

ARIETH CÊA DA SILVA

**APLICAÇÃO DE ALGORITMOS DE
APRENDIZAGEM PARA APOIAR O PROCESSO
DE GESTÃO DAS PONTES EM ANGOLA**

Orientador: Professor Doutor Elói João Faria Figueiredo

Co-orientador: Doutor Luís Miguel Pina de Oliveira Santos

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

Faculdade de Engenharia

Lisboa

2017

ARIETH CÊA DA SILVA

**APLICAÇÃO DE ALGORITMOS DE
APRENDIZAGEM PARA APOIAR O PROCESSO
DE GESTÃO DAS PONTES EM ANGOLA**

Dissertação defendida em provas públicas na Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias no dia 12 de abril de 2017, perante o júri, nomeado pelo Despacho de Nomeação nº: 102/2017, de 17 de março de 2017, com a seguinte composição:

- **Presidente:** Prof. Doutor António Manuel Gardete Mendes Cabaço (ULHT);
- **Arguente:** Doutor Manuel José de Andrade Loureiro Pipa (LNEC);
- **Orientador:** Prof. Doutor Elói João Faria Figueiredo (ULHT).

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

Faculdade de Engenharia

Lisboa

2017

Agradecimentos

A realização deste trabalho não foi possível sem um conjunto de pessoas, pelo que devo agradecer com grande satisfação a todos que contribuíram diretamente ou indiretamente.

Começo por agradecer ao meu orientador e professor Doutor Elói Figueiredo pela sugestão do tema, o grande incentivo, apoio e disponibilidade. Como também pelo conhecimento transmitido no âmbito desta dissertação e ao longo deste percurso académico.

Ao meu co-orientador Engenheiro Luís Oliveira Santos pela disponibilização de informações relativas a monitorização de uma ponte em Angola, auxílio e conhecimento transmitido.

Ao Adam Santos pela grande disponibilidade, apoio e pelo conhecimento transmitido em relação aos algoritmos.

Aos meus pais, que são as principais pessoas que devo agradecer por chegar a esta etapa, em especial, ao meu pai Engenheiro José Augusto Silva que sempre foi o grande conselheiro e exemplo durante a minha trajetória académica.

As diferentes entidades relacionadas com a construção de pontes em Angola, que contribuíram com a sua disponibilidade na recolha de informações, nomeadamente:

- Ao escritório Armando Rito Engenharia SA, em particular ao próprio Engenheiro Armando Rito e ao Engenheiro Pedro Cabral, pela grande simpatia e disponibilidade;
- Ao Instituto Nacional de Estradas em Angola, em particular ao Engenheiro José Alexandre pela disponibilidade e apoio;
- Ao Laboratório de Engenharia de Angola, particularmente ao Engenheiro Molaes d’Abril;
- Ao Instituto de Soldadura e Qualidade, particularmente a Engenheira Mafalda Pericão;

- A Telhabel Construções Angola, em particular ao Engenheiro Carlos Gonçalves;
- A Carmon, em particular aos Engenheiros Ronaldo e Nelson;
- A Imbondex, Engenheiro Raul Rios;
- A Conduril, em particular ao Engenheiro João Pacheco;
- A CCAD-Serviços de Engenharia, Lda em particular ao Engenheiro José Lello e em especial a minha amiga Carla Rejane que durante o seu estágio de mestrado recolheu as informações que eu precisava.

A Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias pelo apoio financeiro em relação a minha participação no primeiro congresso de Ensaios e Experimentação em Engenharia Civil.

A minha família toda, amigos, colegas e outras pessoas que apoiaram pelas palavras encorajadoras e pela disponibilização de algumas informações.

O meu muito obrigado!

Resumo

As pontes são importantes eixos de ligação das infraestruturas rodoviárias. Por isso é importante manter, permanentemente, a capacidade funcional e estrutural das mesmas, de forma a evitar perturbações no tráfego, bem como a ocorrência de colapsos com a consequente perda de bens materiais e humanos. Assim, nos últimos anos surgiram os sistemas de gestão de obras de arte que permitem aos donos das redes viárias um conhecimento atualizado do universo das suas infraestruturas e do estado global de conservação das mesmas através de inspeções visuais, essencialmente. Contudo, para tirar partido das novas tecnologias e aumentar o grau de confiança da análise da condição estrutural, tem surgido a possibilidade de monitorizar as pontes de forma contínua, permitindo uma avaliação estrutural permanente das mesmas e, potencialmente, um aviso atempado das condições de segurança. Assim, nos últimos anos tem surgido o conceito de Monitorização da Integridade Estrutural. Devido à enorme quantidade de dados recolhidos pelos sistemas, a aplicação de algoritmos de aprendizagem automática tem mostrado ser uma ferramenta importante para gerir os dados e detetar anomalias (ou danos) através da experiência acumulada. Note-se que os conceitos aqui apresentados estão direcionados para as pontes rodoviárias. Contudo, os mesmos podem ser facilmente estendidos para as pontes ferroviárias.

Desta forma, esta dissertação tem como objetivo: (i) aprofundar o conhecimento sobre as pontes existentes em Angola, bem como identificar a atual estratégia de gestão; (ii) rever a história da gestão de obras de arte nos EUA e em Portugal, como forma de comparação e extração de lições importantes para a estratégia futura de Angola; (iii) rever o conceito de Monitorização da Integridade Estrutural; e por fim (iv) mostrar a aplicabilidade dos algoritmos de aprendizagem automática para deteção de danos sobre dados de um sistema de monitorização estrutural instalado numa ponte em Angola.

Palavras-chave: pontes, sistemas de gestão de obras de arte, monitorização da integridade estrutural, algoritmos de aprendizagem automática.

Abstract

The bridges are important connecting axes of the road infrastructures. So it is important to permanently maintain their functional and structural capacity in order to avoid disruptions in traffic as well as the occurrence of collapses with the consequent loss of material and human goods. Thus, in the last years, the bridges management systems have emerged allowing the owners of the road networks a refreshed knowledge of the universe of their infrastructures and their overall state of conservation of them through visual inspections, essentially. Nonetheless, to take advantage of new technologies and increase the degree of confidence in the structural analysis of the condition, there has been a need to monitor the bridges continuously, allowing a structural evaluation of the bridges and an permanente warning of the safety conditions. Thus, in recent years the concept of Structural Health Monitoring. Due to the huge amount of damage collected by the systems, the application of machine learning algorithms has been shown to be an important tool for managing the data and detecting anomalies (or damages) through accumulated experience. It should be noted that the concepts presented here are directed to the road bridges. However, they can be easily extended to the railway bridges.

Thefore, this dissertation aims to: (i) deepen a knowledge of the existing bridges in Angola, as well as identify the current management strategy; (Ii) revise the history of the bridges management in the US and Portugal as a way of comparison and the extraction of important lessons, (iii) revise the concept of structural integrity monitoring and finally (iv) show the applicability of the machine learning algorithms for detecting damage to data from a structural monitoring system installed on a bridge in Angola.

Keywords: bridges, bridges management systems, structural health monitoring, machine learning algorithm.

Abreviaturas, siglas e símbolos

Abreviaturas

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
CFB	Caminho de Ferro de Benguela
EC	Estado de Conservação
EP	Estradas de Portugal
FAPLA	Forças Armadas Populares de Libertação de Angola
FHWA	Federal Highway Administration
ID	Índice de dano
IP	Infraestruturas de Portugal
INEA	Instituto Nacional de Estrada de Angola
ISQ	Instituto de Soldadura e Qualidade
LEA	Laboratório de Engenharia em Angola
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MSD	Mahalanobis Squared Distance
NBIS	National Bridge Inspection Standards
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
PCA	Principal Component Analysis
REFER,	Rede Ferroviária Nacional
EPE	
SHM	Structural Health Monitoring
SADF	South African Defence Force
SPR	Statistical Pattern Recognition
SWAPO	South West Africa People's Organization
SGOA	Sistema de Gestão de Obras de Arte
TRB	Transportation Research Board

Símbolos

X	Matriz de treino
Z	Matriz de teste
Σ	Matriz de covariância
T	Matriz de scores
U	Matriz de loadings
Λ	Matriz diagonal
E	Matriz de resíduos
μ	Vetor de média
ε	Extensão
f	Frequência
n	Número de modo de vibração
g	Aceleração de gravidade
σ	Tensão da corda
L	Comprimento da corda
T	Temperatura
K	Fator corretivo de temperatura

Índice Geral

Introdução	1
Capítulo 1	6
Gestão de pontes em Angola	6
1.1 Enquadramento geral	6
1.2 Breve história das pontes num contexto político-social	7
1.2.1 Século XIX.....	7
1.2.2 Século XX: era da construção colonizadora e destruição provocada pela guerra civil.....	9
1.2.3 Século XXI: era da reabilitação e construção nova.....	18
1.3 Estratégia atual de gestão das pontes	32
1.3.1 Implementação do Pontis - Metodologia Implementada.....	32
1.4 Levantamento dos sistemas estruturais e fundações de pontes.....	38
1.5 Considerações finais	44
Capítulo 2	46
Gestão de pontes nos EUA e em Portugal	46
2.1 Considerações gerais.....	46
2.2 História da gestão de pontes nos Estados Unidos da América	47
2.2.1 Estado de conservação das pontes nos EUA	54
2.3 História da gestão de pontes em Portugal	56
2.4 Implementação do SGOA pelos principais donos de obras de arte	60
2.4.1 Implementação do SGOA na empresa Infraestruturas de Portugal (vertente rodoviária)	60
2.4.2 Implementação do SGOA pela empresa Brisa	65
2.5 Considerações finais	68
Capítulo 3	69
Monitorização da integridade estrutural	69
3.1 Considerações gerais.....	69
3.2 Perspetiva histórica da Monitorização da Integridade Estrutural (SHM).....	70

