



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**  
Centro de Tecnologia e Ciências  
Faculdade de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

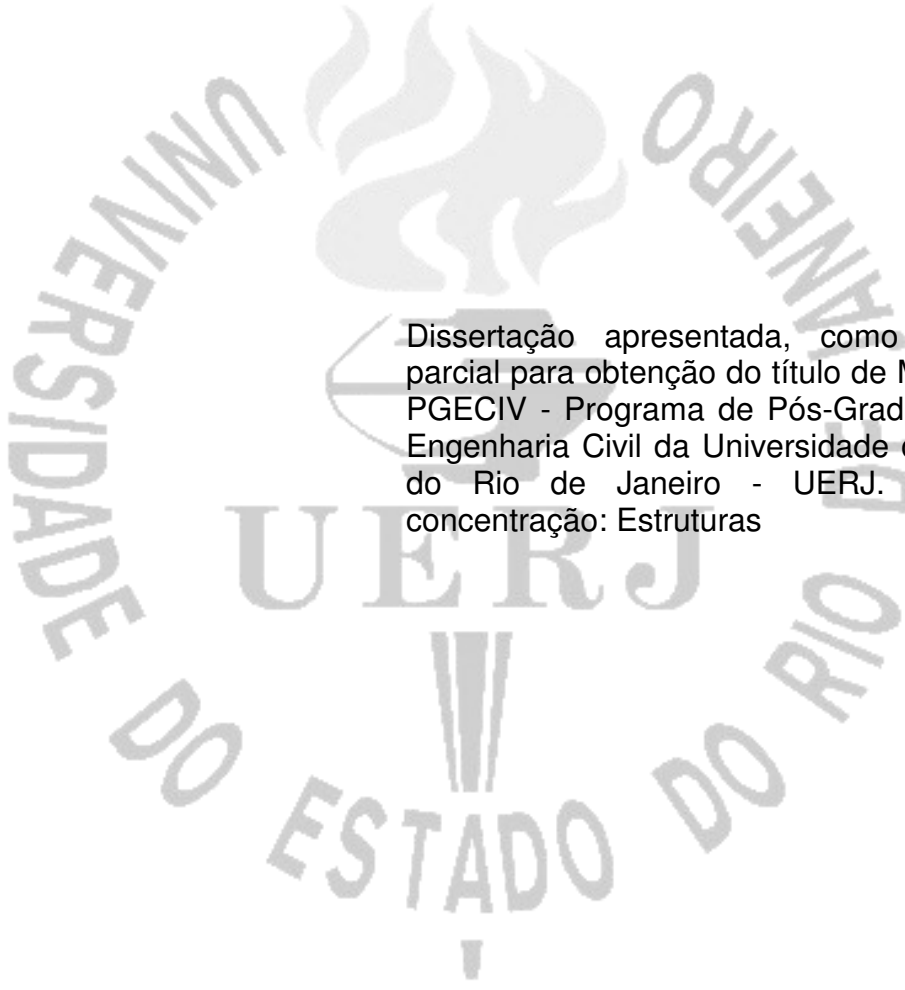
**Fernando Nahid Leitão**

**Verificação à Fadiga de Pontes Rodoviárias Mistas (Aço-Concreto)**

Rio de Janeiro  
2009

Fernando Nahid Leitão

**Verificação à Fadiga de Pontes Rodoviárias Mistas (Aço-Concreto)**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao PGECIV - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ. Área de concentração: Estruturas

Orientador: Prof. José Guilherme Santos da Silva, DSc.  
Co-orientador: Prof. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco, PhD.  
Co-orientador: Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima, DSc.

Rio de Janeiro  
2009

Fernando Nahid Leitão

## **Verificação à Fadiga de Pontes Rodoviárias Mistas (Aço-Concreto)**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao PGE CIV - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ. Área de concentração: Estruturas

Aprovado em 06 de Março de 2009.

