigas de aço ocuparem muito mais espaço quando comparadas aos sistemas que utilizam cabos de aço.

### 3.3.4 Ponte Cantiléver

Utilizada principalmente para o tráfego rodoviário pesado e ferroviário, a ponte cantiléver tem sua estrutura composta de treliças usando barras de aço. As treliças fazem a distribuição das forças atuantes de forma igualitária entre os membros, garantindo a absorção do peso e do impacto. A sustentação precisa estar apoiada em uma estrutura sólida apenas em uma das extremidades da ponte. Nesse sistema, o deck fica apoiado sobre vigas que são responsáveis por dissipar a energia cinética dos carros.

Embora a forma estrutural não seja um parâmetro para comparação dos testes, conhecer como as estruturas de ponte se apresentam em suas configurações mais comuns é importante para compreender a escolha do material adequado. Como visto, dependendo do arranjo geométrico, é possível ter materiais que apresentarão um melhor desempenho aos esforços que lhes são solicitados.

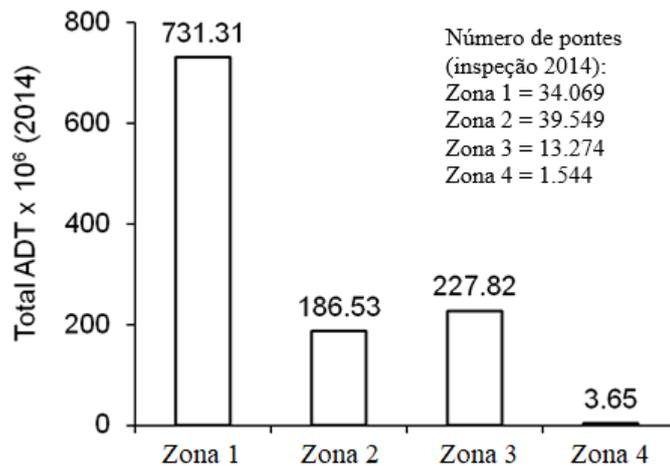
#### 4. AMBIENTE DE SERVIÇO

Pode ser definido com ambiente de serviço o conjunto de fatores aos quais uma estrutura é exposta. No estudo de pontes em questão os fatores considerados no teste de hipóteses foram o volume de tráfego médio diário (*Average Daily Traffic*, ADT), a variação de temperatura, e a média mensal de precipitação.

##### 4.1 TRÁFEGO DIÁRIO MÉDIO

A figura 11 mostra o ADT registrado no NBI para cada uma das quatro zonas (dados de inspeção de 2014 cobrindo 88.436 pontes), onde ADT é o volume médio de tráfego que ocorre em determinada seção de uma via, num dado período de dias observado. Divide-se a quantidade de veículos obtida na observação pelo período observado para se obter o valor médio. O ADT da Zona 1 foi de 731 milhões, significativamente maior que o de outras zonas.

Figura 11 – Volume de tráfego médio diário por zona de serviço

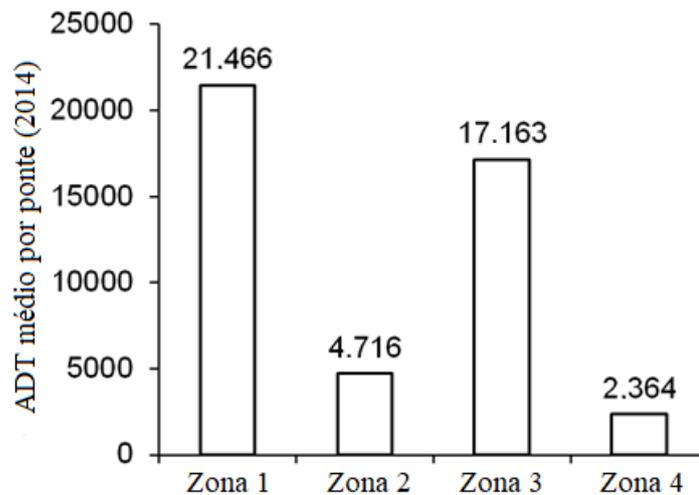


Fonte: National Bridge Inventory (NBI, 2015)

De acordo com o Departamento de Censo dos Estados Unidos (*United States Census Bureau*, USCB), a população dos dois estados selecionados na Zona 1 era de 44,2 milhões em 2014, enquanto a população dos estados selecionados nas Zonas 2, 3 e 4 era de 18,4 milhões, 21,3 milhões, e 0,74 milhões, respectivamente. Esses dados censitários justificam a diferença

perceptível no ADT entre as zonas. Para avaliar capacidade de tráfego permitido nas pontes construídas, o ADT das zonas individuais foi normalizado de acordo com o número das pontes e é representado pela figura 12 a seguir. A partir dos dados normalizados é possível notar que o ADT é um fator de influência na classificação de nove pontos nas pontes das Zonas 1 e 3.

Figura 12 – Volume de tráfego médio diário por ponte



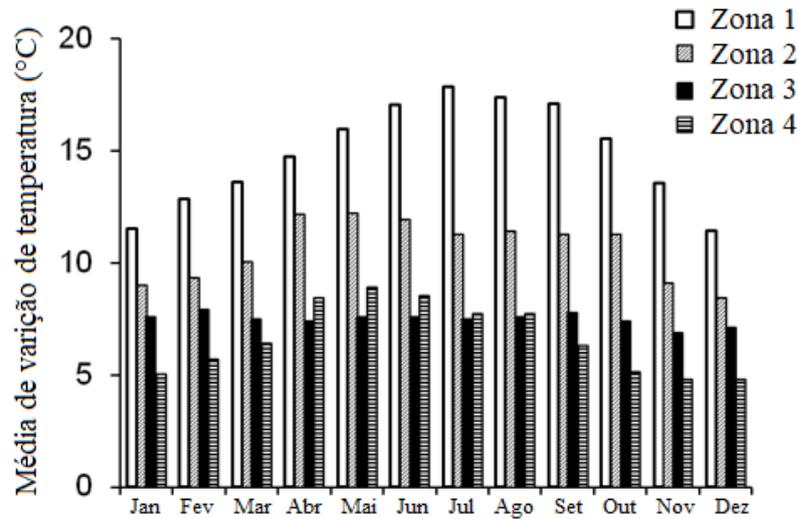
Fonte: A autora (2016)

As Zonas 1 e 3 exibiram altas taxas médias de ADT por ponte (21.466 e 17.163 veículos, respectivamente), enquanto as Zonas 2 e 4 apresentaram taxas mais baixas (4.716 e 2.364 veículos, respectivamente). Esses fatores indicam que as pontes nas Zonas 1 e 3 estão sujeitas a maiores esforços induzidos pelo tráfego do que as pontes nas Zonas 2 e 4 (por exemplo, aumento dos ciclos de fadiga e possível sobrecarga).

#### 4.2 TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO

Os atributos ambientais considerados como fatores determinantes nas zonas são fornecidos nas figuras 13 e 14 a seguir, sendo eles média de variação de temperatura e média mensal de precipitação nas capitais dos estados por zona de serviço, respectivamente. De forma mais específica, ao falar de temperatura e precipitação, considera-se que fatores como contração e expansão térmica, e ação da umidade ocorrerão em maior escala.

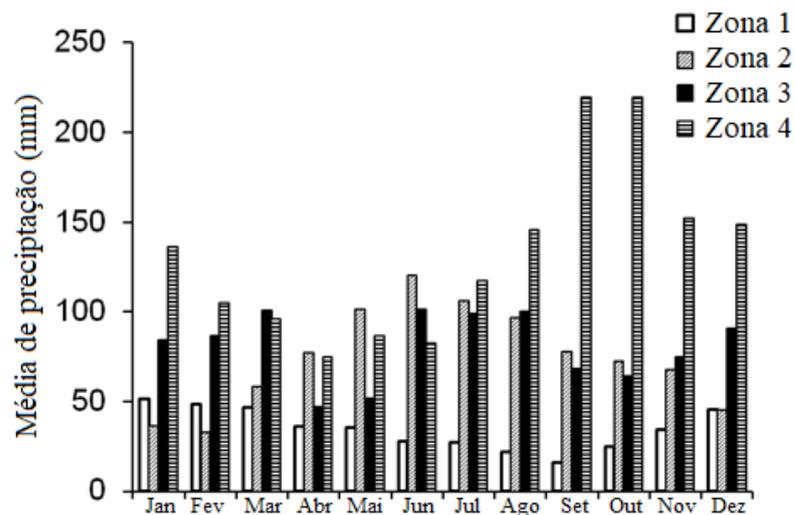
Figura 13 – Variação de temperatura nas capitais dos estados por zona de serviço



Fonte: Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (2014)

As diferenças médias mensais de temperatura (entre as temperaturas máxima e mínima) com base nos dados registrados de 1981 a 2010 pela Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (*National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA*) das Zonas 1 e 4 mudaram parabolicamente com picos de 18°C em julho e 9°C em maio, respectivamente. As diferenças nas Zonas 2 e 3 foram, no entanto, relativamente consistentes durante todo o ano, com temperaturas médias de 11°C para a Zona 2 e 7°C para a Zona 3.

Figura 14 – Média mensal de precipitação nas capitais dos estados por zona de serviço



Fonte: Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (2014)

A precipitação média anual das zonas é resumida de forma individual na figura 14, com base nos dados também fornecidos pela NOAA. A quantidade de precipitação na Zona 1 foi consistentemente baixa, com uma média de 35 mm. As zonas 2 e 3 apresentaram padrões de precipitação semelhantes (74 mm e 81 mm, em média, respectivamente). Em contraste, a precipitação na Zona 4 foi significativamente maior que a de outras zonas, especialmente de setembro a janeiro.

Portanto, presume-se que as pontes construídas nas Zonas 1 e 4 experimentaram deformações induzidas pela temperatura mais do que aquelas nas Zonas 2 e 3. Já o dano relacionado à umidade parece ser um fator importante que influencia o desempenho de pontes na Zona 4.