3.3	Analogia ao ser humano	71
3.4	Paradigma estatístico de reconhecimento de padrões para a SHM	74
3.4.1	Algoritmos de aprendizagem automática	75
3.5	Componentes e tipos de sistemas de SHM	80
3.6	Exemplos de sistemas de monitorização contínua em Portugal	82
3.7	Exemplos de sistemas de monitorização contínua em Angola	83
3.8	Considerações finais	84
Capítulo 4		86
Monitorização da integridade estrutural de uma ponte em Angola		86
4.1	Considerações gerais.....	86
4.2	Descrição da obra.....	86
4.3	Descrição do sistema de monitorização estrutural.....	88
4.4	Ensaio de carga.....	89
4.5	Resultados da medição dos extensómetros	91
4.6	Deteção de danos ou anomalias através de algoritmos inteligentes	95
4.7	Considerações finais	101
Conclusões		103
Referências		107
ANEXO		115

Índice de Figuras

Figura 1 - Seção longitudinal da passagem superior Z-24 na Suíça. (Santos, et al, 2016).....	2
Figura 2 - Mapa de Angola (Africa-turismo, 2016)	6
Figura 3 - Ponte Pinheiro Chagas (Hemeroteca Digittal, 1887).....	8
Figura 4 - Mapa do CFB (Wikipédia, 2016)	9
Figura 5 - Ponte “Luís Filipe” sobre o rio Catumbela depois de ser reconvertida para o tráfego rodoviário (Landerset & Perloiro, 1968).....	10
Figura 6 - Segunda ponte sobre o rio Catumbela (Landerset & Perloiro, 1964).....	11
Figura 7 - Pontes sobre o rio Catumbela (Landerset & Perloiro, 1964).....	11
Figura 8 - Exemplo de ponte de madeira sobre o rio Cubango (Arquivo Histórico Ultramarino)	12
Figura 9 - Primeira ponte de betão armado pré-esforçado sobre o rio N’Gunza em Angola (Landerset & Perloiro, 1964)	13
Figura 10 - Ponte Dr. Oliveira Salazar, sobre o rio Kwanza (Landerset & Perloiro, 1964).....	15
Figura 11 - Ponte sobre o rio Kwanza, em Cangandala destruída (Armando Rito Engenharia, S.A).....	15
Figura 12 - Ponte sobre o rio Cunene, em Xangongo (Landerset & Perloiro, 1968).	16
Figura 13 - Ponte sobre o rio Cuito em madeira (Ribeiro, 2016).....	18
Figura 14 - Parte do processo de reabilitação da ponte sobre o rio Kwanza na Cangandala (Conduril, s.d.)	20
Figura 15 - Ponte sobre o rio Kwanza, em Cangandala reabilitada entre 2008 e 2010 (Armando Rito Engenharia, S.A)	20
Figura 16 - Ponte sobre o rio Queve (Armando Rito Engenharia, S.A) (Conduril, s.d.)	21
Figura 17 - Tramo destruído da ponte sobre o rio Caninda, com estrutura metálica provisória. (Conduril, s.d.).....	21
Figura 18 - Ponte sobre o rio Caninda reabilitada (Conduril, s.d.)	22
Figura 19 - Ponte sobre o rio Caimbambo com ponte metálica provisória (Conduril, s.d.)	22
Figura 20 - Ponte sobre o rio Caimbambo durante a fase de reabilitação (Conduril, s.d.)	23
Figura 21 - Nova ponte sobre o rio Cavaco, em Benguela (Conduril, s.d.)	23
Figura 22 - Antiga ponte sobre o rio Cavaco, antes e depois do colapso (Landerset & Perloiro, 1964) (Fonte: Engenheiro Carlos Matias Ramos)	24
Figura 23 - Ponte 4 de abril sobre o rio Catumbela (Rito, et al, 2011)	25

Figura 24 - Vista inferior do tabuleiro da ponte sobre rio Cunene em Xangongo (Miranda, 2011)	26
Figura 25 - Ponte sobre o rio Cunene em Xangongo (CRBC)	26
Figura 26 - Nova ponte sobre o rio Cuito (Ribeiro, 2016)	27
Figura 27 - Inauguração da ponte 17 de Setembro, sobre o rio Kwanza na Cabala (Rosa, 2011).....	28
Figura 28 - Desenho da secção transversal do tabuleiro da ponte sobre o rio Kwanza (Libânio, 2012)	28
Figura 29 - Ponte 17 de Setembro sobre o rio Kwanza (Armando Rito Engenharia, S.A) ´	29
Figura 30 - Ponte sobre o rio Giraul (Telhabel, Construções).....	30
Figura 31 - Colapso da ponte sobre o rio Giraul (ISQ)	31
Figura 32 - Mapa com os três primeiros troços inspecionados (Alves & Sebastião, 2006).....	34
Figura 33-Lista das anomalias principais das obras de arte em Angola (Pericão, et al, 2013)	35
Figura 34 - Vegetação sobre o pilar da ponte sobre o rio Lucala (Pericão, et al, 2013)	36
Figura 35 - Infraescavação nas fundações da ponte sobre o rio Caluála (Pericão, et al, 2013)	36
Figura 36 - Caracterização dos comprimentos totais das pontes rodoviárias angolanas	39
Figura 37- Caracterização das soluções estruturais.....	40
Figura 38- Ponte da Barra do Kwanza sobre o rio Kwanza (Armando Rito Engenharia).....	40
Figura 39 - Ponte sobre o rio Longa	41
Figura 40 - Ponte da Lagoa do Panguila.....	41
Figura 41 - Tipificação das secções transversais dos tabuleiros	42
Figura 42 - Ponte sobre o rio Catofe, solução do tabuleiro com vigas pré-fabricadas (Armando Rito Engenharia, S.A)	42
Figura 43 - Ponte sobre o rio Cubal de Hanha, solução de tabuleiro com duas vigas longitudinais (Armando Rito Engenharia, S.A)	43
Figura 44 - Ponte sobre o rio Cuilo na fase de construção, solução de tabuleiro com vigas metálicas (COBA)	43
Figura 45 - Ponte sobre o rio Caimbambo durante a fase de reabilitação, solução de tabuleiro de laje de betão armado maciça (Armando Rito Engenharia, S.A).....	43
Figura 46 - Caracterização dos tipos de fundação das pontes rodoviárias	44

Figura 47 - Ponte Hintze Ribeiro sobre o rio Douro, antes e depois do colapso (Branco, 2013)	46
Figura 48 - Ponte I-35 W sobre o rio Mississippi, antes e depois do colapso (National Transportation Safety Board, 2007)	47
Figura 49 - (a) Silver Bridge sobre rio Ohio. (b) Detalhe típico de uma corrente de “eyebars” (Wikipédia, 2017) (Salasky, 2013).....	48
Figura 50 - Colapso da Silver Bridge em 1967 (FHWA, 2012) (Salasky, 2013).....	48
Figura 51 - Colapso da ponte sobre rio Mianus (LPESA).....	49
Figura 52 - Colapso da ponte sobre o ribeiro Schorarie (LPESA)	49
Figura 53 - Colapso da ponte sobre Hatchie (LPESA).....	50
Figura 54 - Resumo da Classificação da Eficiência, SR (Nebraska Department of Roads, 2009).....	52
Figura 55 - (a) Ponte I-35 W Colapsada. (b) Exemplo de um nó da ponte I-35 W constituído por placas gusset. (National Transportation Safety Board, 2007).....	53
Figura 56 - Nova ponte sobre o rio Mississippi, denominada de Ponte St. Anthony Falls (Branco, 2013)	53
Figura 57 - Número de queda de pontes (Campos, Santos, Figueiredo, & Costa, 2016).....	55
Figura 58 - Condição das pontes nos EUA por grupos de idade: 2013 (DoT, 2016).....	55
Figura 59 - Ponte Hintze Ribeiro no dia do colapso (Branco, 2013)	57
Figura 60 - Modelo Funcional do SGOA da EP (Freire & Amado, 2014)	62
Figura 61 - Distribuição do estado de conservação do património de obras de arte da EP (Amado J. , 2016).....	65
Figura 62 - Analogia de uma estrutura ao ser humano (Félix, 2010).....	72
Figura 63 - Analogia de um SHM com o sistema nervoso humano (Figueiredo, et al, 2013)	72
Figura 64 - Paradigma SPR para SHM (Figueiredo, 2013).....	74
Figura 65 - Componentes de um sistema SHM (Félix, 2010).....	80
Figura 66 - Categorias da monitorização da integridade estrutural (Figueiras, 2008)	81
Figura 67 - Ponte 4 de Abril, vista da margem esquerda (Armando Rito Engenharia, S.A).....	87
Figura 68 - Alçado da Ponte 4 de Abril (Santos, et al, 2010).....	87
Figura 69 - Seção transversal do tabuleiro da ponte (Rito, et al, 2011)	88
Figura 70 - Plano geral de monitorização da ponte (Santos, et al, 2010).....	88
Figura 71 - Seção instrumentada: disposição dos extensómetros de corda vibrante (Santos, et al, 2010)	89
Figura 72- Ensaio da carga concentrada (Santos, et al, 2010).....	90