Banca Examinadora:

---

**Prof. José Guilherme Santos da Silva, DSc - Presidente / Orientador**  
Departamento de Engenharia Mecânica - UERJ

---

**Prof. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco, PhD**  
Departamento de Estruturas e Fundações - UERJ

---

**Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima, DSc**  
Departamento de Estruturas e Fundações - UERJ

---

**Prof. Raul Rosas e Silva, PhD**  
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

---

**Prof. Sebastião Arthur Lopes de Andrade, PhD**  
Departamento de Estruturas e Fundações - UERJ

Rio de Janeiro  
2009

## DEDICATÓRIA

Aos meus familiares pelo amor incondicional, pela paciência nos momentos difíceis, pelo incentivo aos meus estudos e pelo apoio constante ao meu desenvolvimento profissional e pessoal.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha mãe que diariamente dedicou todo o seu carinho e apoio através de incentivo, compreensão e da manutenção do nosso lar.

Ao meu pai pelo apoio aos estudos, conhecimentos compartilhados, oportunidades proporcionadas e valores ensinados.

A minha noiva e futura esposa pelo carinho, solidariedade e compreensão demonstrada através de palavras e gestos.

Ao meu irmão e minha cunhada pela prontidão e companheirismo.

A minha família e amigos que souberam entender meus momentos de ausência.

Ao meu orientador, professor e amigo José Guilherme Santos da Silva, pelos conhecimentos passados, pelo reconhecimento, pela paciência e apoio dispensados nesses anos prazerosos de trabalho e convívio.

Aos meus co-orientadores, professores e amigos Luciano Rodrigues Ornelas de Lima e Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco pela prontidão, conversa e amizade que não faltaram desde os tempos de graduação.

Aos professores e funcionários do PGECIV - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, em especial aos professores Francisco Soeiro, Luiz Biondi e Sebastião Andrade pelo aprendizado e reconhecimento dispensados.

Aos amigos e companheiros do programa de pós-graduação por todo o convívio e solidariedade.

A todos os profissionais, com quem pude conviver de alguma forma nesses anos de estudo, pela compreensão e apoio dispensados.

A CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro.

A todos que, de alguma maneira, contribuíram na execução deste trabalho.

“A diferença entre o possível e o impossível está na vontade humana.”

*Louis Pasteur*

## RESUMO

LEITÃO, Fernando Nahid. *Verificação à Fadiga de Pontes Rodoviárias Mistas (Aço-Concreto)*. 2009. 264f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

As pontes rodoviárias mistas (aço-concreto) estão sujeitadas às ações dinâmicas variáveis, por exemplo, devido ao tráfego de veículos sobre a superfície irregular do pavimento. Estas ações dinâmicas podem gerar a nucleação de fraturas ou mesmo a sua propagação sobre a estrutura. A correta consideração desses aspectos objetivou o desenvolvimento de uma metodologia de análise, com a finalidade de avaliar os níveis dos esforços e tensões oriundos do tráfego dos veículos sobre a superfície irregular do pavimento e, bem como, proceder uma verificação à fadiga de obras de arte rodoviárias em aço e mistas (aço-concreto). Para tal, as técnicas para a contagem de ciclos de tensão e a aplicação das regras de dano acumulado foram analisadas através de curvas do tipo S-N, associadas a diversas normas de projeto. A ponte rodoviária mista (aço-concreto) investigada neste estudo é constituída por quatro vigas de aço longitudinais e por um tabuleiro de concreto armado. O modelo numérico-computacional, desenvolvido para a análise dinâmica da ponte, foi concebido com base em técnicas usuais de discretização através do método dos elementos finitos. Simulam-se as almas das vigas de aço e as lajes de concreto do tabuleiro através de elementos finitos de casca. As mesas dessas vigas, transversinas e os enrijecedores são modelados por elementos de viga tridimensionais. Os veículos são representados a partir de sistemas "massa-mola-amortecedor". O tráfego dessas viaturas é considerado mediante a simulação de comboios semi-infinitos, deslocando-se com velocidade constante sobre a ponte. As conclusões da presente investigação versam acerca da vida útil de serviço dos elementos estruturais de pontes mistas (aço-concreto).

Palavras-chave: Análise dinâmica, pontes rodoviárias mistas, fadiga, irregularidade de pavimento, modelagem computacional.