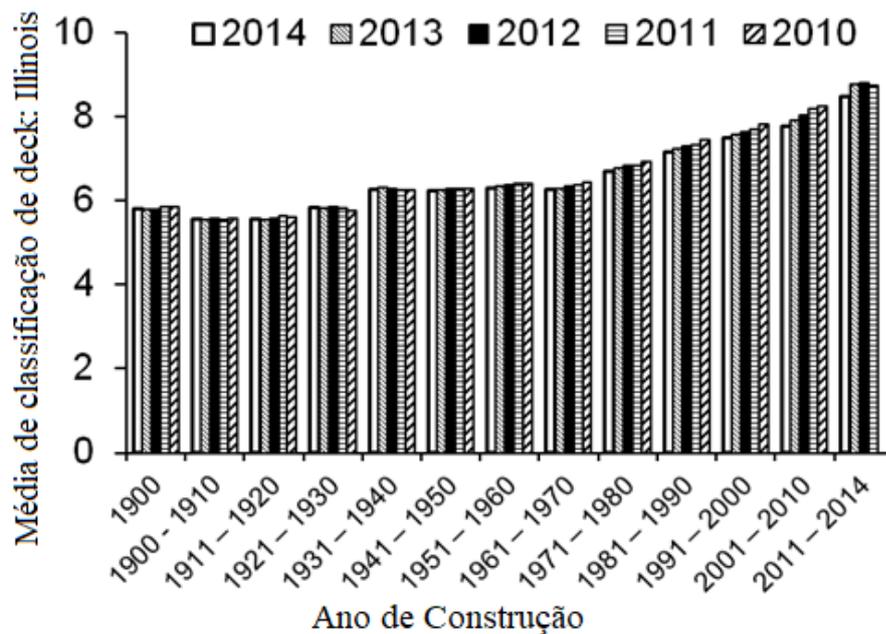
## 5. CLASSIFICAÇÃO DE CONDIÇÃO

Seguindo com as possibilidades de classificação, as estruturas de pontes podem ser classificadas de acordo com sua condição em relação ao ano de construção, e por média de acordo com o código NBI em relação ao tipo de material. Como o NBI é um sistema de dados não hierárquico padronizado, a tendência de seleção frequentemente observada na formulação dos dados não foi uma preocupação. A qualidade dos dados individuais de pontes produzidos por inspetores certificados também é confiável. A partir da produção e análise desses dados é possível identificar um padrão nos índices demonstrados nas figuras das seções a seguir. A identificação desse padrão permite que haja uma comparação entre as quatro zonas de serviço afim de compreender as tendências de deterioração das estruturas.

### 5.1 CLASSIFICAÇÃO POR ANO DE CONSTRUÇÃO

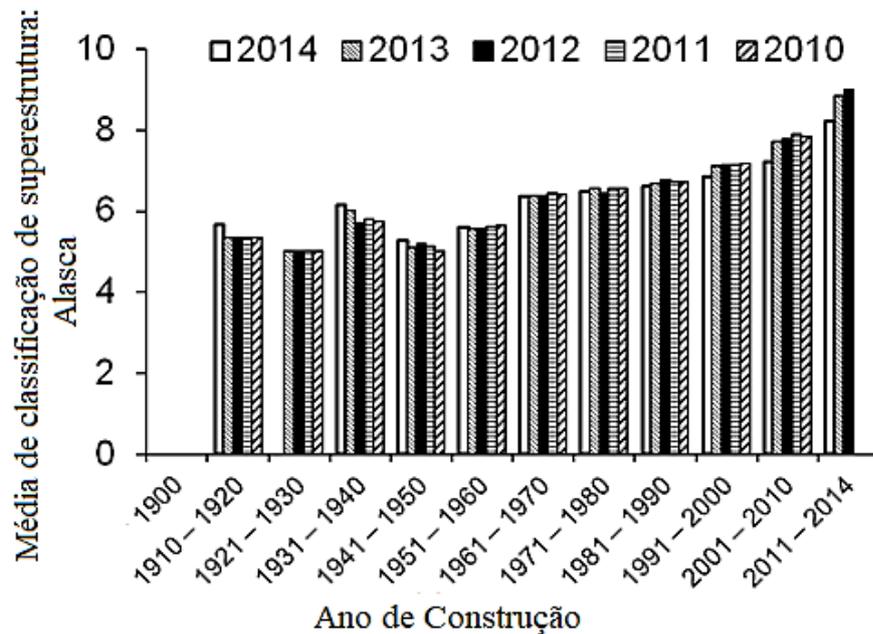
A variação das classificações de condição por ano de inspeção é mostrada nas figuras a seguir, classificação de deck na figura 15 e classificação de superestrutura na figura 16.

Figura 15 – Média dos decks por anos de construção e inspeção



Fonte: A autora (2016)

Figura 16 – Média das superestruturas por anos de construção e inspeção



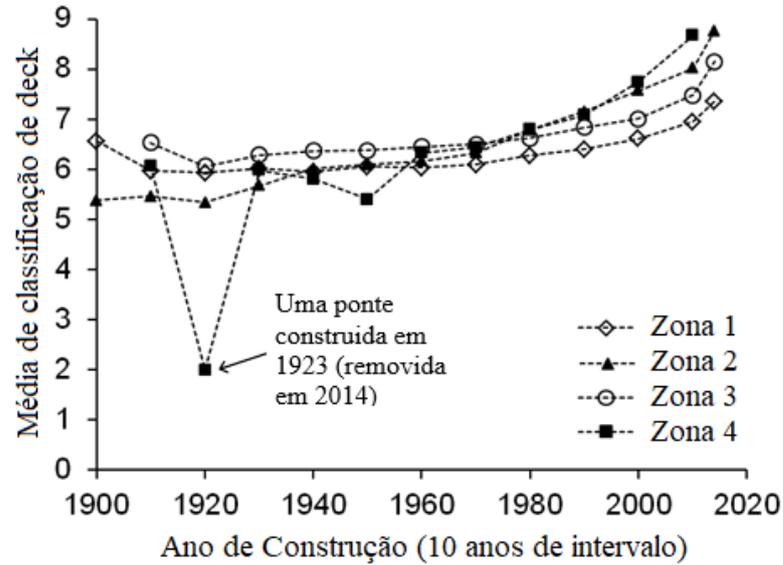
Fonte: A autora (2016)

A média de classificação de decks de Illinois, na Zona 2, era virtualmente independente dos anos de inspeção até o período de construção de 1960, após isso foi observado um decréscimo na classificação dos decks à medida que o ano de inspeção de 2014 se aproximava. Isso denota que a deterioração dos decks construídos progrediu relativamente rápido quando as pontes foram abertas ao tráfego e tendeu a se estabilizar após uma vida útil de 50 anos ou mais (os esforços de manutenção e reparo resultaram na estabilidade das classificações de condição).

No caso do Alasca, na Zona 4, a manutenção e o reparo foram conduzidos para superestruturas construídas entre 1910 e 1960, evidenciadas pelo aumento das classificações de condição dessas pontes registradas no ano de inspeção de 2014. A classificação de superestrutura do Alasca se estabilizou nas pontes construídas entre 1961 e 1990 (ou seja, diferenças insignificantes foram registradas nos anos de inspeção de 2010 a 2014). As pontes construídas após 1991 exibiram uma tendência de deterioração similar aos decks de Illinois.

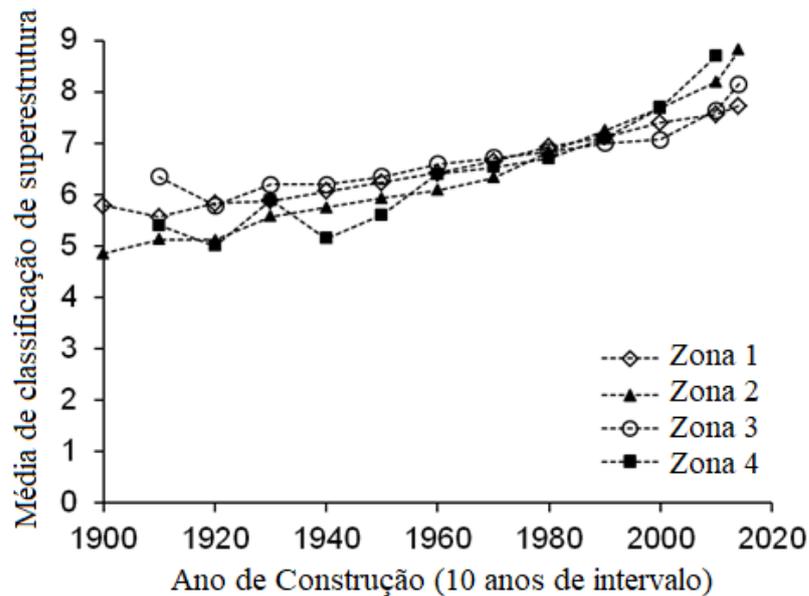
As figuras 17 e 18 representam na respectiva ordem as classificações de deck e superestrutura das Zonas 1 a 4 de acordo com o ano de construção (considerando classificações médias dos cinco anos de inspeção em todos os estados). Os gráficos trazem uma comparação das médias de classificação, com as quatro zonas apresentando a mesma tendência de médias. Algumas particularidades podem ser observadas a seguir.