Figura 73 - Comboio de carga (Santos, et al, 2010).....	90
Figura 74 - Seção S1 com referência e posicionamento dos extensómetros de corda vibrante	91
Figura 75 - Exemplo de um extensómetro de corda vibrante usado na monitorização da Ponte 4 de Abril (Santos L. , 2015)	93
Figura 76 - Gráfico dos resultados das extensões superiores. (Santos L. , 2015)	94
Figura 77 - Gráfico dos resultados dos extensómetros inferiores (Santos L. , 2015).....	94
Figura 78 - Distribuição dos pesos de cada componente principal.	96
Figura 79 - Gráfico da Matriz de Teste	97
Figura 80 - Gráfico da Matriz de Teste reconstruída com uma componente	98
Figura 81 - Detecção de anomalias através dos algoritmos PCA e MSD	98
Figura 82 - Exemplos de detecção de anomalias através do algoritmo PCA.....	99
Figura 83- Exemplos de detecção de anomalias do algoritmo MSD	99
Figura 84 - Detecção de anomalias através do algoritmo PCA apenas com a matriz de teste reconstruída	101

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Classificação do estado de conservação das obras de arte (ISQ, 2012)	38
Tabela 2 - Periodicidade das inspeções principais associadas aos níveis de vigilância. (adaptado de (Amado J. , 2016))	64
Tabela 3 - Avaliação dos componentes (Barros, 2013).....	67
Tabela 4 - Avaliação do componente- obra de arte (Barros, 2013).....	67
Tabela 5 - Correspondência ideológica entre o sistema nervoso do ser humano e um sistema de monitorização estrutural (Figueiredo, 2006).....	73
Tabela 6 - Sistemas de monitorização a longo prazo em Portugal. (Adaptado de Figueiredo, et al, 2013).....	82
Tabela 7 - Sistema de observação instalado na ponte 17 de setembro (Fonseca, 2014).....	83
Tabela 8 - Sistema de monitorização instalado na Ponte 4 de Abril (adaptado de (Santos L. , 2015))	89
Tabela 9 - Matriz de covariância entre sensores.....	97
Tabela 10 - Desempenho dos algoritmos baseados nos erros tipo I.....	100

Introdução

MOTIVAÇÃO

As pontes são elementos fundamentais das redes de infraestruturas rodoviárias e ferroviárias, pelo que a preservação da sua capacidade funcional assume uma enorme importância social e económica. Nas últimas décadas surgiram os sistemas de gestão de obras de arte. Estes sistemas foram impulsionados por colapsos sucessivos de pontes e permitem, atualmente, aos donos de obras das redes viárias ter um conhecimento do universo das suas infraestruturas, bem como do estado global de conservação das mesmas. Assim, os donos de obra podem, potencialmente, adotar medidas convenientes de manutenção e de conservação, de forma a evitar situações de colapsos e aumentar ganhos financeiros através da resolução precoce das anomalias identificadas. Contudo, este conhecimento é atualmente adquirido essencialmente através de inspeções visuais realizadas por inspetores.

Para tirar partido das novas tecnologias e aumentar o grau de confiança da análise da condição estrutural, tem surgido a possibilidade de monitorizar as pontes de forma contínua, permitindo potencialmente uma avaliação estrutural das mesmas e um acompanhamento contínuo das condições de segurança. Assim, surgiu o conceito de Monitorização da Integridade Estrutural (*Structural Health Monitoring* - SHM, na literatura inglesa) onde a aplicação de algoritmos de aprendizagem automática (também conhecidos por algoritmos inteligentes ou algoritmos de aprendizagem de máquina) têm mostrado ser uma ferramenta importante para gerir os dados e detetar anomalias (ou danos) através da experiência. Estes algoritmos são, potencialmente, o elemento fundamental para possibilitar a implementação de uma nova estratégia de gestão das pontes, com capacidade para analisar dados provenientes de várias fontes, tais como sistemas de monitorização, modelos numéricos de elementos finitos e inspeções visuais. Assim, já têm sido desenvolvidos vários estudos neste sentido, como por exemplo nas referências (Santos, et al, 2016), (Campos, et al, 2016), (Silva M. , et al., 2017) (Silva M. , et al., 2016) e (Santos, et al., 2017), cujo alvo de estudo tem sido os dados da monitorização, de cerca de um ano, de uma passagem superior (Z-24) na Suíça. Esta obra tinha um comprimento total de 58 m (Figura 1), e antes da sua demolição completa (para permitir a construção de novas vias férreas) foi amplamente instrumentada e testada com o objetivo de

caraterizar a fiabilidade da análise dinâmica para deteção de danos estruturais (Campos, et al, 2016). Para tal, a obra foi monitorizada entre 11 de novembro de 1997 até 10 de setembro de 1998. No último mês foram introduzidos artificialmente vários cenários de danos, para quantificar a variabilidade operacional e ambiental e para detetar a existência de danos.

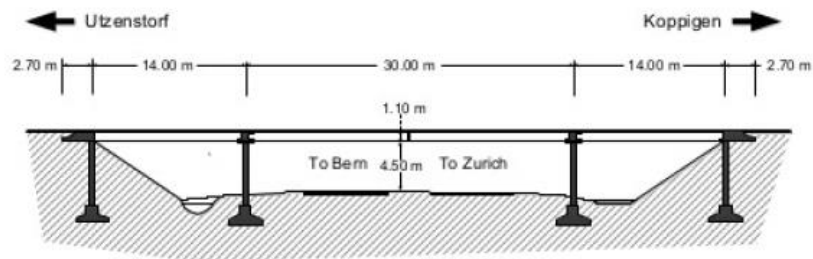


Figura 1 - Seção longitudinal da passagem superior Z-24 na Suíça (Santos, et al, 2016)

Assim, para dar continuidade a esta linha de investigação, a presente dissertação pretende aplicar o conceito de algoritmos de aprendizagem automática nos dados recolhidos através de um sistema monitorização de uma ponte em Angola. Neste país, a gestão de obras de arte tem sido feita com a implementação de sistema de gestão de obras de arte, nomeadamente o sistema americano - Pontis.

Adicionalmente, esta dissertação pretende enaltecer o papel importante das pontes na guerra civil angolana e sua importância política económica e social no crescimento de Angola. Basicamente, muitas pontes foram destruídas durante a guerra civil que ocorreu no país e por isso muitas têm sido reabilitadas e/ou substituídas de forma temporária e/ou definitiva. Após o conflito armado, o país emergiu e o Governo dirigiu a sua atenção na reconstrução de novas pontes. Durante o processo de reconstrução foram construídas grandes obras, destacando-se por exemplo a Ponte 4 de Abril na Catumbela, a Ponte 17 de Setembro na Cabala e a ponte sobre o rio Cunene em Xangongo. Apesar do crescimento que tem existido nesta área, existem ainda algumas pontes que se encontram em estado de conservação desfavoráveis à segurança dos utentes, devido ao envelhecimento das estruturas, ao excesso de sobrecarga rodoviária e à falta de manutenção.

OBJETIVOS e METODOLOGIA

Esta dissertação tem como objetivos principais aumentar o conhecimento das pontes existentes em Angola e definir uma estratégia de deteção de anomalias das pontes para este país através da aplicação de sistemas de monitorização em conjunto com algoritmos de aprendizagem automática. Desta forma, como resposta a estes objetivos foram definidas as seguintes atividades:

1. Levantamento de informação das pontes existentes em Angola, tendo em conta os seguintes aspetos:
 - História das pontes em contexto político-social, enfatizando a destruição de algumas durante o conflito armado ocorrido no país, bem como processo de reconstrução após o conflito;
 - Estratégia atual da gestão das pontes, a partir da implementação de um sistema de gestão de obras de arte;
 - Levantamento dos sistemas estruturais e tipo de fundação normalmente utilizados nas pontes em Angola, realizado pela autora.
2. Recolha bibliográfica sumária sobre a estratégia de gestão de pontes nos Estados Unidos da América e em Portugal.
3. Recolha bibliográfica sobre o conceito de Monitorização da Integridade Estrutural (SHM) e sobre a aplicação de algoritmos de aprendizagem automática.
4. Tratamento dos dados através do sistema de monitorização estrutural instalado na Ponte 4 de Abril e posterior aplicação dos algoritmos para deteção de danos ou anomalias.

É importante realçar que ao longo desta dissertação, apesar de a mesma ser direcionada para pontes, o conceito de obra de arte é muitas vezes utilizado abrangendo não só pontes como viadutos, passagens hidráulicas, passagens agrícolas, túneis, entre outros, em resultado de os

atuais sistemas de gestão de obras de arte estarem direcionados para a generalidade das estruturas integrantes nas vias de comunicação.

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para além da presente introdução e da conclusão, esta dissertação é constituída por quatro capítulos.

O primeiro capítulo desta dissertação pretende referenciar algumas das pontes existentes em Angola, de forma condensar num documento um conhecimento geral das pontes que se têm projetado e construído no país. Assim, pretende-se fazer primeiramente um enquadramento geográfico de Angola, bem como uma breve história das pontes no país num contexto político-social. De seguida, é descrita a forma como sido feita a gestão das demasiadas obras de artes em Angola a partir da implementação de um sistema de gestão de obras de arte. É realçado o estado de conservação das obras de arte e sintetizado um estudo de pesquisa feito pela autora que permitiu fazer um levantamento de sistemas estruturais e fundações das pontes angolanas.