## ABSTRACT

Steel and composite highway bridges (steel-concrete) are currently subjected to dynamic actions, for example, variable magnitude due to vehicles traffic on the deck rough pavement. These dynamic actions can generate the fractures nucleation or even their propagation on the structure. The correct consideration of these aspects pointed out to an analysis methodology developed, in order to evaluate the stresses through a dynamical analysis on highway bridge decks, due to vehicles crossing on the irregular pavement surfaces and to proceed a fatigue verification from Steel and composite highway bridges (steel-concrete). The stress cycles counting techniques and the cumulative damage rules application had been analyzed through S-N curves associated with diverse projects norms. The steel and composite highway bridge (steel-concrete), investigated in this study, is constituted by four longitudinal steel beams and a composite deck. The computational model, developed for the bridge dynamic analysis, adopted the usual mesh refinement techniques present in finite element method simulations. The beam web thickness was represented by shell finite elements. The beam top and bottom flange and the longitudinal and vertical stiffeners were simulated by three-dimensional beam elements, where flexural and torsion effects were considered. The bridge concrete slab was simulated by shell finite elements. The vehicles are represented from "mass-spring-damper" systems. The traffic of these vehicles is considered as a simulation of half-infinite convoys dislocating with constant speed on the bridge. The present study conclusions concerning steel and composite highway bridges (steel-concrete) structural elements service life.

Key-words: Dynamical analysis, steel and composite highway bridges, fatigue, deck rough pavement surface, computational modeling.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Viaduto da Linha Amarela, Jacarepaguá, RJ, Brasil.....	26
Figura 1.2 - Construção do viaduto da perimetral, RJ, Brasil, Pinho e Belley (2007)	28
Figura 1.3 - Construção da Linha Vermelha, RJ, Brasil, Pinho e Belley (2007) .....	28
Figura 1.4 - Fratura visível, ponte Hoan, Estados Unidos, Wikipédia (2009) .....	29
Figura 2.1 - Exemplo de tensão com amplitude constante.....	38
Figura 2.2 - Exemplo de tensão com amplitude variável e aleatória .....	39
Figura 2.3 - Processo de fadiga em uma placa fina sob cargas cíclicas, Branco, et al (1999) .....	40
Figura 2.4 - Fraturas visíveis, ponte Hoan, Estados Unidos, Wikipédia (2009).....	41
Figura 2.5 - Exemplo esquemático de uma curva S-N .....	47
Figura 2.6 - Modelo de histórico de tensões.....	48
Figura 2.7 - Histórico de tensões reduzido a picos e vales .....	49
Figura 2.8 - Metodologia de fluxo (gota de chuva) para picos e vales .....	50
Figura 2.9 - Exemplo de aplicação do método Rainflow .....	50
Figura 2.10 - Contagem dos ciclos do exemplo de aplicação ilustrado para o método Rainflow .....	51

Figura 2.11 - Seção 4, Item 4.1, Ligações de extremidade com soldas de filete longitudinais, NBR 8800 (2008).....	55
Figura 2.12 - Seção 5, Item 5.2, Ligações soldadas transversais à direção das tensões, NBR 8800 (2008).....	56
Figura 2.13 - Classificação dos elementos, Pinho e Belley (2007).....	59
Figura 2.14 - Faixa de tensão por número de ciclos, AASHTO (2005) .....	60
Figura 2.15 - Faixa de tensão admissível para cargas repetidas em elementos que podem provocar colapso estrutural, Pinho e Belley (2007).....	60
Figura 2.16 - Média diária de tráfego e numero de ciclos, Pinho e Belley (2007) .....	61
Figura 2.17 - Valor da constante A, AASHTO (2005).....	62
Figura 2.18 - Valor do $(ADTT)_{SL}$ , número de veículos de fadiga por dia em faixa simples durante a vida útil, AASHTO (2005) .....	62
Figura 2.19 - Número de ciclos de faixa de tensão por passagem do veículo de fadiga, n, AASHTO (2005).....	63
Figura 2.20 - Amplitude constante limite para casos de fadiga, $(\Delta F)_{TH}$ , AASHTO (2005) .....	63
Figura 2.21 - Curvas de resistência à fadiga para intervalos de tensão normal, Afonso (2007) .....	67
Figura 2.22 - Classificação de peça não soldada, curva S-N, EUROCODE (2003) ..	68
Figura 2.23 - Classificação dos elementos, curvas S-N, BS 5400 (1980) .....	73