Figura 17 – Classificação de deck de acordo com o ano de construção



Fonte: A autora (2016)

Figura 18 – Classificação de superestruturas de acordo com o ano de construção



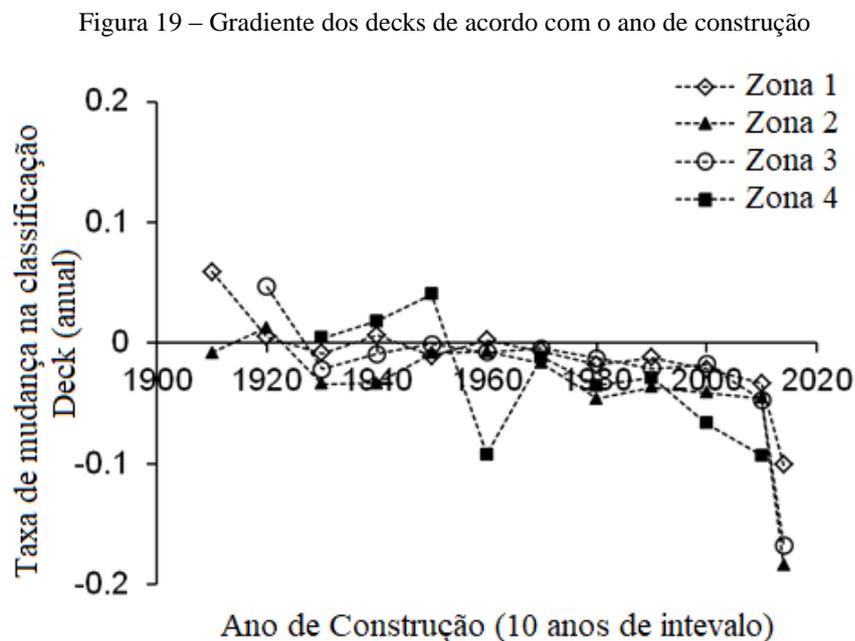
Fonte: A autora (2016)

Os decks pertencentes às pontes da Zona 2, construídos de 1900 a 1940, apresentaram classificações mais baixas do que as das pontes construídas no mesmo período em outras zonas, com exceção de um caso na Zona 4, de uma ponte que foi construída em 1923 e removida em 2014. As classificações de deck para as pontes da Zona 1, construídas depois de 1960, foram mais baixas do que as de outras pontes para o mesmo período, o que pode estar relacionado ao

notável crescimento na construção de pontes durante o período de 1961 a 1970 (representado pela figura 2), juntamente com a exposição significativa à cargas devido ao tráfego (exposto pela figura 11). Como mostrado na figura 18, as classificações médias de superestrutura das pontes em todas as zonas cresceram de maneira quase linear com o ano construído. As pontes nas Zonas 2 e 4, erguidas entre 1900 e 1970, revelaram classificações mais baixas do que as das Zonas 1 e 3.

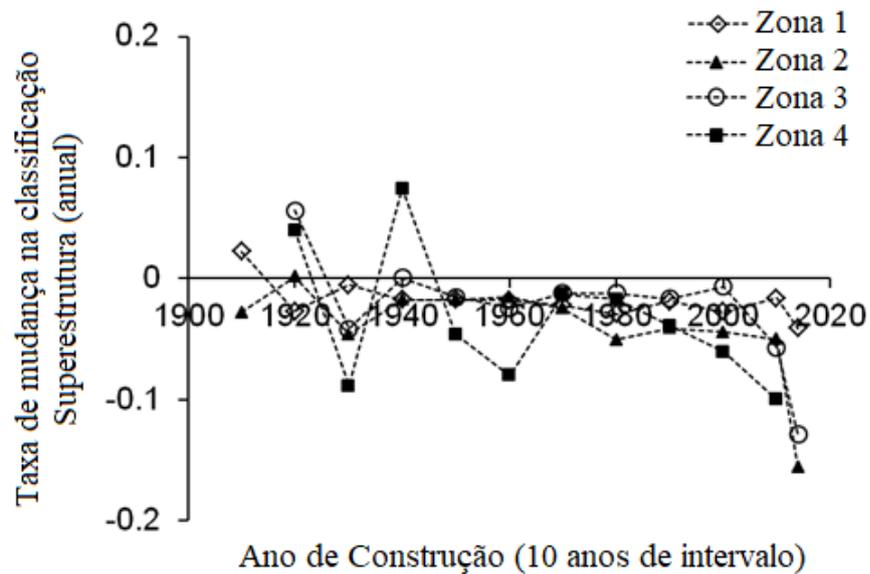
### 5.2.1 Gradiente de Classificação

As figuras 19 e 20 a seguir mostram nessa ordem o gradiente das classificações estruturais de decks e superestruturas para todas as pontes, categorizadas pelas zonas de serviço. O gradiente foi calculado pela variação média das classificações dos decks e superestruturas durante períodos de construção de 10 anos. Uma taxa de mudança negativa representa que a condição dos membros da ponte em um período de construção específico está degradada em comparação com a condição dos membros construídos no próximo período imediato.



Fonte: A autora (2016)

Figura 20 – Gradiente das superestruturas de acordo com o ano de construção



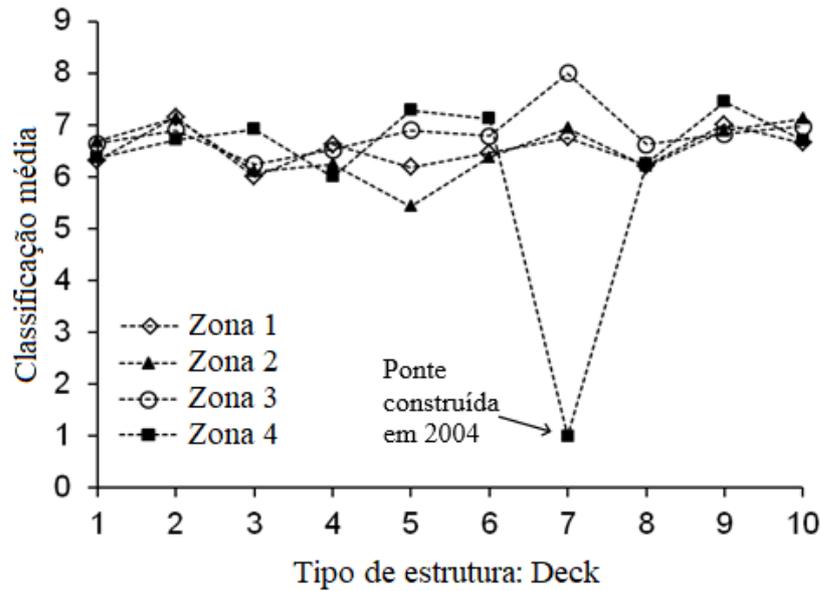
Fonte: A autora (2016)

Com um aumento no ano de construção da ponte, os gradientes de classificação dos decks e superestruturas tenderam a descer. Em particular, foram observadas quedas visíveis para as construídas entre 2010 e 2014, o que confirma a discussão anterior sobre a rápida deterioração das condições estruturais na vida útil inicial das pontes construídas (ou seja, novas pontes abertas ao tráfego). Em alguns casos, os valores do gradiente foram positivos. Isso significa que a manutenção e o reparo foram realizados para melhorar a condição dos membros da ponte. O acompanhamento desses gráficos serve como indicador da periodicidade de serviços realizados nas pontes. Além disso, os gráficos trazem uma projeção para os próximos anos de serviço, e mostram a tendência de comportamento das estruturas.

### 5.3 CLASSIFICAÇÃO POR TIPO ESTRUTURAL

As médias de classificação de condição com relação aos tipos de decks e superestruturas de acordo com o tipo de estrutura são fornecidas nas figuras 21 e 22. Aqui é considerado o material como fator determinante para a classificação da estrutura. Para valores mais concisos, foi observado apenas o ano de inspeção de 2014.

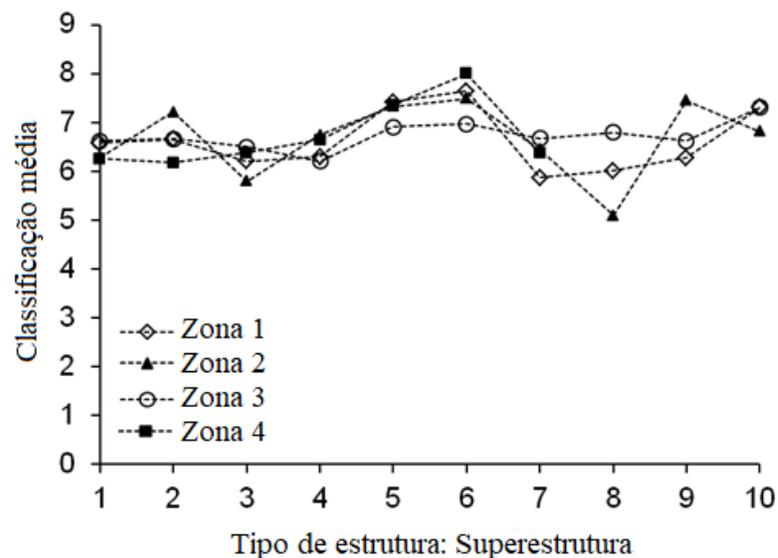
Figura 21 – Médias de classificação dos decks de acordo com o tipo de estrutura



Fonte: A autora (2016)

O desempenho dos decks de pontes convencionais (isto é, concreto e madeira correspondentes aos Tipos 1, 2, 8 e 9, conforme listado na tabela 2) foi mais ou menos similar, independentemente da zona. O anexo do Tipo 7 (deck de alumínio) na Zona 4 foi construído em 2004 com uma faixa de tráfego e logo fechado (evidenciado por ADT igual a 0 contado em 2006).

Figura 22 – Médias de classificação das superestruturas de acordo com o tipo de estrutura



Fonte: A autora (2016)

A figura 22 compara a classificação média dos tipos de superestrutura (os tipos 8-10 na Zona 4 não foram relatados no NBI). Embora os valores de classificação flutuem razoavelmente, o desempenho das pontes de vigas de concreto protendidas (tipos 5 e 6) foi geralmente melhor que o de outros tipos. Por exemplo, a classificação média do concreto protendido nas Zonas 1 a 4 era 7,4, superior às suas contrapartes equivalentes (6,6 para concreto dos tipos 1 e 2, 6,4 para aço dos tipos 3 e 4 e 6,4 para madeira no tipo 7).