O segundo capítulo aborda alguns aspetos relacionados com a gestão de obras de arte nos Estados Unidos da América, bem como em Portugal, de forma a extrair lições e comparar a realidade angolana. É assim mencionado a história de gestão de obras de arte em cada país, cujos principais motivos estão relacionados com colapsos de pontes, nomeadamente os colapsos da ponte Silver nos EUA e da ponte Hintze Ribeiro em Portugal. É também resumida a estratégia atual e estados de conservação das pontes naqueles países.

No terceiro capítulo pretende-se demonstrar o conceito da Monitorização da Integridade Estrutural (SHM), iniciando-se com uma perspetiva histórica deste conceito, seguida da analogia ao ser humano bem como a implementação de sistemas de SHM baseada no paradigma estatístico de reconhecimento de padrões, através de dois algoritmos de aprendizagem automática, designadamente a distância quadrada de Mahalanobis (MSD) e a Análise de Componentes Principais (PCA) e, por fim, faz-se menção dos componentes e tipos de sistema SHM.

No quarto capítulo é abordado, de uma forma sucinta, a monitorização da Ponte 4 de Abril sobre o rio Catumbela em Benguela, destacando-se a monitorização feita com

extensómetros de corda vibrante. Pretende-se aplicar duas abordagens de algoritmos de aprendizagem, nomeadamente a MSD e a PCA, sobre as séries temporais dos extensómetros, comparando os respetivos desempenhos associados através dos erros tipo I para deteção de danos ou anomalias.

Capítulo 1

Gestão de pontes em Angola

1.1 Enquadramento geral

Angola é um país situado na costa ocidental de África, limitado a norte e leste pela República Democrática do Congo, a sul pela Namíbia, a leste pela Zâmbia e banhada a oeste pelo Oceano Atlântico. Angola inclui também o enclave de Cabinda, que faz fronteira com a República Popular do Congo. A área total do país é de 1.246.700 km², distribuída administrativamente por 18 províncias. Nos últimos anos, o país tem apresentado um grande crescimento em vários níveis, quer a nível socioeconómico quer a nível de infraestruturas rodoviárias. De acordo com (INEA, 2015) o país dispõe de uma rede rodoviária de cerca de 76.000 km de extensão em diferentes estágios de desenvolvimento, ligando cidades, povoações, centros de produção agrícola e industrial, dos quais 26.600 km fazem parte da Rede Fundamental de Angola.

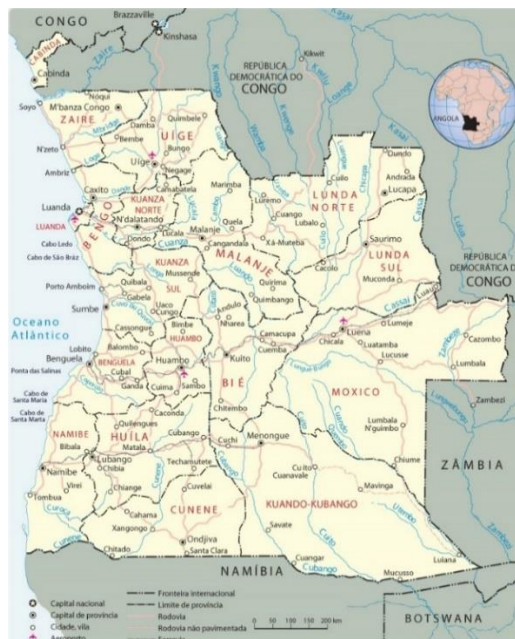


Figura 2 - Mapa de Angola (Africa-turismo, 2016)

1.2 Breve história das pontes num contexto político-social

Descrever a história das todas as pontes de Angola é um trabalho difícil devido à falta de informação oficial sobre as mesmas.

Neste subcapítulo pretende-se fazer um pequeno enquadramento das pontes rodoviárias em Angola, tendo em conta alguns aspetos históricos.

As pontes abaixo mencionadas foram/são obras de arte que se destacaram devido às diversas soluções apresentadas, nas respetivas épocas.

1.2.1 Século XIX

Pontes do Lucala

Em 1883 devido à necessidade de os carregadores atravessarem o rio Lucala e seus afluentes, foi deliberado pelo governador geral de Angola, Ferreira do Amaral, a construção de uma ponte. Como não havia recursos financeiros para tal construção, o mesmo pediu ao ministro Pinheiro Chagas que rapidamente autorizou uma operação financeira que permitisse a obtenção das somas indispensáveis. Ferreira do Amaral decidiu dar o nome de ponte de Pinheiro Chagas em homenagem ao ministro da Marinha e Ultramar que aceitou a iniciativa.

Coube ao engenheiro Claudino Faro, a construção da obra de arte, que na altura foi considerada como uma das obras mais monumentais da África Portuguesa. Esta obra dividia-se em três pontes notáveis, a primeira sobre o leito rio Lucala, a segunda sobre o braço direito do mesmo rio, e a terceira sobre o seu afluente Caxissa. Estas pontes eram separadas por avenidas: a primeira avenida de 43,50 m de comprimento separava a ponte Pinheiro Chagas da ponte sobre o braço direito do Lucala e a segunda avenida de 142,60 m separava a ponte sobre o Caxissa. Toda esta obra que compreendia as avenidas tinha cerca de 400 m de extensão (Hemeroteca Digittal, 1887; Claudino, 1884).

Todas as pontes apresentavam a mesma solução estrutural: os tabuleiros em madeira e as vigas principais armadas em *treillis* pelo sistema americano “Town”, assentes em pilares e encontros de alvenaria.

A ponte Pinheiro Chagas (Figura 3) tinha uma extensão total de 111,50 m, composta em cinco tramos com os seguintes vãos: 21,50 m, 21,80 m, 33,30 m, 18,00 m e 17,00 m.

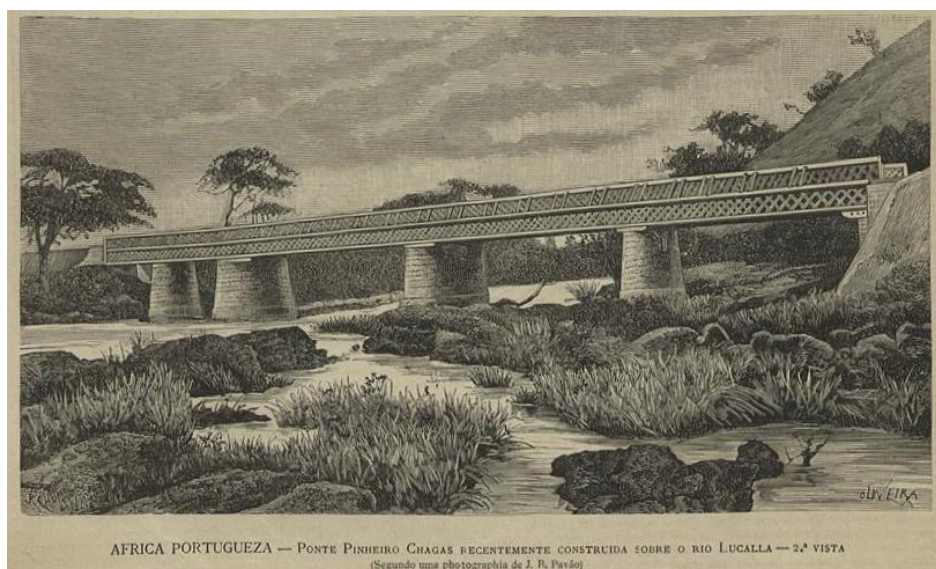


Figura 3 - Ponte Pinheiro Chagas (Hemeroteca Digittal, 1887)

A segunda ponte era dividida por três tramos de 19,60+24,00+19,60 m e a terceira ponte era constituída por um único tramo de 29,60 m (Claudino, 1884).

Neste mesmo século ocorreu a Revolução Industrial em Inglaterra, trazendo a grande expansão dos caminhos de ferro em diversos países. Em Portugal os primeiros quilómetros de caminho de ferro chegam em 1853. Em Angola, os primeiros quilómetros de caminho de ferro só chegam no final do século XIX com a Companhia do Caminho de Ferro de Luanda. Contudo, Angola apenas é colocada no mapa das linhas férreas mundiais a partir da fundação da Companhia de Caminho de Ferro de Benguela (Segadães, 2010).

Em 1897 foi incumbido ao engenheiro escocês Robert Williams de fazer um estudo sobre a riqueza dos solos nos territórios localizados entre rio Zambeze e o rio Congo. Desse estudo resultou uma descoberta dos maiores jazigos de cobre de África, localizados na República Democrática do Congo, mais precisamente na região do Katanga. Esta descoberta era de grande interesse e utilidade às indústrias europeias e, por isso, era indispensável a criação de uma linha férrea que ligasse a África Central ao mar. Observou-se então que era imprescindível fazer a ligação pela costa ocidental, pois seria uma ligação mais curta e menos

dispendiosa. Assim, optaram pela ligação da costa Atlântica a partir da província de Benguela em Angola em alternativa às costas moçambicana e do Cabo, uma vez que o Porto do Lobito oferecia uma restinga e características de abrigo e profundidade que permitiam uma solução portuária relativamente fácil de construir (Silva E. , 2008).

1.2.2 Século XX: era da construção colonizadora e destruição provocada pela guerra civil

Em 28 de novembro de 1902, o governo português concedeu a Robert Williams um contrato de 99 anos, para construir uma via férrea que ligasse o Porto do Lobito à África Central. Foi, assim, fundada a Companhia de Caminho de Ferro de Benguela (CFB) e criado o Porto do Lobito (Silva E. , 2008).