Figura 2.24 - Classificação dos elementos estruturais segundo BS 5400 (1980), Pravia (2003) .....	74
Figura 3.1 - Seção transversal típica da ponte .....	80
Figura 3.2 - Vista superior da ponte .....	80
Figura 3.3 - Vista tridimensional ponte - modelo em barras unifilares.....	81
Figura 3.4 - Vista tridimensional da ponte - modelo ilustrativo .....	81
Figura 3.5 - Tipos de perfis soldados .....	82
Figura 3.6 - Modelo de veículo tridimensional implementado por Santos (2007).....	86
Figura 3.7 - Veículo tipo “TB-12” da NBR 7188 (1984) .....	87
Figura 3.8 - Modelo de veículo com 4 graus de liberdade, Almeida (2006). .....	87
Figura 3.9 - Modos de vibração do veículo .....	89
Figura 3.10 - Descrição dos modelos de veículos.....	90
Figura 3.11 - Comboios de veículos adotados .....	91
Figura 3.12 - Função de irregularidade não-determinística.....	92
Figura 3.13 - Amostras de irregularidades, Chantre (2008) .....	94
Figura 4.1 - Modelo em elementos finitos, perspectiva completa.....	97
Figura 4.2 - Modelo em elementos finitos, perspectiva aproximada.....	97
Figura 4.3 - Modelo em elementos finitos, vista superior .....	98

Figura 4.4 - Modelo em elementos finitos, vista longitudinal .....	98
Figura 4.5 - Modelo em elementos finitos, vista frontal .....	98
Figura 4.6 - Elemento de casca, tipo SHELL63, Ansys (2005).....	99
Figura 4.7 - Elemento de viga, tipo BEAM44, Ansys (2005).....	99
Figura 4.8 - Elemento de viga, tipo BEAM4, Ansys (2005) .....	100
Figura 4.9 - Exemplo de interação entre o veículo, a irregularidade de pavimento e a estrutura da ponte .....	103
Figura 4.10 - Generalização da passagem dos comboios sobre a estrutura .....	104
Figura 4.11 - Modelo da passagem de cargas nos nós da ponte.....	105
Figura 4.12 - Metodologia para geração de tabelas de carga simulando a passagem do comboio de veículos.....	106
Figura 4.13 - Validação da estratégia para um veículo passando com velocidade constante de 80km/h sobre a ponte, efeito da mobilidade da carga, Leitão (2008).....	107
Figura 4.14 - Validação da estratégia para um comboio de dois veículos passando com velocidade constante de 80km/h sobre a ponte, efeito da mobilidade da carga, Leitão (2008) .....	108
Figura 5.1 - 1° Modo de vibração da ponte, $f_{01}=2,90\text{Hz}$ .....	111
Figura 5.2 - 2° Modo de vibração, $f_{02}=3,64\text{Hz}$ .....	112
Figura 5.3 - 3° Modo de vibração, $f_{03}=6,87\text{Hz}$ .....	113

Figura 5.4 - 4° Modo de vibração, $f_{04}=9,63\text{Hz}$ .....	114
Figura 5.5 - 5° Modo de vibração, $f_{05}=11,03\text{Hz}$ .....	115
Figura 5.6 - 6° Modo de vibração, $f_{06}=12,85\text{Hz}$ .....	116
Figura 5.7 - Comboio I, velocidade de 80km/h, deslocamentos translacionais verticais na seção central da ponte .....	117
Figura 5.8 - Comboio II, velocidade de 80km/h, deslocamentos translacionais verticais na seção central da ponte .....	118
Figura 5.9 - Comboio I, velocidade de 80km/h, deslocamentos translacionais verticais na seção central da ponte, qualidade da pista excelente..	119
Figura 5.10 - Comboio II, velocidade de 80km/h, deslocamentos translacionais verticais na seção central da ponte, qualidade da pista excelente.	120
Figura 5.11 - Seção transversal com indicação das vigas .....	122
Figura 5.12 - Vista superior com indicação dos locais para análise das tensões....	122
Figura 5.13 - Passagem dos comboios pela pista central .....	123
Figura 5.14 - Passagem dos comboios pela pista lateral .....	123
Figura 5.15 - Efeito da mobilidade de carga para o caso 1 .....	125
Figura 5.16 - Efeito das irregularidades da pista para o caso 1 .....	126
Figura 5.17 - Efeito da mobilidade de carga para o caso 2 .....	127
Figura 5.18 - Efeito das irregularidades da pista para o caso 2 .....	128