## 6. ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

A análise de variância é um método desenvolvido para a comparação da média de vários grupos ou populações ao mesmo tempo, sendo amplamente usada em diferentes áreas. Além disso, o método nos permite avaliar afirmações sobre as médias das populações. Essa análise tem por objetivo verificar se existe uma diferença significativa entre as médias, e se os fatores considerados exercem influência sobre alguma das variáveis. Neste trabalho, o uso das equações probabilísticas para a análise de variância tem a intenção de comparar a classificação da situação de pontes construídas nos Estados Unidos, inspecionadas anualmente durante o período de 2010 a 2014. Ao todo, 1.002.198 partes de estruturas foram inspecionadas, incluindo em igual número decks e superestruturas. Ainda, com a categorização dos dados é possível também indicar qual dos fatores considerados é responsável pela degradação da ponte em determinada zona de serviço, e prever uma taxa a qual essa ponte sofrerá deterioração dentro de um espaço de tempo predeterminado.

O teste ANOVA é utilizado quando é proveitoso compreender se as diferenças amostrais observadas são reais, causadas por diferenças significativas nas populações, ou se essas diferenças são casuais, decorrentes apenas da variabilidade amostral. Para proceder com o teste é necessário assumir alguns pressupostos. O primeiro deles é que as amostras são aleatórias e independentes entre si; um outro fato é que as populações estudadas possuem distribuição normal. Sabendo disso, duas hipóteses são testadas:

- $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$
- $H_a =$  as médias das populações não são iguais

A chave para testar a igualdade de várias populações é observar a variabilidade entre as médias das populações. Uma grande variabilidade entre as amostras sugere que a média entre as populações não será igual. Conseqüentemente,  $H_0$  será rejeitado em favor de  $H_a$ . Claro que, a depender do estudo, “grande variabilidade” é um termo relativo. A variabilidade deve ser medida em relação às populações. Quando é dito que a variabilidade entre as amostras é grande, significa que ela é grande em comparação à variabilidade dos dados dentro das populações. Assim sendo, quando a variabilidade *entre* a média das amostras é grande em relação à variabilidade *dentro* das amostras, a hipótese nula é rejeitada e a conclusão é de que as médias das populações não são iguais.

Partindo desta discussão, pode ser dito que a variância  $\sigma^2$  é a medida da variabilidade esperada entre as amostras das populações e entre as populações de uma forma geral. Para os dados estudados, existem duas estimativas de  $\sigma^2$ . A primeira se baseia na variabilidade entre as amostras por zona; a segunda é a estimativa de variância entre as zonas. São chamadas *estimativa de  $\sigma^2$  amostral* e *estimativa de  $\sigma^2$  populacional*. Essas duas estimativas testam as hipóteses levantadas a respeito das médias. Portanto, a partir da comparação entre estimativas é possível dizer se a hipótese  $H_0$  é verdadeira ou não; se  $H_0$  é verdadeira as estimativas são comparáveis em valor; já se a segunda estimativa é muito maior que a primeira, a conclusão é que  $H_0$  é falsa. Na prática, é considerada a relação entre a estimativa 2 e a estimativa 1, e a validação da hipótese verdadeira é dada através do teste F. Então, se  $H_0$  for verdadeira, o valor de F não estará muito longe de 1. Se F for um valor grande,  $H_0$  é rejeitada.

$$F = \frac{\text{estimativa de } \sigma^2 \text{ populacional}}{\text{estimativa de } \sigma^2 \text{ amostral}} \quad (1)$$

Assumindo que as amostras pertencem à um número  $k$  de populações, sendo os dados da primeira população denominados  $x_1$ , os dados da segunda população denominados  $x_2$ , e assim por diante. O tamanho da população é representado por  $n$ , que pode ser dito como o número total de dados a serem analisados.

Para obter a estimativa de  $\sigma^2$  amostral, primeiro é calculada a soma dos quadrados de cada população, sendo a soma dos quadrados definida por:

$$S_q = \Sigma (x_1 - \bar{x}_1)^2 + \Sigma (x_2 - \bar{x}_2)^2 + \dots + \Sigma (x_k - \bar{x}_k)^2 \quad (2)$$

O número de graus de liberdade na soma dos quadrados amostral é definido  $n - k$ , sendo grau de liberdade dito como um número pelo qual a soma dos quadrados é dividida para se conseguir uma estimativa de variância da população. Assim, obtemos a estimativa de  $\sigma^2$  amostral, expressa pela equação abaixo.

$$\text{estimativa de } \sigma^2 \text{ amostral} = \frac{\Sigma (x_1 - \bar{x}_1)^2 + \Sigma (x_2 - \bar{x}_2)^2 + \dots + \Sigma (x_k - \bar{x}_k)^2}{n - k} \quad (3)$$

Para a estimativa populacional é preciso calcular os valores de média para cada população, e depois a média das populações, chamada *grande média*, e representada nas equações por  $\bar{\bar{x}}$ , e escrita sobre a forma:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_k}{k} \quad (4)$$

Depois, é calculado o desvio padrão entre as populações, e multiplicado cada desvio padrão pela quantidade de amostras por população observada.

$$S_Q = n_1 (\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + n_2 (\bar{x}_2 - \bar{x})^2 + \dots + n_k (\bar{x}_k - \bar{x})^2 \quad (5)$$

Por fim, é dada a soma dos quadrados entre as populações e obtemos valor para o numerador. Para se obter o denominador, é preciso definir o grau de liberdade populacional, dado por  $k - 1$ . A razão entre os fatores é dada como estimativa de  $\sigma^2$  populacional.

$$\text{estimativa de } \sigma^2 \text{ populacional} = \frac{n_1 (\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + n_2 (\bar{x}_2 - \bar{x})^2 + \dots + n_k (\bar{x}_k - \bar{x})^2}{k-1} \quad (6)$$

A tabela a seguir resume as equações descritas de forma a simplificar a compreensão.

Tabela 5 - Equações ANOVA

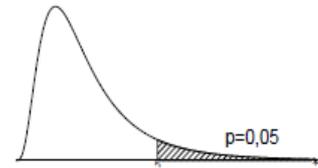
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	Teste F
Entre Populações	$S_Q$	$k - 1$	$\sigma^2_{pop.} = \frac{S_Q}{k - 1}$	$F = \frac{\sigma^2 \text{ populacional}}{\sigma^2 \text{ amostral}}$
Entre Amostras	$S_q$	$n - k$	$\sigma^2_{amos.} = \frac{S_q}{n - k}$	

Fonte: Fonseca e Martins (2010)

Sendo o nível de confiança do teste igual a  $\alpha$ , a hipótese nula é rejeitada quando  $F \geq F_\alpha$ . Para o teste em questão, o nível de confiança foi estabelecido em 95%, ou seja, serão observados valores comparativos para  $F_{0,05}$ . Esses valores podem ser encontrados na tabela representada pela figura 23. Para melhor compreensão, a figura 24 a seguir ilustra a relação entre  $F$  e  $F_{0,05}$ , sabendo que  $F \geq F_{0,05}$  exclui a hipótese de que as médias das populações tenham o mesmo significado, mesmo quando se apresentam em igual valor. Isso significa dizer também que os fatores escolhidos para comparação utilizando o teste  $F$  são determinantes para a situação da estrutura da ponte. A região de  $\alpha$ , também chamada de região crítica é usada como critério para a identificação de proporções amostrais não usualmente altas. A relação entre a variância encontrada entre as amostras e a variância encontrada entre as populações é o que define o teste da hipóteses e determina a validação do teste aplicado.

Figura 23 – Distribuição de F a 5%

Distribuição *F* de Snedecor a 5% (p=0,05)