A construção do CFB tinha um carácter estratégico, político, económico e social, tanto para Portugal como para outras potências coloniais como a Grã-Bretanha, a Bélgica e a Alemanha. Para Portugal, o CFB funcionou como linha de penetração para ocupação efetiva e a colonização do Centro e Sul de Angola.

Para a Grã-Bretanha, o CFB tinha principalmente um carácter militar, pois era um entroncamento do caminho-de-ferro do Cabo ao Cairo, era uma fonte de divisas para economia britânica (Esteves, 2000).

O CFB é aqui realçado devido a sua localização estratégica na província de Benguela, que ofereceu a Angola a oportunidade de ser servida pela linha férrea de Oeste a Leste, tal como é ilustrado na figura abaixo (Figura 4):



Figura 4 - Mapa do CFB (Wikipédia, 2016)

Logo no início da construção da linha férrea, em junho de 1904, chegaram os primeiros materiais dos quais parte deles foram utilizados para montar a ponte metálica sobre o rio Catumbela. Esta ponte, com 40,00 m de vão e com o nome do príncipe “Luís Filipe”, foi inaugurada a 21 de março de 1905, tornando-se na primeira ponte com alguma importância em Angola que permitia o trânsito ferroviário e rodoviário (Silva E. , 2008). Esta ponte (tal como está ilustrado na Figura 5) é constituída por duas vigas de rótula de grande altura, contraventadas superior e inferiormente, formando um caixão. Foi posteriormente metalizada a zinco e pintada com tinta de alumínio.



Figura 5 - Ponte “Luís Filipe” sobre o rio Catumbela depois de ser reconvertida para o tráfego rodoviário (Landerset & Perloiro, 1968)

Devido ao aumento de tráfego do CFB (a ponte não estava preparada para suportar as cargas dos comboios modernos), foi construída mais tarde uma nova ponte de caminho de ferro, a jusante da primeira e por isso a ponte “Luís Filipe” ficou apenas destinada ao trânsito rodoviário.

A nova ponte metálica (Figura 6) tem um comprimento de 85,70 m e permitiu o escoamento de tráfego ferroviário. Também é constituída por vigas de rótula de grande altura, contraventadas superior e inferiormente, formando caixão (Landerset & Perloiro, 1964).

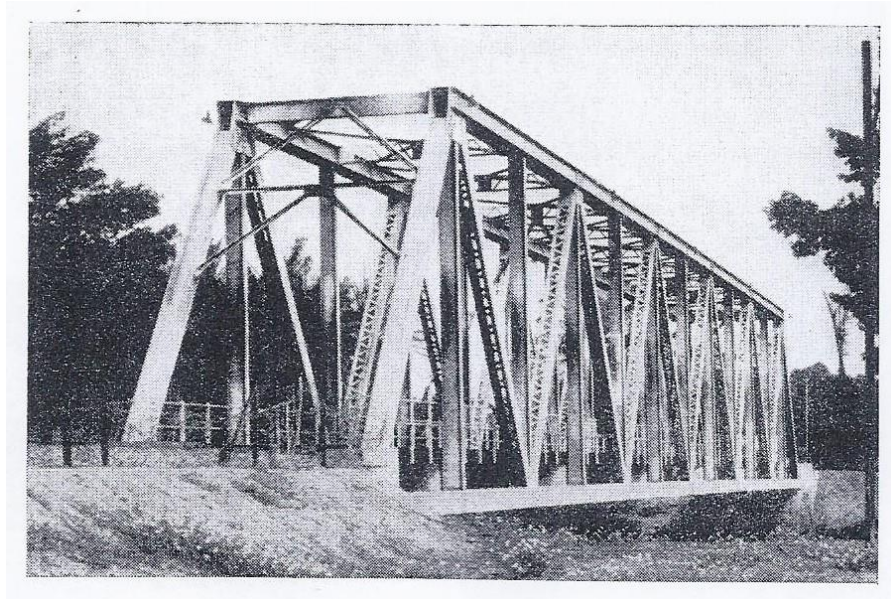


Figura 6 - Segunda ponte sobre o rio Catumbela (Landerset & Perloiro, 1964)

A Figura 7 mostra a localização das duas referidas pontes sobre o rio Catumbela.



Figura 7 - Pontes sobre o rio Catumbela (Landerset & Perloiro, 1964)

As pontes rodoviárias surgiram mais tarde. Em 1920 começou-se a desenvolver uma rede viária rudimentar. Até meados do século XX, os grandes rios eram atravessados com jangadas e quando não se fazia o atravessamento a vau, eram improvisadas pontes de madeira

(exemplificado na Figura 8) que exigiam manutenção e reparações permanente (Segadães, 2010).



Figura 8 - Exemplo de ponte de madeira sobre o rio Cubango (Arquivo Histórico Ultramarino)

Na segunda metade do século XX as pontes rodoviárias ganharam expressão com carácter definitivo em betão armado e pré-esforçado ocorrendo, então, a construção dos principais eixos viários de Angola (Segadães, 2010).

Em Portugal, a primeira ponte em betão armado pré-esforçado foi construída em 1954 denominada de Vala Nova em Benavente e que apresenta três vãos simplesmente apoiados de 33,8 m. A ponte foi projetada por Francisco de Mello e o pré-esforço utilizado foi do sistema de Freyssinet (Appleton, 2013).

Um ano mais tarde, em 1955, foi construída em Angola, a primeira ponte pré-esforçada (Figura 9) sobre o rio N'Gunza. Era uma ponte constituída por um único vão de 32,00 m, formado por duas vigas laterais pré-esforçadas, unidas superiormente pela laje de betão armado. A ponte estava assente sobre os dois pilares de betão simples, fundados em estacaria moldada em terreno e localizava-se no Sumbe (antigamente chamado de Novo Redondo), na província do Kwanza-Sul (Landerset & Perloiro, 1964).

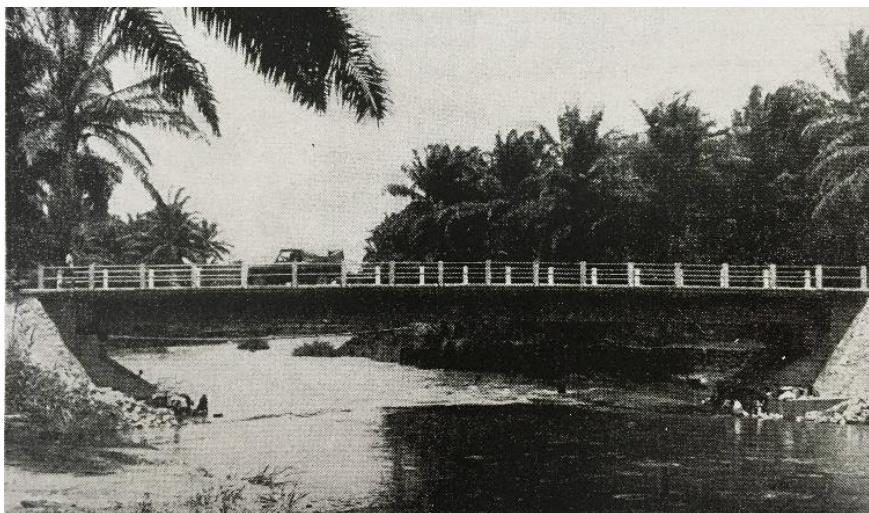


Figura 9 - Primeira ponte de betão armado pré-esforçado sobre o rio N'Gunza em Angola (Landerset & Perloiro, 1964)

O livro “Pontes no ultramar português” (Landerset & Perloiro, 1968) e a revista Fomento (Landerset & Perloiro, 1964) fazem referência de algumas pontes que foram construídas nas décadas de 1950 e 1960, como por exemplo a ponte Pinheiro Chagas sobre o rio Lucala, a ponte “Dr. Oliveira Salazar” sobre o rio Kwanza, a ponte Eng. Trigo de Moraes sobre o rio Cunene em Xangongo, entre outras.

Após a proclamação da independência de Angola, a 11 de novembro de 1975, instalou-se um conflito armado entre os três grupos nacionalistas pelo poder do país, nomeadamente o Movimento Popular de Libertação de Angola (MPLA), a União Nacional para Libertação de Angola (UNITA) e a Frente Nacional de Libertação de Angola (FNLA). Este último grupo juntou-se depois à UNITA para combater o MPLA. Este conflito armado de 27 anos transformou-se numa guerra civil que apenas terminou em 2002, devastando o país e destruindo boa parte das infraestruturas. Muitas das estradas, pontes e linhas ferroviárias foram minadas e destruídas. As restantes infraestruturas que sobreviveram ficaram sujeitas a uma degradação precoce e um envelhecimento acelerado, tendo em conta o período de vida útil previsto inicialmente (Pericão, et al, 2013).

Esta guerra civil pode ser dividida em três grandes períodos (1975-1991, 1992-1994 e 1998-2002) que foram intercalados por frágeis períodos de paz. Houve uma maciça intervenção estrangeira, nomeadamente países como Cuba, União Soviética, Estados Unidos da América e África do Sul, que prestaram assistência militar. O conflito armado teve impacto na Guerra da Independência da Namíbia e na segunda Guerra do Congo (Nepomuceno, 2014).

Em seguida são mencionadas algumas das pontes que foram totalmente ou parcialmente destruídas pela guerra civil. De forma a permitir um melhor enquadramento, é apresentado uma descrição sucinta de cada obra e posteriormente o ano ou conflito em que foi destruída.