Figura 5.19 - Efeito da mobilidade de carga para o caso 3 .....	129
Figura 5.20 - Efeito das irregularidades da pista para o caso 3 .....	130
Figura 5.21 - Efeito da mobilidade de carga para o caso 4 .....	131
Figura 5.22 - Efeito das irregularidades da pista para o caso 4 .....	132
Figura 6.1 - Variação de tensão no tempo, Pravia (2003) .....	136
Figura 6.2 - Valores obtidos pela rotina do Matlab (2007) .....	136
Figura 6.3 - Obtenção das tensões na fase permanente .....	137

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Contagem dos ciclos, exemplo de aplicação do método Rainflow .....	51
Tabela 2.2 - Valores sugeridos, fator de segurança $Y_{Mf}$ , EUROCODE 3 (2003).....	66
Tabela 2.3 - Valores característicos da curva S-N, BS 5400 (1980) .....	76
Tabela 2.4 - Fatores de probabilidade de colapso para as curvas S-N, .....	76
Tabela 3.1 - Propriedades geométricas da ponte.....	79
Tabela 3.2 - Propriedades do aço ASTM A588 .....	79
Tabela 3.3 - Propriedades do concreto C25.....	79
Tabela 3.4 - Propriedades geométricas dos perfis metálicos soldados.....	82
Tabela 3.5 - Propriedades geométricas das cantoneiras metálicas .....	83
Tabela 3.6 - Propriedades geométricas dos enrijecedores .....	83
Tabela 3.7 - Parâmetros $\alpha$ e $\beta$ usados na análise de vibração forçada .....	85
Tabela 3.8 - Características dinâmicas do veículo, Almeida e Silva (2006) .....	88
Tabela 3.9 - Classificação das irregularidades do pavimento, coeficiente de amplitude, $\Phi\omega_0$ , Almeida e Silva (2006).....	93
Tabela 3.10 - Propriedades estatísticas da irregularidade da figura 3.13 .....	95

Tabela 4.1 - Dados do modelo de elementos finitos (MEF), por elementos geométricos .....	100
Tabela 4.2 - Dados do modelo de elementos finitos (MEF), por elementos finitos..	101
Tabela 4.3 - Dados do gerais sobre a malha de elementos finitos.....	101
Tabela 5.1 - Frequências naturais da ponte obtidas .....	109
Tabela 5.2 - Descrição dos pontos para análise das tensões .....	122
Tabela 5.3 - Tabela ilustrativa dos casos de carregamento em estudo .....	124
Tabela 6.1 - Contagem dos ciclos com a rotina do Matlab (2007) .....	136
Tabela 6.2 - Tipos de detalhes estruturais analisados .....	138
Tabela 6.3 - Classificação geral dos detalhes .....	139
Tabela 6.4 - Tabela ilustrativa do caso 1 .....	140
Tabela 6.5 - Verificação à fadiga da ponte rodoviária em estudo, efeito da mobilidade de carga, caso 1.....	140
Tabela 6.6 - Verificação à fadiga da ponte rodoviária em estudo, efeito das irregularidades da pista, caso 1 .....	141
Tabela 6.7 - Tabela ilustrativa do caso 2.....	141
Tabela 6.8 - Verificação à fadiga da ponte rodoviária em estudo, efeito da mobilidade de carga, caso 2.....	142
Tabela 6.9 - Verificação à fadiga da ponte rodoviária em estudo, efeito das irregularidades da pista, caso 2 .....	142



Tabela 6.10 - Tabela ilustrativa do caso 3.....	143
Tabela 6.11 - Verificação à fadiga da ponte rodoviária em estudo, efeito da mobilidade de carga, caso 3 .....	143
Tabela 6.12 - Verificação à fadiga da ponte rodoviária em estudo, efeito das irregularidades da pista, caso 3.....	144
Tabela 6.13 - Tabela ilustrativa do caso 4.....	144
Tabela 6.14 - Verificação à fadiga da ponte rodoviária em estudo, efeito da mobilidade de carga, caso 4 .....	145
Tabela 6.15 - Verificação à fadiga da ponte rodoviária em estudo, efeito das irregularidades da pista, caso 4.....	145
Tabela 6.16 - Efeito da mobilidade da carga e da irregularidade pista.....	147
Tabela 6.17 - Efeito da passagem pela faixa central e pela faixa lateral.....	149
Tabela 6.18 - Efeito da passagem dos comboios.....	152
Tabela A.1 - Det. do tipo 1 e 2, na viga 1, efeito da mobilidade da carga .....	166
Tabela A.2 - Det. do tipo 1 e 2, na viga 1, efeito da irregularidade de pavimento ...	167
Tabela A.3 - Det. do tipo 3 e 4, na viga 2, efeito da mobilidade da carga .....	168
Tabela A.4 - Det. do tipo 3 e 4, na viga 2, efeito da irregularidade de pavimento ...	169
Tabela A.5 - Det. do tipo 1 e 2, na viga 1, efeito da mobilidade da carga .....	170
Tabela A.6 - Det. do tipo 1 e 2, na viga 1, efeito da irregularidade de pavimento ...	171