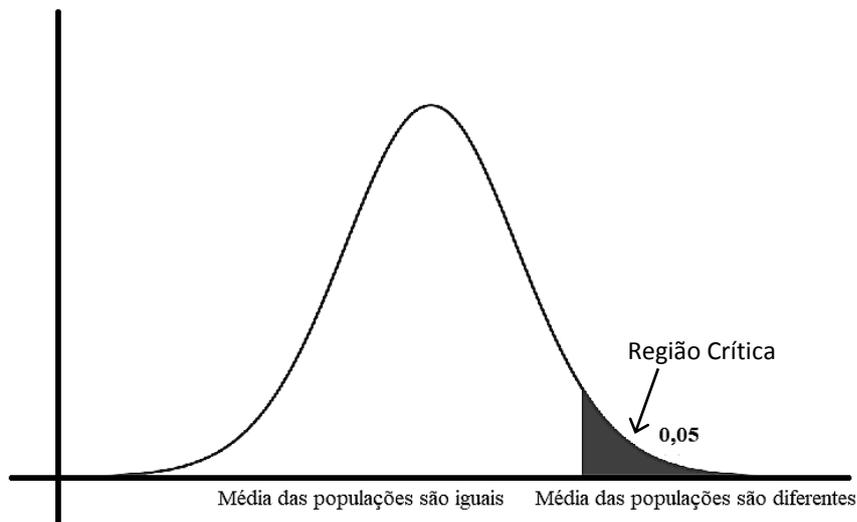


	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	15	16	18	20	30	40	60	120
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,41	19,42	19,43	19,43	19,44	19,45	19,46	19,47	19,48	19,49
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,71	8,70	8,69	8,67	8,66	8,62	8,59	8,57	8,55
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,87	5,86	5,84	5,82	5,80	5,75	5,72	5,69	5,66
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,64	4,62	4,60	4,58	4,56	4,50	4,46	4,43	4,40
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,96	3,94	3,92	3,90	3,87	3,81	3,77	3,74	3,70
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,53	3,51	3,49	3,47	3,44	3,38	3,34	3,30	3,27
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,24	3,22	3,20	3,17	3,15	3,08	3,04	3,01	2,97
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,03	3,01	2,99	2,96	2,94	2,86	2,83	2,79	2,75
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,86	2,85	2,83	2,80	2,77	2,70	2,66	2,62	2,58
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,74	2,72	2,70	2,67	2,65	2,57	2,53	2,49	2,45
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,69	2,64	2,62	2,60	2,57	2,54	2,47	2,43	2,38	2,34
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,55	2,53	2,51	2,48	2,46	2,38	2,34	2,30	2,25
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,53	2,48	2,46	2,44	2,41	2,39	2,31	2,27	2,22	2,18
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,42	2,40	2,38	2,35	2,33	2,25	2,20	2,16	2,11
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,37	2,35	2,33	2,30	2,28	2,19	2,15	2,11	2,06
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,33	2,31	2,29	2,26	2,23	2,15	2,10	2,06	2,01
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,29	2,27	2,25	2,22	2,19	2,11	2,06	2,02	1,97
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,26	2,23	2,21	2,18	2,16	2,07	2,03	1,98	1,93
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,22	2,20	2,18	2,15	2,12	2,04	1,99	1,95	1,90
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,20	2,18	2,16	2,12	2,10	2,01	1,96	1,92	1,87
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,23	2,17	2,15	2,13	2,10	2,07	1,98	1,94	1,89	1,84
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,20	2,15	2,13	2,11	2,08	2,05	1,96	1,91	1,86	1,81
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,18	2,13	2,11	2,09	2,05	2,03	1,94	1,89	1,84	1,79
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,16	2,11	2,09	2,07	2,04	2,01	1,92	1,87	1,82	1,77
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,15	2,09	2,07	2,05	2,02	1,99	1,90	1,85	1,80	1,75
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,13	2,08	2,06	2,04	2,00	1,97	1,88	1,84	1,79	1,73
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,12	2,06	2,04	2,02	1,99	1,96	1,87	1,82	1,77	1,71
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,10	2,05	2,03	2,01	1,97	1,94	1,85	1,81	1,75	1,70
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,09	2,04	2,01	1,99	1,96	1,93	1,84	1,79	1,74	1,68
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,00	1,95	1,92	1,90	1,87	1,84	1,74	1,69	1,64	1,58
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,92	1,86	1,84	1,82	1,78	1,75	1,65	1,59	1,53	1,47
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,18	2,09	2,02	1,96	1,91	1,83	1,78	1,75	1,73	1,69	1,66	1,55	1,50	1,43	1,35

Tabela 5: Quantis da Distribuição *F* para probabilidade  $p = P[F \geq F_{\alpha}] = 0,05$ . Grau de liberdade do numerador dado do topo e do denominador na margem esquerda.

Fonte: USP (2019)

Figura 24 – Demonstração de F e  $F_{0,05}$ ; região crítica



Fonte: A autora (2016)

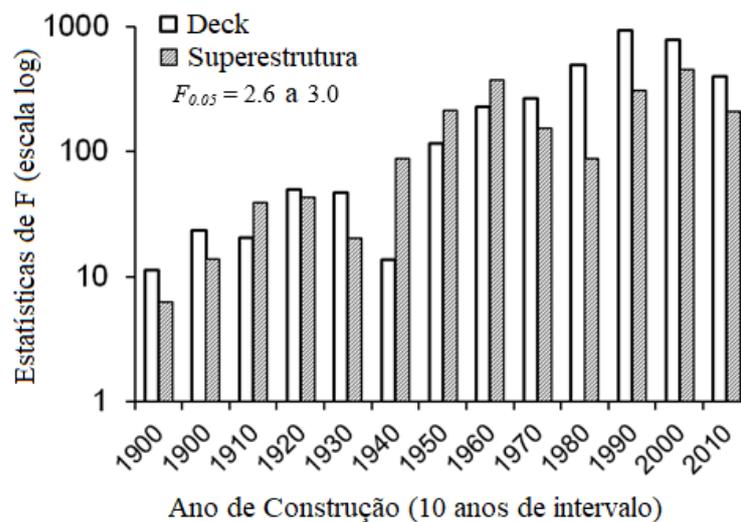
## 6.1 DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO

Para o desenvolvimento deste estudo, foram coletados dados do NBI e organizados de acordo com o parâmetro a ser observado. O teste ANOVA foi conduzido comparando:

- A classificação dada pelo NBI com relação ao ano de construção da ponte;
- A classificação dada pelo NBI com relação às condições de tráfego ao qual a ponte é exposta;
- A classificação dada pelo NBI com relação à variação de temperatura na zona de serviço à qual a ponte está incluída.

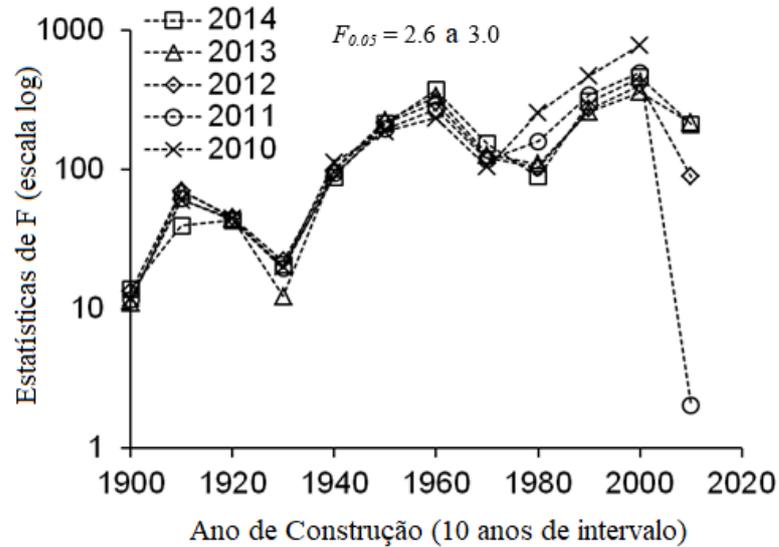
Na ANOVA, uma estatística F é calculada para um parâmetro (neste caso, o ano de construção em relação às classificações de deck e superestrutura) e comparada com um valor crítico a um certo nível de confiança, dependendo do número de graus de liberdade (um nível de confiança de 95% foi empregado no presente estudo,  $F_{0,05}$ ). Se um valor de  $F_0$  for maior que seu equivalente  $F_{0,05}$ , conclui-se que o efeito do fator é estatisticamente significativo. As figuras a seguir mostram as estatísticas F calculadas das classificações de decks e superestruturas em relação ao ano de construção para todas as zonas, com base no ano de inspeção de 2014. Os valores para  $F_{0,05}$  foram determinados seguindo a tabela apresentada pela figura 23, distribuição F de Snedecor.

Figura 25 – Análise de variância para classificação de decks e superestruturas



Fonte: A autora (2016)

Figura 26 – Análise de variância para classificação da superestrutura por ano de inspeção



Fonte: A autora (2016)

O efeito do ano de construção foi estatisticamente significativo na classificação de condição dos membros (valores de  $F_{0,05}$  variaram de 2,6 a 3,0, dependendo dos graus de liberdade nas pontes construídas durante um determinado período). Isto implica que o ano em que a ponte foi construída é um fator fundamental a ser considerado quando se examina estatisticamente o desempenho dos membros existentes.

A variação da estatística F na classificação da superestrutura com anos de inspeção de 2010 a 2014 é dada na figura 26. Valores de F relativamente consistentes foram obtidos em todos os anos de inspeção, embora as superestruturas nas pontes construídas após 2010 revelaram um baixo valor de F no ano de inspeção de 2011 (indicando uma diferença estatística insignificante porque todas as pontes eram novas).

Para avaliar o efeito integrado dos fatores selecionados (ou seja, tipos de decks e superestruturas em relação ao ADT) e sua interação na resposta de membros de pontes construídas (ou seja, avaliações associadas ao ano de construção), ANOVA de dois fatores (Montgomery, 2013) foi realizada a um nível de confiança de 95%. A tabela 6 mostra a classificação da condição da superestrutura do Estado A na Zona 1, comparando os resultados para tipo de estrutura e ano de construção, adquirida do método ANOVA de dois fatores.

Tabela 6 – Classificação de condição de superestruturas da Califórnia (ANOVA)

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Grande média	$F_0$	$F_{0,05}$	Significância
Ano de Construção	97.3	12	8.1	0.426	3.92	Insignificante
Tipo de Superestrutura	746.9	9	82.9	4.364	3.92	Significante
Interação	26.6	1	26.6	1.399	3.92	Insignificante
Total	870.8	22	-	-	-	-

Fonte: A autora (2016)

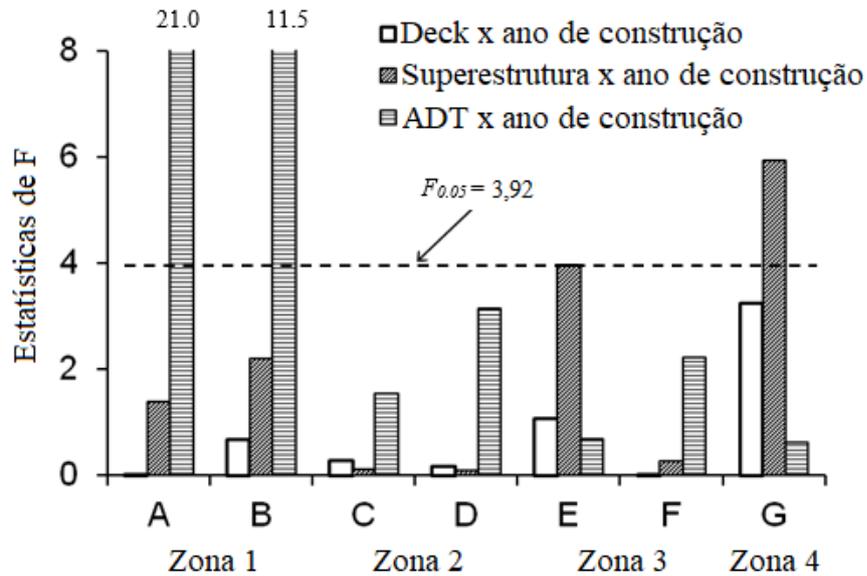
A estatística  $F_0$  do ano de construção ( $F_0 = 0,426$ ) foi menor do que o valor crítico de  $F_{0,05} = 3,92$ , o que significa que o ano de construção em conjunto com os tipos de superestrutura é estatisticamente insignificante na classificação da superestrutura. No entanto, o tipo de superestrutura foi significativo ( $F_0 = 4,364 > F_{0,05}$ ). A interação entre esses dois fatores (ano de construção e tipo de superestrutura) também foi insignificante; em outras palavras, não houve evidência estatística alegando que esses dois fatores estavam correlacionados. Os resultados de ANOVA de dois fatores estão resumidos na tabela 6 e comparados na Figura 27.