Ponte “Dr. Oliveira de Salazar” sobre o rio Kwanza

Esta obra, localizada na província de Malanje, junto à localidade de Cangandala, foi concluída em 1954 e é uma ponte constituída por 15 arcos de betão armado, com comprimento total de 308 m, tal como ilustrado na Figura 10 (Landerset & Perloiro, 1964).

Sobre os arcos apoiam tímpanos, em betão simples e betão ciclópico, dos quais foram colocados terrenos compactados que servem de base ao pavimento. Os arcos estão apoiados sobre pilares com fundação direta. O arco maior tem um vão de cerca de 31 m e os restantes arcos têm vãos que variam entre 18,1 e 18,8 m (Armando Rito Engenharia, S.A).

A plataforma da ponte tinha uma largura quer perfazia 8,1 m, sendo que posteriormente foi alargada durante o processo de reabilitação.

No entanto, foram destruídos dois arcos em 1976 da ponte “Dr. Oliveira de Salazar” mencionada, sendo posteriormente restabelecida a ligação com uma treliça metálica provisória. Mais tarde, em 1992, duas partes da ponte foram novamente destruídas, uma junto ao encontro Norte e a outra na zona onde foi colocada a estrutura metálica, pelo que foram destruídos cinco arcos no total tal como se ilustra na Figura 11 (Rito, Cabral, & Lamy, Ponte sobre o rio Kwanza na Cangandala, 2008).

A ponte foi posteriormente reabilitada entre 2008 e 2010, como é apresentado e ilustrado no subcapítulo 1.2.3.

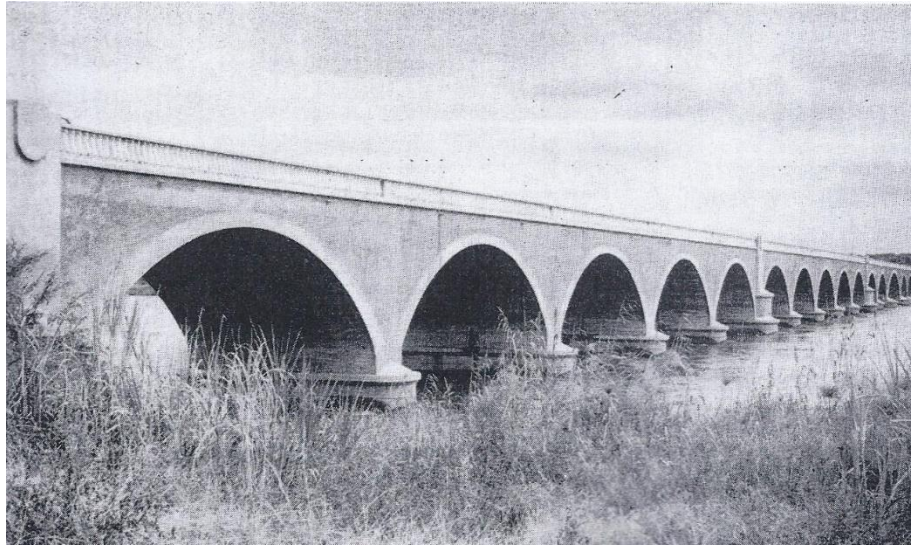


Figura 10 - Ponte Dr. Oliveira Salazar, sobre o rio Kwanza (Landerset & Perloiro, 1964)



Figura 11 - Ponte sobre o rio Kwanza, em Cangandala destruída (Armando Rito Engenharia, S.A)

Ponte Eng. Trigo de Moraes sobre o rio Cunene, em Xangongo

Esta ponte sobre o rio Cunene foi concluída em 1967 com 812 m de comprimento, dos quais 726,80 m eram constituídos por viadutos e 85,40 m sobre o leito menor (Figura 12). A superestrutura do tabuleiro era constituída por quatro vigas devidamente contraventadas por travessas, pré-fabricadas e pré-esforçadas ligadas superiormente por laje de betão armado. A superestrutura do tabuleiro do viaduto era formada por quatro vigas longitudinais também contraventadas por travessas e ligadas superiormente por uma laje de betão. O tabuleiro, de uma forma global, tinha uma largura total de 9,00 m, que correspondiam aos 7,00 m da faixa de rodagem e 1,00 m para a cada um dos passeios (Landerset & Perloiro, 1968).

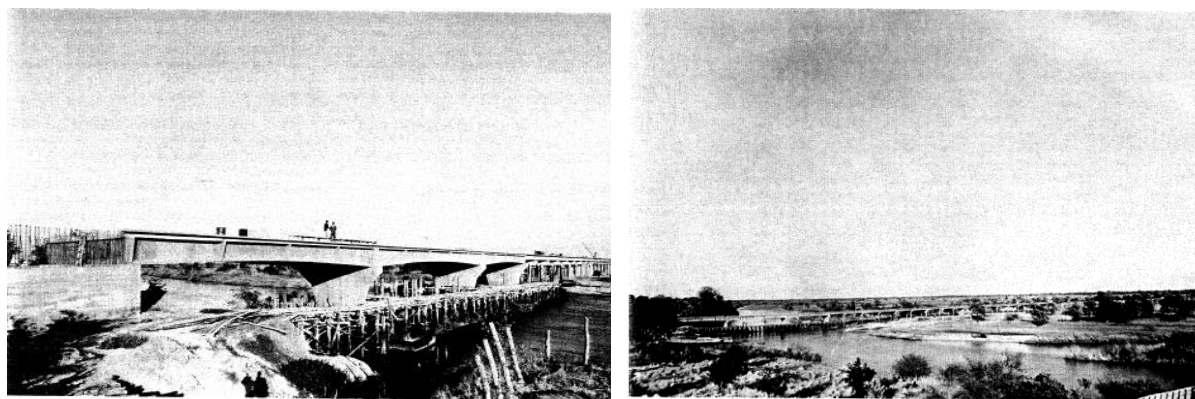


Figura 12 - Ponte sobre o rio Cunene, em Xangongo (Landerset & Perloiro, 1968).

Destruição de pontes durante a guerra sul africana na fronteira de Angola

A guerra sul africana na fronteira de Angola, que em inglês se designa por *South African Border War* e ocorreu entre 1966 e 1989, foi considerada como um dos maiores conflitos armados em África. Esta guerra ocorreu no Sudoeste Africano mais precisamente entre o Norte da Namíbia e o Sul de Angola, na então chamada “Área Operacional” ou “Fronteira” (Baxter, 2012; Sa Bushwar, 2014).

Esta guerra teve várias operações militares com as respetivas batalhas associadas, dentre elas destacam-se a operação savana e a operação protea, ambas desencadeadas pelas SADF (South African Defence Force), pois nestas operações ocorreram destruições parciais de pontes, como por exemplo as pontes sobre o rio Nhia e sobre o rio Queve na província do Kwanza-Sul e ponte sobre o rio Cunene em Xangongo. Mas também é de extrema importância realçar a Batalha de Cuito Cuanavale, onde também ocorreu a destruição parcial de uma ponte sobre o rio Cuito na província de Cuando-Cubango.

A operação savana ocorreu entre 1975 e 1976, foi uma intervenção militar das SADF na guerra da independência de Angola e subsequente guerra civil no país. Uma das grandes batalhas desta operação foi a designada *The Battle of Bridge 14*, batalha da ponte 14. Esta ponte localizava-se sobre o rio Nhia, na rota de Cela para Quibala na província do Cuanza-Sul, foi destruída parcialmente durante a batalha.

Durante o mesmo período de 1975 e 1976, também foram destruídas pelo MPLA e os cubanos três pontes sobre o rio Queve entre os municípios do Sumbe e do Porto Amboim, na província do Kwanza-Sul (George, 2005) (Pissaro, s.d.).

Mais tarde, em 23 de agosto de 1981, as SADF desencadearam uma outra operação militar designada de Operação Protea contra o MPLA e a SWAPO (South West Africa People's Organization). Esta operação terminou em março de 1988, e durante sete anos, o seu objetivo principal consistiu em destruir as linhas de abastecimento logístico das forças militares da SWAPO do sul de Angola, nomeadamente na província do Cunene, bem como desalojar as Forças Armadas Populares de Libertação de Angola (FAPLA) dessa província e entregar a sua administração a UNITA.

Uma das consequências desta operação militar foi destruição a parcial da ponte sobre o rio Cunene em Xangongo, até então maior obra de engenharia construída em Angola, a fim de impedir a entrada do exército nacional e cidadãos do norte e centro do Cunene por terra (Ribeiro, 2016).

Entre 1981 e 1992, as pessoas faziam a travessia do rio por meio de jangadas. Posteriormente, o sofrimento da população foi minimizado com a construção de uma ponte metálica provisória (Ceita, 2009).

Entre 2007 e 2009 foi construída uma nova ponte sobre o rio Cunene, que é referida a posteriori neste capítulo.

Ponte sobre o rio Cuito

Em 1986, os sul-africanos juntamente com a UNITA decidiram destruir a ponte sobre o rio Cuito de 12 pilares, construída em módulos, pois a mesma era um “elemento vital” no apoio logístico às unidades das FAPLA que se movimentavam para leste do rio. Foram então desencadeadas várias operações militares para o devido efeito.

Mas só em maio de 1987 é que foi feita uma primeira tentativa de destruição da ponte que, apesar de não terem conseguido a sua demolição, provocaram danos severos na mesma. De seguida, foram realizadas mais quatro tentativas sem sucesso de destruição completa.