Tabela A.7 - Det. do tipo 3 e 4, na viga 2, efeito da mobilidade da carga .....	172
Tabela A.8 - Det. do tipo 3 e 4, na viga 2, efeito da irregularidade de pavimento ...	173
Tabela A.9 - Det. do tipo 1 e 2, na viga 1, efeito da mobilidade da carga .....	174
Tabela A.10 - Det. do tipo 1 e 2, na viga 1, efeito da irregularidade de pavimento .	175
Tabela A.11 - Det. do tipo 3 e 4, na viga 2, efeito da mobilidade da carga .....	176
Tabela A.12 - Det. do tipo 3 e 4, na viga 2, efeito da irregularidade de pavimento .	177
Tabela A.13 - Det. do tipo 1 e 2, na viga 1, efeito da mobilidade da carga .....	178
Tabela A.14 - Det. do tipo 1 e 2, na viga 1, efeito da irregularidade de pavimento .	179
Tabela A.15 - Det. do tipo 3 e 4, na viga 2, efeito da mobilidade da carga .....	180
Tabela A.16 - Det. do tipo 3 e 4, na viga 2, efeito da irregularidade de pavimento .	181

## LISTA DE SÍMBOLOS

D	- Taxa de dano acumulado
k	- Nº de diferentes níveis de tensão numa seqüência específica de carregamento
n	- Nº de ciclos de tensão com determinada amplitude
N	- Nº de ciclos de tensão necessários para ocorrer falha
E	- Módulo de elasticidade
$C_f$	- Constante obtida na tabela K.1 da NBR 8800 (2008)
$\sigma_{TH}$	- Limite admissível da faixa de variação de tensão, tabela K.1 da NBR 8800 (2008)
$\sigma_{SR}$	- Faixa de variação de tensão admissível, NBR 8800 (2008)
$\gamma$	- Fator de carga, AASHTO (2005)
$(\Delta f)$	- Faixa de variação de tensão, AASHTO (2005)
$(\Delta F)_n$	- Resistência nominal a fadiga, AASHTO (2005)
$(ADTT)_{SL}$	- Número de veículos de fadiga por dia em faixa simples durante a vida útil, AASHTO (2005)
$(\Delta F)_{TH}$	- Amplitude constante limite para casos de fadiga (MPa), AASHTO (2005)
$(\Delta F)_n^c$	- Resistência nominal a fadiga para detalhes da categoria C (MPa), AASHTO (2005)
$\Delta\sigma_R$	- Resistência à fadiga em termos de faixa de tensões, EUROCODE (2003)
$\log(a)$	- Constante determinada de modo a definir a equação da reta, EUROCODE (2003)
$D_d$	- Dano acumulado, EUROCODE (2003)
$n_{Ei}$	- Número de ciclos associados com cada faixa de tensão, EUROCODE (2003)
$N_{Ri}$	- Número de ciclos tolerados para cada faixa de tensão, EUROCODE (2003)
$\gamma_{Ff}$	- Fator de segurança parcial de $\Delta\sigma_{E,2}$ ou $\Delta\tau_{E,2}$ , EUROCODE (2003)