Tabela 7 – Estatísticas de F ( $F_{0,05} = 3.92$ )

Zona	Estado	Tipo de deck e ano de construção			Tipo de superestrutura e ano de construção			ADT e ano de construção		
		D	Y	I	S	Y	I	ADT	Y	I
1	A	1.64	0.92	0.00	4.36	0.43	1.40	0.69	3.84	21.04
	B	4.78	0.83	0.68	3.22	1.12	2.21	3.38	4.74	11.49
2	C	2.86	0.22	0.29	7.55	0.50	0.11	0.18	1.44	1.54
	D	2.88	0.33	0.17	3.74	0.48	0.10	0.15	3.49	3.15
3	E	3.25	1.55	1.08	4.65	2.02	4.00	0.80	3.97	0.68
	F	2.28	0.29	0.00	3.23	0.16	0.26	1.23	2.04	2.22
4	G	3.40	1.59	3.26	3.49	1.26	5.94	0.64	3.13	0.62

Legenda: D = Deck; S = Superestrutura; Y = Ano de construção; I = Interação

Fonte: A autora (2016)

Figura 27 – Estatísticas de F ( $F_{0,05} = 3,92$ )

Fonte: A autora (2016)

A interação de desempenho entre o tipo de deck e ano construído foi insignificante em todas as zonas. Uma observação semelhante foi feita entre o tipo de superestrutura com relação ao ano de construção, exceto na Zona 4, onde a interação foi significativa (a interação na Zona 3 foi no limite). Estes resultados apoiam estatisticamente que a seleção adequada dos tipos de materiais utilizados é crucial para estender o desempenho (classificações) e a longevidade (ano de construção) dos membros da ponte durante a vida útil das pontes construídas. Por exemplo, a porção de superestruturas de madeira na Zona 4 era muito mais alta que em outras zonas e o efeito da precipitação era notável. O efeito da ADT foi significativamente alto na Zona 1 ( $F_0 = 21,0$  e  $11,5$  para os Estados A e B, respectivamente), o que estatisticamente confirma o fato de que o tráfego era um fator primário influenciando a classificação de condição das pontes da Zona 1 ao interagir com o ano de construção.

## 6.2 MODELAGEM DE DEGRADAÇÃO

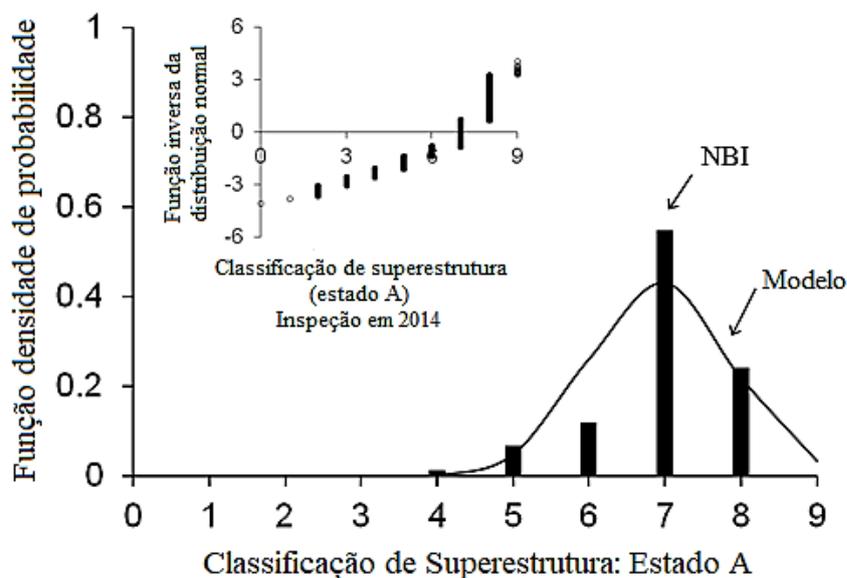
Como a deterioração da ponte não é determinística, investigações probabilísticas são necessárias para representar o desempenho das pontes construídas. Esta seção fornece uma abordagem de modelagem usando a análise de dados, define um domínio de degradação de desempenho, e propõe uma taxa de degradação.

### 6.2.1 Distribuição da Probabilidade

Uma verificação de normalidade foi realizada pela primeira vez para identificar um tipo de distribuição de probabilidade para os conjuntos de decks e superestruturas. Como mostrado na figura 28 (somente superestruturas da Califórnia são apresentadas para concisão), a função inversa da distribuição normal aumentou linearmente com as classificações da superestrutura, e a função densidade de probabilidade normal da classificação correspondeu razoavelmente com o histograma discreto extraído dos dados do NBI. Estas observações indicam que a função densidade de probabilidade das classificações de deck e superestrutura é dita como normalmente distribuída.

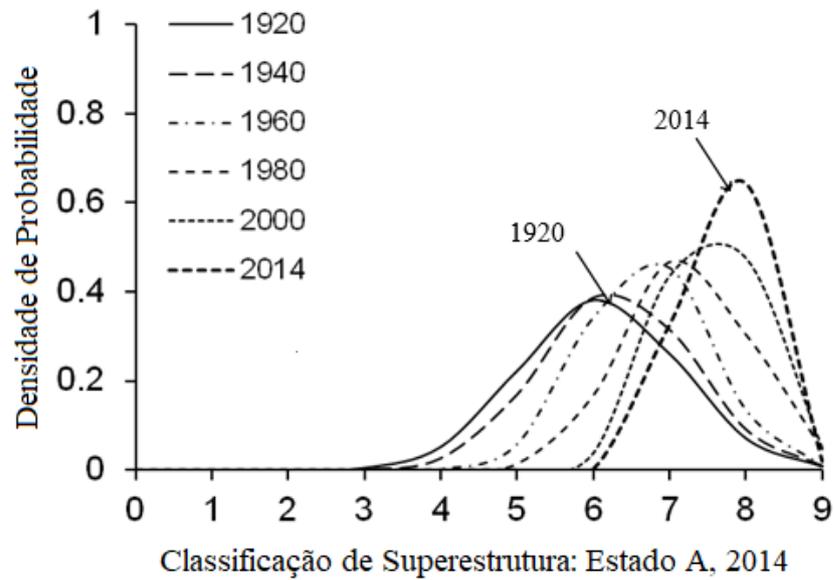
A figura 29 a seguir exibe uma tendência de mudança na classificação da superestrutura com um aumento no ano de construção (um intervalo de 10 anos é usado para ilustrar as curvas de densidade de probabilidade; por exemplo, o ano de 1940 abrange superestruturas construídas entre 1931 e 1940). Como as superestruturas estão envelhecendo, as curvas de densidade tendem a se alargar (em termos estatísticos, os desvios-padrão aumentaram) porque sua incerteza sobre a performance dos membros da ponte também aumentou e o grau de deterioração não foi determinístico

Figura 28 – Identificando a distribuição de probabilidade



Fonte: A autora (2016)

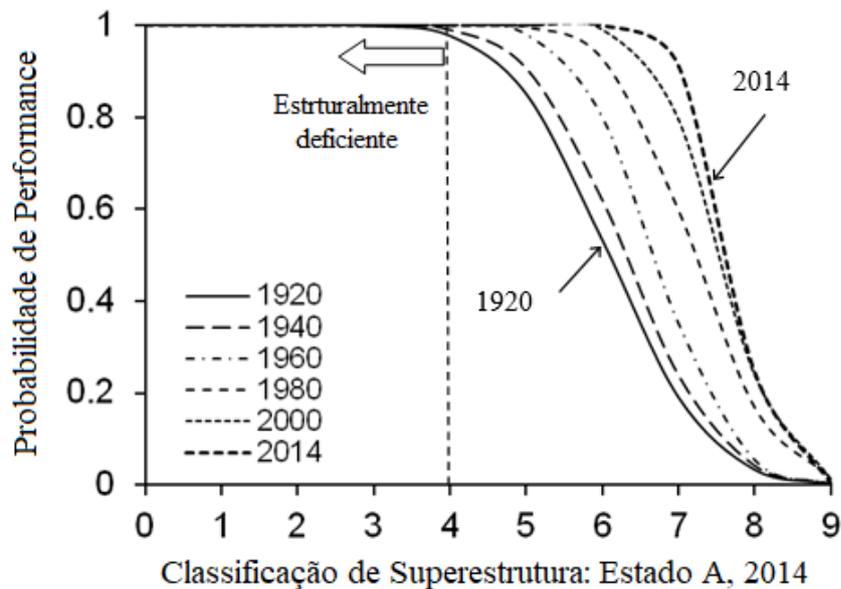
Figura 29 – Variação da classificação da superestrutura por ano de construção



Fonte: A autora (2016)

A probabilidade de desempenho desses membros da ponte é fornecida na figura 30 e é definida como  $1 - \text{CDF}$ , onde CDF é a função de distribuição cumulativa da classificação e indica a probabilidade de deterioração.

Figura 30 – Probabilidade de performance da superestrutura por ano de construção



Fonte: A autora (2016)

Devido à manutenção e reparo regulares, a classificação de condição para a maioria das superestruturas estava fora da região considerada estruturalmente deficiente (classificação 4). As superestruturas construídas antes de 1920, no entanto, mostraram uma queda rápida de desempenho, e a probabilidade de ter uma classificação de 7 (bom) ou superior foi de 19%, o que é significativamente menor do que a probabilidade daquelas construídas entre 2010 e 2014 (91% de probabilidade). Com base nessas investigações a respeito de probabilidade, uma métrica para caracterizar a degradação do desempenho foi desenvolvida.