Entretanto, na quarta tentativa foi lançada uma “bomba inteligente” pela África do Sul, em 3 de janeiro de 1988 que destruiu 20 m da ponte. Para poderem atravessar o rio Cuito, os cubanos construíram uma outra ponte de madeira que batizaram de *Patria o Muerte* (Pátria ou Morte) (conforme a Figura 13). O último ataque foi realizado em 23 de março de 1988, com o desfecho favorável às FAPLA, que contaram com a ajuda do exército cubano das Forças Armadas Revolucionárias de Cuba (FAR) (Ribeiro, 2016) (George, 2005) (Wikipédia, 2017). Este conflito designado de Batalha do Cuito Cuanavale, ocorreu entre 15 de novembro de 1987 e 23 de março de 1988, teve como desfecho a independência da Namíbia, o fim do regime de Apartheid na África do Sul e a instauração da democracia nesse mesmo país. (Rodrigues & Pedro, 2016). Esta batalha ocorreu na região do Cuito Cuanavale na província de Cuando-Cubango e foi a batalha mais prolongada que teve no continente africano desde a segunda guerra mundial.

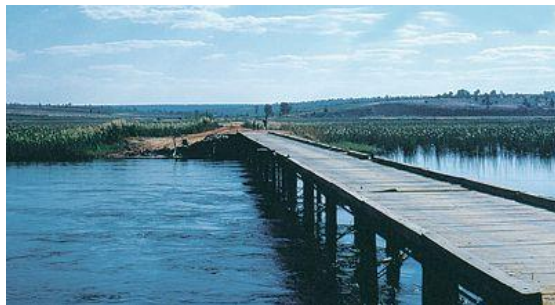


Figura 13 - Ponte sobre o rio Cuito em madeira (Ribeiro, As tentativas de destruição da ponte sobre o rio Cuito, 2016)

A 23 de março de 2016, 28 anos depois, foi inaugurada uma nova ponte sobre o rio Cuito, sendo mencionada posteriormente neste capítulo.

1.2.3 Século XXI: era da reabilitação e construção nova

Na data de 4 de abril de 2002, foi assinado o acordo de paz entre o MPLA e a UNITA, pondo assim o fim de 27 anos da guerra civil. Após a este acordo, Angola viveu um “boom” económico, graças ao petróleo, tornando-se num dos países de África que mais aceleradamente

mudou a sua economia (Sampaio, 2013). Assim, o governo angolano direccionou a sua atenção para a reconstrução das infraestruturas.

O Instituto Nacional de Estradas de Angola (INEA), criado em 1990 na dependência do Ministério da Construção (MINCONS), publicou em 05 de agosto de 2005 o “Programa de Reabilitação das Infraestruturas Rodoviárias” que teve como premissa básica o restabelecimento da malha viária do país e a reabilitação da maior extensão possível de estradas.

Muitas pontes foram concluídas, outras reabilitadas. Quando não é possível proceder-se à reabilitação das pontes ou em situação de emergência, são colocadas pontes metálicas provisórias na expectativa de posterior substituição por pontes definitivas. Até à data, foram montadas mais de 380 de estruturas metálicas provisórias, equivalentes a cerca de 7.970 metros lineares de estruturas metálicas em toda rede viária nacional.

De acordo com o Programa de Reabilitação de Infraestruturas Rodoviárias de 2015, até finais de 2015, foram concluídas 377 pontes em betão armado ou mistas e 434 pontes ainda estão em execução (INEA, 2015). Nesse processo foram reabilitadas muitas pontes e construídas muitas outras. Nesta subcapítulo pretende-se caracterizar algumas obras de arte que foram reabilitadas e construídas no século XXI, com diferentes tipos de soluções estruturais, sendo duas delas inclusive dignas de prémios internacionais. É importante referir que estas pontes são consideradas como marcos do processo de reconstrução nacional que o país vem registando nos últimos anos.

Ponte sobre o rio Kwanza na Cangadala

A reabilitação desta ponte consistiu em trabalhos que visaram essencialmente a reconstrução das zonas destruídas, a reparação e reforço e, ainda todos os trabalhos necessários à reposição das linhas originais da estrutura. Além destes trabalhos, a plataforma da ponte foi alargada através da execução de uma laje em betão armado que está assente sobre o enchimento entre tímpanos, perfazendo uma largura total de 10,2 m (Rito, Cabral, & Lamy, Ponte sobre o rio Kwanza na Cangadala, 2008). A Figura 14 mostra um dos trabalhos que foram realizados e na Figura 15 ilustra a ponte completamente reabilitada.



Figura 14 - Parte do processo de reabilitação da ponte sobre o rio Kwanza na Cangandala (Conduril, s.d.)



Figura 15 - Ponte sobre o rio Kwanza, em Cangandala reabilitada entre 2008 e 2010 (Armando Rito Engenharia, S.A)

Ponte sobre o rio Queve

A ponte sobre o rio Queve na província do Kwanza-Sul, no troço Rodoviário Waco-Kungo/Alto Hama, que foi construída em 1967 e destruída pela guerra no ano de 1992. Entre 2005 e 2006 foi reabilitada, cujos trabalhos visaram no reforço dos pilares existentes, pinturas de pavimentação, sinalização e drenagens. A parte da ponte que foi destruída era constituída por dois tramos e agora é constituída por três tramos. Esta ponte tem um comprimento total de aproximadamente 194 m, uma largura total de 9,36 m e está fundada diretamente por intermédio de sapatas (Armando Rito Engenharia, S.A) (ANGOP, 2005) (Conduril, s.d.).



Figura 16 - Ponte sobre o rio Queve (Armando Rito Engenharia, S.A) (Conduril, s.d.)

Ponte sobre o rio Caninda

Esta ponte está localizada na estrada Waco-Kungo/Alto-Hama na província do Kwanza-Sul e é constituída por dois tramos de 16,75 m, sendo que um deles foi destruído durante a guerra. Foi colocada posteriormente uma estrutura metálica provisória para restabelecer a ligação conforme a Figura 17. A ponte tem uma largura de 8,1 m e está assente sobre sapatas.



Figura 17 - Tramo destruído da ponte sobre o rio Caninda, com estrutura metálica provisória. (Conduril, s.d.)

A ponte foi reabilitada em 2007 cujos trabalhos consistiram na reconstrução do tramo destruído, com superestrutura constituída por vigas pré-fabricadas em betão armado e pré-esforçado. O pilar existente também foi reabilitado e foram instalados aparelhos de apoio neoprene, por tramo de tabuleiro. A Figura 18 ilustra a ponte depois de reabilitada (Armando Rito Engenharia, S.A).



Figura 18 - Ponte sobre o rio Caninda reabilitada (Conduril, s.d.)

Ponte sobre o rio Caimbambo

Esta ponte que foi construída em 1971, sobre o rio Caimbambo na província de Benguela tem 110 m de comprimento e tem uma largura total de 9,2 m. Nos tempos da guerra civil foram destruídos diversos tramos, tendo a ligação sido restabelecida através de uma ponte metálica provisória assente sobre o tabuleiro da ponte e o encontro da margem direita, conforme a Figura 19.



Figura 19 - Ponte sobre o rio Caimbambo com ponte metálica provisória (Conduril, s.d.)

Em 2009 esta ponte foi reabilitada e os tramos destruídos foram reconstruídos de forma semelhante aos originais.

Esta obra foi recuperada numa extensão total de 110,00 m, através das reabilitação e reforço dos elementos estruturais em 75,00 m e a reconstrução total dos restantes 35,00 m. Este

processo incluiu a reconstrução do tabuleiro em betão armado, com geometria idêntica à da estrutura original e construção de novos pilares (Figura 20). Os pilares estão assentes em estacas de betão armado (Armando Rito Engenharia, S.A) (Conduril, s.d.).



Figura 20 - Ponte sobre o rio Caimbambo durante a fase de reabilitação (Conduril, s.d.)

Ponte sobre o rio Cavaco

Esta obra (Figura 21) localizada na província de Benguela, é uma ponte mista aço-betão com comprimento total de 172 m, cuja largura total é de 18 m e está fundada indiretamente por intermédio de estacas.



Figura 21 - Nova ponte sobre o rio Cavaco, em Benguela (Conduril, s.d.)

Esta ponte foi construída entre 2004 e 2005 para substituir a antiga ponte sobre o rio Cavaco datada de 1954 e que colapsou em 2002 (tal como está ilustrado na Figura 22), devido a erosão do solo causada por fortes chuvas que caíram no local. A ponte tinha um comprimento

total de 118,40 metros. A sua superestrutura era constituída em vigas cantilever e as fundações eram em caixões de betão armado, assente por havage e foram cheios com betão ciclópico (Landerset & Perloiro, 1964).