$\gamma_{Mf}$	-	Fator de segurança parcial de $\Delta\sigma_C$ ou $\Delta\tau_C$ , EUROCODE (2003)
$\Delta\sigma_{E,2}$	-	
$\Delta\sigma_C$	-	Faixa de tensão normal referente a $2 \times 10^6$ de ciclos de tolerância, EUROCODE (2003)
$\Delta\sigma$	-	Faixa de tensão normal, EUROCODE (2003)
$\Delta\tau$	-	Faixa de tensão cisalhante, EUROCODE (2003)
$\Delta\tau_{E,2}$	-	Faixa de tensão cisalhante admissível equivalente a $2 \times 10^6$ de ciclos, EUROCODE (2003)
$\Delta\tau_C$	-	Faixa de tensão cisalhante referente a $2 \times 10^6$ de ciclos de tolerância, EUROCODE (2003)
$K_0$	-	Constante relativa à curva S-N média, BS 5400 (1980)
$m$	-	Parâmetro associado a inclinação das curvas, EUROCODE (2003), BS 5400 (1980)
$\Delta$	-	Inverso do desvio padrão de $\log(N)$ , BS 5400 (1980)
$d$	-	Número de desvios padrão em relação à média, BS 5400 (1980)
$f_y$	-	Tensão de escoamento
$f_u$	-	Tensão última
$f_{ck}$	-	Resistência característica a compressão do concreto
$M$	-	Matriz de massa
$K$	-	Matriz de rigidez
$\xi_i$	-	Taxa de amortecimento do modo $i$
$\omega_{0i}$	-	Frequência natural circular do modo $i$
$f_{0i}$	-	Frequência natural do modo $i$
$u$	-	deslocamento
$\dot{u}$	-	velocidade
$\ddot{u}$	-	aceleração
$V_b(x)$	-	função das irregularidades
$V_{bi}$	-	amplitude real da parte harmônica
$w$	-	ondulabilidade da pista
$\varphi$	-	ângulo de fase
$\phi$	-	modo de vibração
$\xi_P$	-	fração de amortecimento
$\Phi(\omega_0)$	-	coeficiente de amplitude

- $\Phi_{v_b v_b}(\omega_i)$  - densidade espectral das irregularidades
- $E[V_b^2]$  - Média quadrática da distribuição das irregularidades
- $S^2_{v_b}$  - Variância
- $\sqrt{\sigma_{v_b}^2}$  - Desvio padrão
- $V_{bMÁX}$  - Amplitude máxima

## LISTA DE ABREVIATURAS

UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
PUC - Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
NBR	Norma Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISC	American Institute of Steel Construction
AASHTO	Association of State Highway and Transportation Officials
BS	British Standards
AWS	American Welding Society

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	26
1.1. <b>Apresentação e relevância</b> .....	26
1.2. <b>Situação do assunto</b> .....	30
1.3. <b>Objetivos</b> .....	35
1.4. <b>Escopo do trabalho</b> .....	35
<b>2. PROJETO À FADIGA</b> .....	37
2.1. <b>Introdução</b> .....	37
2.2. <b>Fadiga estrutural</b> .....	38
2.2.1. <b>Conceituação</b> .....	38
2.2.2. <b>Mecanismos de formação de fissuras</b> .....	39
2.2.3. <b>Regimes de fadiga</b> .....	42
2.2.4. <b>Modelos de danos e seus diferentes enfoques</b> .....	42
2.2.5. <b>Conceito de vida útil e segurança contra falha</b> .....	45
2.2.6. <b>Análise à fadiga - Curvas S-N</b> .....	46
2.2.7. <b>Método para contagem de ciclos</b> .....	47
2.2.8. <b>Técnicas de avaliação de fadiga</b> .....	52
2.3. <b>Normas de projeto</b> .....	53
2.3.1. <b>NBR 8800</b> .....	54
2.3.1.1. <b>Critérios de dimensionamento</b> .....	55
2.3.1.2. <b>Classificação dos detalhes</b> .....	55
2.3.1.3. <b>Resistência à fadiga</b> .....	56
2.3.1.4. <b>Considerações sobre a norma</b> .....	57
2.3.2. <b>AASHTO - LRFD Bridge Design Specifications</b> .....	58
2.3.2.1. <b>Critérios de dimensionamento</b> .....	58
2.3.2.2. <b>Classificação dos detalhes</b> .....	59
2.3.2.3. <b>Ciclos de carregamento</b> .....	60
2.3.2.4. <b>Resistência à fadiga</b> .....	61
2.3.2.5. <b>Considerações sobre a norma</b> .....	64
2.3.3. <b>EUROCODE 3</b> .....	65