### 6.2.2 Taxa de Degradação

O princípio da probabilidade de falha tradicional (McPherson, 2013) foi empregado para quantificar a degradação das pontes discutidas acima, dependendo da localização das zonas de serviço. A taxa de degradação do desempenho com o tempo pode ser definida como:

$$\frac{dPr}{dt} = -\kappa(y)Pr_p(y) \quad (7)$$

onde  $\kappa(y)$  e  $Pr_p(y)$  são o fator de taxa de degradação e a probabilidade de desempenho, respectivamente, de uma ponte construída no ano  $y$ . A probabilidade de desempenho que mostra a classificação de um elemento de ponte maior que uma classificação considerada no limite ( $R_{TH}$ ) pode ser obtida por:

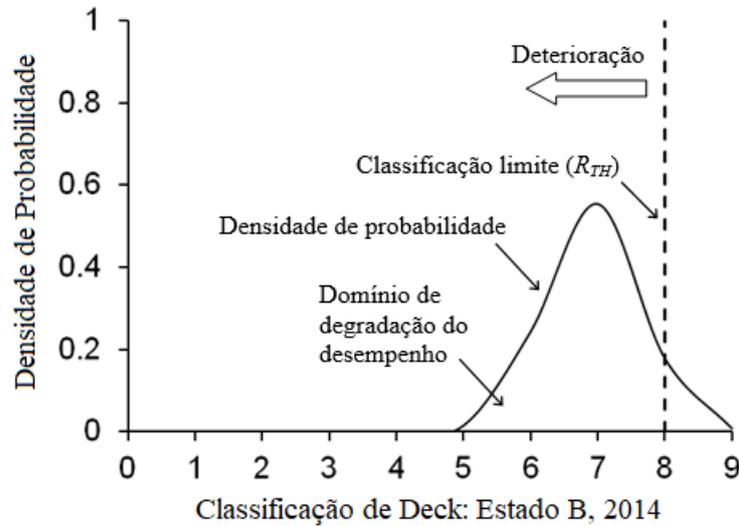
$$Pr_p(y) = 1 - C(y) \quad (8)$$

onde  $C(y)$  é a probabilidade de deterioração cumulativa da ponte construída no ano  $y$ . Substituindo Eq. 2 na Eq. 1 e reorganizando:

$$\kappa(y) = \frac{1}{[1 - C(y)]} \frac{dC(y)}{dt} = \frac{P(y)}{[1 - C(y)]} \quad (9)$$

onde  $P(y)$  é a função densidade de probabilidade para uma ponte construída no ano  $y$ . A figura a seguir exemplifica essa distribuição e explica como ocorre a degradação das pontes pelo ponto de vista do domínio de degradação do desempenho. É tido que uma ponte com classificação ‘nove’ está em perfeito estado de funcionamento, como mostra o limite definido na figura 31.

Figura 31 – Estimativa do domínio de degradação

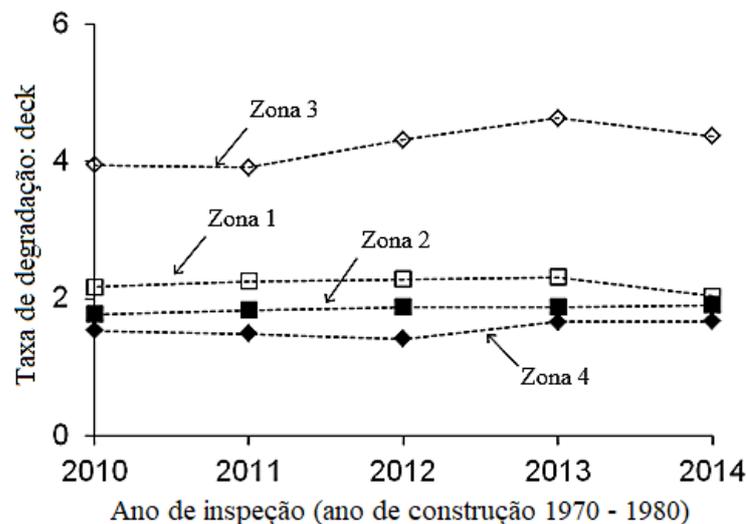


Fonte: A autora (2016)

Assim, pode ser dito que a degradação se inicia quando esta mesma ponte atinge uma classificação ‘oito’. Essa degradação se mantém até que a ponte atinja uma classificação ‘cinco’, pois ao atingir classificação ‘quatro’ a ponte é dita como estruturalmente deficiente, sendo necessárias grandes ações de manutenção ou reparo.

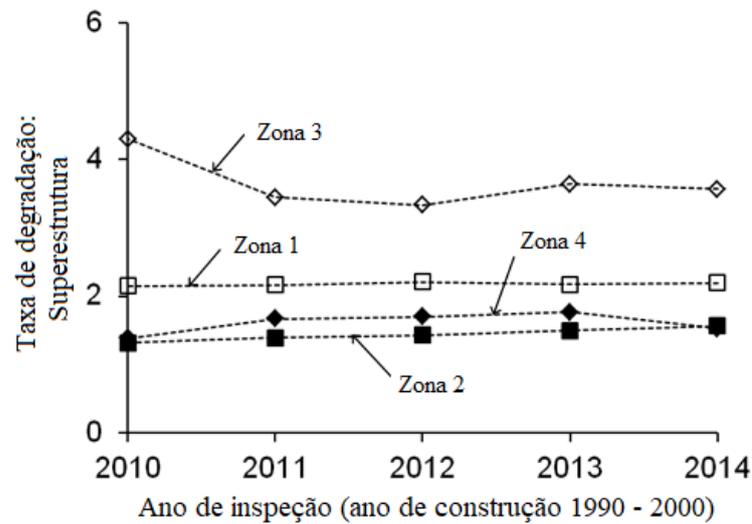
O fator de degradação proposto foi usado para avaliar o desempenho dos membros da ponte em cada zona de serviço (as figuras 32 e 33 mostram fatores de anos selecionados para explicar como a abordagem desenvolvida é implementada).

Figura 32 – Efeito do ano de inspeção no fator taxa de degradação para decks



Fonte: A autora (2016)

Figura 33 – Efeito do ano de inspeção no fator taxa de degradação para superestruturas



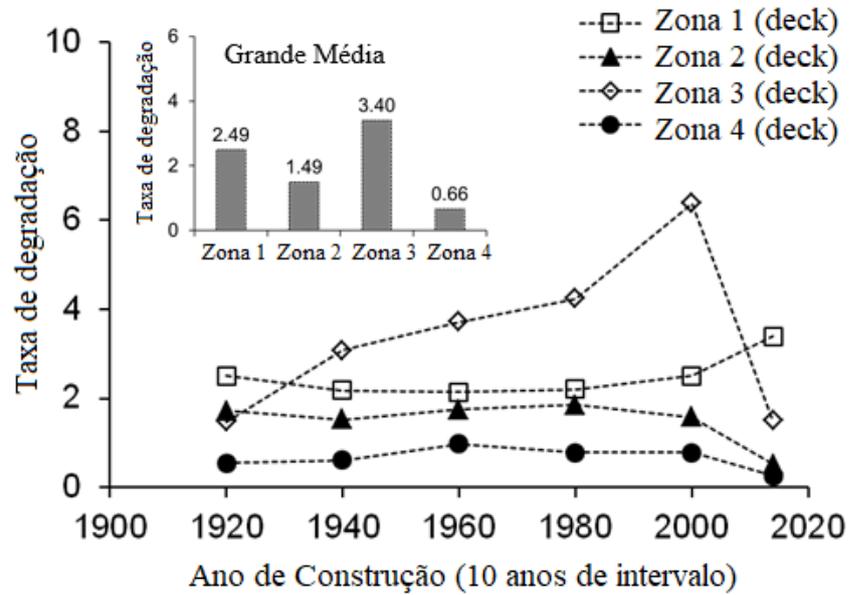
Fonte: A autora (2016)

Foram feitas as suposições de que a tendência da ação de reparo e manutenção em cada zona é preservada, os ambientes de serviço não são alterados significativamente, e que os dados da ponte dos estados selecionados representam as pontes das zonas individuais.

A degradação dos decks e superestruturas na Zona 3 foi superior à dos membros da Zona 1, como mostrado nas figuras, independentemente do ano de inspeção. A degradação dos membros da ponte nas Zonas 2 e 4 foi semelhante e inferior à dos membros nas Zonas 1 e 3.

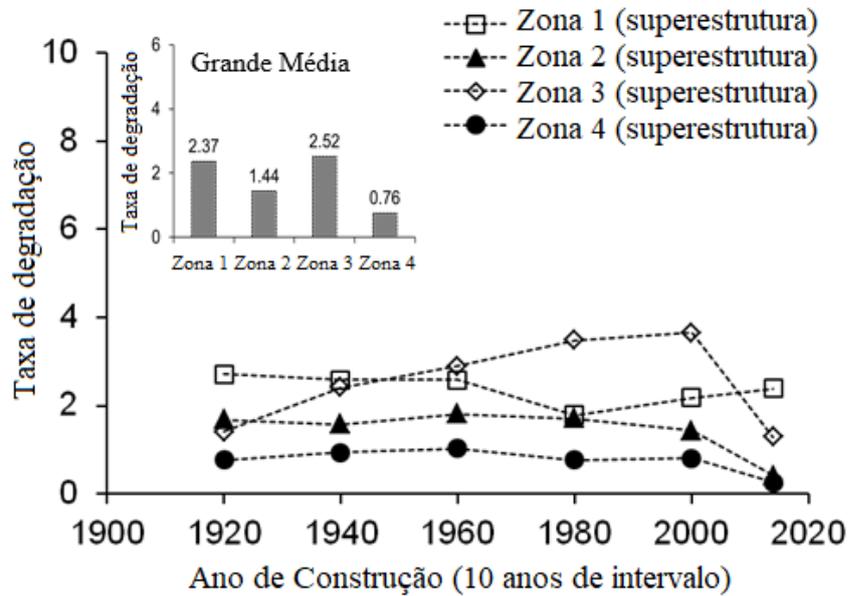
Uma comparação que abrange os fatores de degradação nas zonas individuais em relação ao ano de construção é ilustrada nas figuras 34 e 35. O fator de degradação dos decks de pontes na Zona 3 aumentou quase linearmente até o ano de construção de 2000, depois caiu de forma abrupta. Em contrapartida, os decks de outras zonas apresentavam fatores de degradação estáveis em todos os períodos do ano, embora houvesse variações marginais em pontes relativamente novas (ou seja, o fator na Zona 1 aumentou e o fator nas Zonas 2 e 4 diminuiu após 2000). De acordo com a grande média dos fatores de degradação, os decks construídos na Zona 4 deterioraram-se com o tempo (grande média 0,66) e os das Zonas 1 e 3 deterioraram-se mais rapidamente (grandes médias 2,49 e 3,4, respectivamente). Assim, as cargas geradas pelo tráfego podem ser ditas como um contribuinte primário para a deterioração do deck. Já o efeito térmico parece ser parcialmente influente, e o da umidade, insignificante.

Figura 34 – Fator de degradação do deck nas zonas individuais



Fonte: A autora (2016)

Figura 35 – Fator de degradação da superestrutura nas zonas individuais



Fonte: A autora (2016)

O fator taxa de degradação das superestruturas mostrou uma tendência semelhante à dos decks. A taxa de degradação dos decks foi, no entanto, mais rápida do que a taxa das superestruturas (por exemplo, grandes médias de 3,40 e 2,52 foram obtidas na Zona 3), exceto no caso da Zona 4. Isso pode ser explicado pelo fato de que as superestruturas de madeira foram responsáveis por mais de 20% das pontes construídas na Zona 4, e estas não são duráveis em

relação a outros tipos de superestrutura, como por exemplo o concreto protendido. Os fatores propostos são recomendados para prever a futura degradação de decks e superestruturas construídos em cada zona de serviço.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo discutiu o desempenho de pontes construídas nos Estados Unidos, com base na análise de quantidade considerável de dados. Dados de um total de 1.002.172 decks e superestruturas foram coletadas do Inventário Nacional de Pontes (*National Bridge Inventory*, NBI), e categorizadas em quatro regiões de serviço (Zonas 1-4) de acordo com as especificações de projeto de ponte determinadas pelo órgão responsável (*American Association of State Highway and Transportation Officials*, AASHTO) segundo o Projeto de Fator de Carga e Resistência (*Load and Resistance Factor Design*, LRFD). Dois estados típicos foram selecionados em cada zona (exceto a Zona 4, que possui apenas um estado) para representar as classificações de condição das respectivas regiões.

As características espaciais e comportamentais dos membros da ponte foram examinadas empregando abordagens estatísticas e probabilísticas, em conjunto com os atributos de tráfego e ambientais. Como o tamanho do conjunto de dados do NBI aumenta enormemente com o tempo, uma atualização regular das informações técnicas (por exemplo, a cada 5 a 10 anos) usando as abordagens propostas permitirá que as agências de transporte implementem um programa de gerenciamento de pontes de última geração. De maneira conjunta, as abordagens discutidas aqui podem ser implementadas com tecnologias de computação em nuvem para processamento e avaliação de dados em tempo real, o que será uma direção potencial para futuras pesquisas.

Cada zona de serviço exibiu sua própria tendência de crescimento em número de pontes durante períodos específicos de construção. Depois de 2011, a construção de pontes diminuiu em todas as zonas. As superestruturas baseadas em concreto representaram porções significativas para as pontes construídas nas Zonas 1, 2 e 3 (79%, 72%, 85%, respectivamente); no entanto, as superestruturas baseadas em aço e madeira foram amplamente utilizadas na Zona 4 (51% e 21%, respectivamente). Em decks de pontes, os tipos concreto moldado e pré-moldado foram predominantemente utilizados, com exceção dos decks de madeira na Zona 4 (43%), que não eram empregados com frequência em outras regiões (3%, 5% e 3% Zonas 1, 2 e 3, respectivamente).

As pontes nas Zonas 1 e 3 experimentaram volumes de tráfego significativamente maiores do que aquelas nas Zonas 2 e 4. A perturbação induzida pela temperatura (por exemplo, expansão e contração térmicas) foi um fator que influenciou a degradação das pontes construídas nas Zonas 1 e 4.

Os decks de pontes em todas as zonas de serviço deterioraram-se rapidamente quando as pontes foram abertas ao tráfego e a sua tendência de deterioração estabilizou-se com o tempo devido aos serviços de manutenção e reparo. As classificações de superestrutura das pontes foram incrementadas de maneira linear com o ano de construção; no entanto, os gradientes de classificação dos membros diminuíram com o ano de construção (deterioração física dos membros com o tempo a uma determinada taxa).

Embora a classificação de condição dos decks das pontes não tenha sido perceptivelmente influenciada por seus tipos, as superestruturas de concreto protendido apresentaram melhor desempenho do que outros tipos de superestrutura em todas as zonas. Do ponto de vista estatístico, o ano foi um fator fundamentalmente importante relacionado às classificações. De acordo com a análise de variância de dois fatores, o desempenho e a longevidade das pontes construídas podem ser aprimorados pela seleção de tipos estruturais adequados com a devida consideração dos ambientes de serviço, em vez da seleção de membros por disponibilidade regional.

As classificações dos decks e superestruturas exibiram uma distribuição de probabilidade normal. Com um aumento no ano de serviço, a incerteza de desempenho associada aos membros da ponte aumentou, incluindo uma mudança na probabilidade de deterioração. O modelo baseado em probabilidade indicou que os membros da ponte nas Zonas 1 e 3 se deterioraram mais que os membros nas Zonas 2 e 4, devido ao maior tráfego e variações térmicas. Em geral, a taxa de deterioração dos decks foi maior que a das superestruturas.

Com base no estudo apresentado, a aplicação do teste de hipóteses pode ser tida como modelo para análise e comparação de fatores determinantes para o desempenho de um sistema, e utilizada para várias outras finalidades, como por exemplo, no campo da engenharia, a avaliação da condição das linhas de transmissão elétrica, ou ainda a avaliação da condição de sistemas hidráulicos ou hidrossanitários.

## 8. REFERÊNCIAS

AASHTO. **AASHTO LRFD Bridge Design Specifications** (7<sup>th</sup> Edition), American Association of State Highway Transportation Officials, Washington, D.C. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7187: Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

AWA COMERCIAL, **Estruturas de pontes que todo engenheiro precisa conhecer**, São Paulo, 2016. Disponível em <<http://awacomercial.com.br/blog/tipos-estruturas-de-pontes/>>. Acesso em 8 mar. 2019.

BOLUKBASI, M., MOHAMMADI, J., and ARDITI, D. **Estimating the future condition of highway bridge components using national bridge inventory data**, Practice Periodical on Structural Design and Construction, 9(1), 16-25. 2004.

CHASE, W. and BOWN, F. **General statistics: 3<sup>rd</sup> edition**, John Wiley and Sons, New York, NY. 1997.

CIMENTO.ORG. **A história do concreto**. [S.I.], 2008. Disponível em <<https://cimento.org/concreto/>>. Acesso em 11 mar. 2019.

FERRAZ, H. **O aço na construção civil**, Revista eletrônica de ciências, artigo número 22, São Carlos, 2005. Disponível em <<https://www.ft.unicamp.br/~mariaacm/ST114/O%20A%C7O%20NA%20CONSTRU%C7%C3O%20CIVIL.pdf>>. Acesso em 09 mar. 2019.

FONSECA, J. e MARTINS, G. **Curso de Estatística**, São Paulo, 2010.

GORGES, W. **Introdução à engenharia de Pontes**, PUC – Paraná , 2005. Disponível em <<https://enghariacivilfsp.files.wordpress.com/2015/02/pontes-cap-1-2-e-3.pdf>>. Acesso em 09 mar. 2019.

HASSANIEN, A.E., AZAR, A.T., SNASEL, V., KACPRZYK, J., and ABAWAJY, J.H. **Big data in complex systems**, Springer, Berlin, Germany. 2015.

I-84 WATERBURY PROJECTS, **I-84 Waterbury Widening**, AECOM, Connecticut, 2015. Disponível em <<http://widening.i-84waterbury.com/pages/43-ct-transportation-fast-facts>>. Acesso em 1 mar. 2019.

INSTITUTO DA ENGENHARIA, **A utilização do aço na construção civil**, São Paulo, 2015. Disponível em <<https://www.institutodeengenharia.org.br/site/2015/10/06/a-utilizacao-do-aço-na-construcao-civil/>>. Acesso em 10 mar. 2019.

JEZEK, Geno. **History of concrete**, [S.I.], 2006. Disponível em <<http://www.howconcreteworks.com/>>, Acesso em 10 mar. 2019.

KIM, Y.J. and QUEIROZ, L.B. **Big Data for condition evaluation of constructed bridges**, Journal of Engineering Structures, 141, 217 - 227. 2017.

KIM, Y.J. and YOON, D.K. **Identifying critical sources of bridge deterioration in cold regions through the constructed bridges in North Dakota**, Journal of Bridge Engineering, 15(5), 542-552. 2010.

MCPHERSON, J.W. **Reliability physics and engineering**, Springer, New York, NY. 2013.

MISHALANI, R.G. and MADANAT, S.M. **Computation of infrastructure transition probabilities using stochastic duration models**, Journal of Infrastructure Systems, 8(4), 139-148. 2002.

MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**, John Wiley and Sons, Hoboken, NJ. 2013.

NASROLLAHI, M. and WASHER, G. **Estimating inspection intervals for bridges based on statistical analysis of national bridge inventory data**, Journal of Bridge Engineering, 20(9), 04014104. 2015.

NOAA. 2012. **Climate monitoring**, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, MD.

PENNER, E. e ALMEIDA, P. **Avaliação de desempenho de sistemas estruturais de pontes de concreto**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

PEREIRA, J. e CUNHA, D. **O uso de madeira na construção civil: estudo de caso no bairro Cidade Nova em Governador Valadares – MG**. Minas Gerais, 2013. Disponível em <[http://www3.ifmg.edu.br/site\\_campi/v/images/arquivos\\_governador\\_valadares/TCCjusciano.pdf](http://www3.ifmg.edu.br/site_campi/v/images/arquivos_governador_valadares/TCCjusciano.pdf)>. Acesso em 13 mar. 2019.

USCB. 2014. **Population estimates**, United States Census Bureau, Washington, D.C.