2.3.3.1. Critérios de dimensionamento .....	65
2.3.3.2. Classificação dos detalhes .....	66
2.3.3.3. Ciclos de carregamento.....	68
2.3.3.4. Resistência à fadiga .....	70
2.3.3.5. Considerações sobre a norma .....	72
2.3.4. BS 5400.....	72
2.3.4.1. Critérios de dimensionamento .....	73
2.3.4.2. Classificação dos detalhes .....	73
2.3.4.3. Ciclos de carregamento.....	75
2.3.4.4. Resistência à fadiga .....	75
2.3.4.5. Considerações sobre a norma .....	76
<b>3. MODELOS MATEMÁTICOS.....</b>	<b>78</b>
3.1. <b>Introdução</b> .....	78
3.2. <b>Modelo estrutural da ponte</b> .....	78
3.3. <b>Modelagem do amortecimento</b> .....	83
3.4. <b>Modelagem da carga móvel</b> .....	86
3.5. <b>Comboios de veículos</b> .....	90
3.6. <b>Modelagem da irregularidade do pavimento</b> .....	91
<b>4. MODELO NUMÉRICO-COMPUTACIONAL .....</b>	<b>96</b>
4.1. <b>Introdução</b> .....	96
4.2. <b>Modelo computacional</b> .....	96
4.3. <b>Desenvolvimento da estratégia de carregamento sobre a ponte</b> .....	101
<b>5. ANÁLISE DA RESPOSTA DINÂMICA DA ESTRUTURA.....</b>	<b>109</b>
5.1. <b>Introdução</b> .....	109
5.2. <b>Análise das frequências naturais e modos de vibração</b> .....	109
5.3. <b>Validação da estratégia de carregamento desenvolvida</b> .....	117
5.3.1. Efeito da mobilidade da carga .....	117
5.3.2. Efeito das irregularidades da pista .....	119
5.3.3. Considerações sobre os fatores de amplificação dinâmicos .....	121
5.4. <b>Resultados obtidos na análise dinâmica</b> .....	122
5.4.1. Comboio I com velocidade de 80km/h na faixa central da ponte - Caso 1 ....	124



5.4.2. Comboio I com velocidade de 80km/h na faixa lateral da ponte - Caso 2.....	126
5.4.3. Comboio II com velocidade de 80km/h na faixa central da ponte - Caso 3...	128
5.4.4. Comboio II com velocidade de 80km/h na faixa lateral da ponte - Caso 4....	130
5.4.5. Análise global dos históricos de tensões apresentados .....	132
<b>6. VERIFICAÇÃO À FADIGA .....</b>	<b>135</b>
6.1. <b>Introdução</b> .....	135
6.2. <b>Contagem de ciclos</b> .....	135
6.3. <b>Análise da fadiga</b> .....	137
6.3.1. Comboio I com velocidade de 80km/h na faixa central da ponte - Caso 1 ....	139
6.3.2. Comboio I com velocidade de 80km/h na faixa lateral da ponte - Caso 2.....	141
6.3.3. Comboio II com velocidade de 80km/h na faixa central da ponte - Caso 3...	143
6.3.4. Comboio II com velocidade de 80km/h na faixa lateral da ponte - Caso 4....	144
6.3.5. Análise comparativa dos resultados obtidos ao longo da análise .....	146
6.3.5.1. Efeito da mobilidade de carga versus efeito das irregularidades de pista..	146
6.3.5.2. Variação da posição do carregamento sobre a ponte .....	148
6.3.5.3. Influência das classes de detalhes estruturais .....	150
6.3.5.4. Comportamento estrutural das vigas de aço .....	151
6.3.5.5. Efeito do número de veículos trafegando sobre a obra de arte.....	151
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>154</b>
7.1. <b>Introdução</b> .....	154
7.2. <b>Conclusões alcançadas</b> .....	154
7.3. <b>Sugestões para trabalho futuros</b> .....	156
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>157</b>
<b>ANEXO A - Tabelas de estimativa de dano acumulados e vida útil.....</b>	<b>166</b>
<b>A.1. Comboio I na faixa central, velocidade de 80km/h - Caso 1 .....</b>	<b>166</b>
<b>A.2. Comboio I na faixa lateral, velocidade de 80km/h - Caso 2.....</b>	<b>170</b>
<b>A.3. Comboio II na faixa central, velocidade de 80km/h - Caso 3 .....</b>	<b>174</b>
<b>A.4. Comboio II na faixa lateral, velocidade de 80km/h - Caso 4.....</b>	<b>178</b>
<b>ANEXO B - Exemplo de APDL para análise modal.....</b>	<b>182</b>