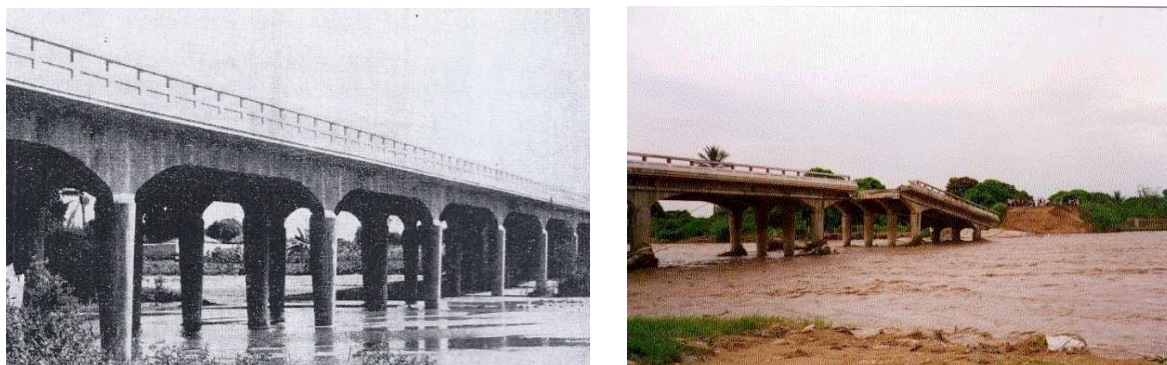


Figura 22 - Antiga ponte sobre o rio Cavaco, antes e depois do colapso (Landerset & Perloiro, 1964) (Fonte: Engenheiro Carlos Matias Ramos)

Ponte 4 de Abril sobre o rio Catumbela

Esta ponte, cujo nome é alusivo a data na qual foi assinado o acordo de paz entre o MPLA e a UNITA, localiza-se numa zona urbana da província de Benguela, incorporada na via rápida entre Benguela e Lobito e inserida numa zona urbana. É uma ponte atirantada, de suspensão total, contínua com dois viadutos de acesso em ambas as margens do rio, tal como ilustrado na Figura 23. A descrição desta obra é feita a posterior no subcapítulo 4.2.

A Ponte 4 de Abril veio substituir a centenária ponte metálica “Luís Filipe”, que foi construída em 1905 como já referido no subcapítulo 1.2.1, cuja utilização era condicionada pela diminuta largura permitindo apenas uma via única de sentido alternado. Desta forma, a travessia do rio Catumbela era muito morosa, podendo demorar mais de duas horas. A implantação desta ponte sobre o rio Catumbela teve dificuldades significativas devido às condicionantes topográficas, a necessidade de utilizar uma rasante muito baixa, entre outros. Como tal, depois de realizados estudos de várias alternativas foi então adotada a solução de um tabuleiro atirantado de vão central de 160 m sobre o leito menor do rio, que garante a rasante mais baixa, ausência de pilares no rio e menor extensão de obra (Rito, et al, 2011; Secil, 2011).



Figura 23 - Ponte 4 de abril sobre o rio Catumbela (Rito, et al, 2011)

Esta nova ponte é um projeto da autoria do gabinete Armando Rito Engenharia, foi construída entre 2007 e 2009 e é considerada como uma obra de grande importância na rede fundamental de estradas do país pois permite a ligação sem entraves entre várias províncias do país, permitindo assim um desenvolvimento socioeconómico na região.

Em 2011 foi atribuído o prémio Secil a esta obra, e foi desde logo considerada como um marco de referência da modernidade na renovação e reconstrução de Angola (Secil, 2011).

Ponte sobre o rio Cunene, em Xangongo

Esta ponte localiza-se em Xangongo, na província do Cunene, e faz parte da estrada que liga Lubango a Ondjiva.

É uma ponte vigada cuja superestrutura é mista constituída por um tabuleiro com duas vigas de aço em caixão e painéis em betão pré-fabricado, tal como é ilustrado na Figura 24. Tem 16 vãos de 50 m e dois vãos de 40 m, fazendo um total de 880 m de comprimento e uma largura total de 12,00 m. Esta obra está fundada indiretamente por intermédio de estacas (Miranda, 2011).



Figura 24 - Vista inferior do tabuleiro da ponte sobre rio Cunene em Xangongo (Miranda, 2011)



Figura 25 - Ponte sobre o rio Cunene em Xangongo (CRBC)

A construção desta obra, entre 2007 e 2009, resultou da reabilitação do troço Ondjiva/Humbe, numa extensão de 108 quilómetros, dentro do quadro do programa de recuperação da malha rodoviária nacional levado a cabo pelo Governo, através do INEA (Ceita, 2009).

Esta ponte é considerada como um marco para a província do Cunene, é um vetor para o desenvolvimento socioeconómico da região e está enquadrada numa das metas do Plano Nacional de Desenvolvimento 2013-2017.

Em 2010 esta obra recebeu o prémio da South African Institution of Civil Engineering (SAICE) como “*The Most Outstanding Civil Engineering Achievement in the International Projects Category*”, cujo projeto é uma autoria da empresa AURECON (Boshoff, 2010).

Ponte sobre o rio Cuito

A ponte sobre o rio Cuito localiza-se a este do município de Cuito Cuanavale, na província do Cuando-Cubango. A superestrutura da ponte é constituída por um tabuleiro único, constituído por duas vigas longitudinais em betão armado e pré-esforçado.

A ponte tem um comprimento total entre eixos de 190,00 m, dividido em dois vãos laterais de 20,00 m e cinco vãos intermédios de 30,00 m e apresenta uma largura total de 11,00 m, tal como ilustrado na Figura 26. Os pilares e os encontros são dotados de fundações indiretas por intermédio de estacas (Armando Rito Engenharia, S.A).



Figura 26 - Nova ponte sobre o rio Cuito (Ribeiro, 2016)

A ponte foi construída entre 2015 e 2016, sendo inaugurada no dia de comemoração dos 28 anos de derrota das tropas sul-africanas e da UNITA no assalto final do Triângulo do Tumpo.

Esta ponte revela-se de extrema importância pois é funciona como catalisador para o desenvolvimento regional e progresso nacional, tratando-se de uma via fundamental para promover o desenvolvimento da região austral do continente e facilitar a integração regional.

Ponte 17 de Setembro na Cabala

Esta obra (Figura 27) que atravessa o rio Kwanza, cujo nome é em homenagem à data de nascimento do fundador da Nação Angolana, Dr. António Agostinho Neto, localiza-se na província do Bengo, na estrada que liga Catete (terra natal de Agostinho Neto) ao Santuário da Muxima. Foi construída entre 2008 e 2010, tendo sua inauguração ocorrido a 3 de setembro de 2011, um dia antes da peregrinação à Nossa Senhora da Muxima.



Figura 27 - Inauguração da ponte 17 de Setembro, sobre o rio Kwanza na Cabala (Rosa, 2011)

A ponte 17 de Setembro é constituída por dois módulos independentes (Norte e Sul), sendo que o primeiro, apesar de contínuo, também se divide em três zonas distintas. A obra tem um comprimento total de 1534 m, tendo o módulo Norte 760,00 m e o módulo Sul 774,00 m, tornando-se na ponte mais extensa do território angolano.

O módulo Norte é constituído por viaduto + ponte + viaduto; a superestrutura da ponte é constituída por tabuleiro em viga caixão unicelular de betão armado pré-esforçado com três tramos de 68+120+68 m e tem uma largura de 14,60 m (Figura 28). O viaduto de acesso do lado Norte tem um tramo extremo de 24 m e seis tramos de 10 m e o viaduto de acesso do lado sul tem 10 tramos de 30 m (Armando Rito Engenharia, S.A).

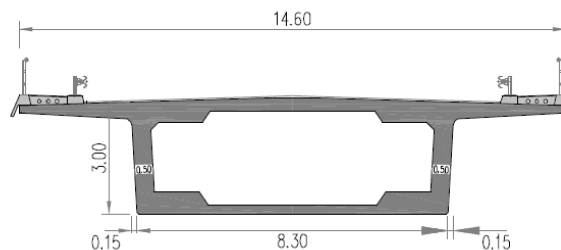


Figura 28 - Desenho da secção transversal do tabuleiro da ponte sobre o rio Kwanza (Libânio, 2012)

O módulo Sul é constituído por um viaduto de acesso do lado sul com 25 tramos de 30 m e um tramo extremo de 24 metros.

A superestrutura de todos viadutos de acesso é constituída por tabuleiros em viga com uma largura de 14,60 m. Este tabuleiro é constituído por duas vigas longitudinais de altura constante.

Toda esta obra está assente sobre estacas a profundidades que atingem os 78 m.
(Armando Rito Engenharia, S.A)



Figura 29 - Ponte 17 de Setembro sobre o rio Kwanza (Armando Rito Engenharia, S.A) ´

Esta obra veio facilitar o acesso de milhares de peregrinos que vão anualmente à capela situada a 135 km de Luanda, no município da Quiçama, também tem servido de corredor interior alternativo ao corredor litoral, permitindo não só a ligação dos municípios de Icolo e Bengo e da Quiçama como também o resto de Angola ao sul do rio Kwanza. É considerada também a maior obra de arte do país desde que foi assinado o acordo de paz. (Rosa, 2011)

Ponte sobre o rio Giraul

Esta obra sobre o rio Giraul, tal como ilustrado na Figura 30, localiza-se na região do Giraul de Cima e dista 12 quilómetros da sede do município na província do Namibe,

permitindo a ligação entre esta província e a província da Huíla. É considerada a quarta maior ponte de Angola e a segunda maior da província (SEOP, 2015) (Malanje, 2016) (Martins, 2016).

A superestrutura é constituída por um tabuleiro contínuo, com largura total é de 11,00 m, composto por cinco vigas longitudinais pré-fabricadas de betão armado e pré-esforçado. O tabuleiro divide-se em três partes com cerca de 200 m cada, através de juntas de dilatação. A primeira parte desenvolve-se em tramos de $19,95+8 \times 20,20+20,25$ m de vão; a segunda parte desenvolve-se em tramos de $20,25+8 \times 20,20+20,25$ m de vão; e a terceira em tramos de $20,25+8 \times 20,20+19,95$ m de vão. O comprimento total do tabuleiro entre eixos é de 605,70 m. Os pilares e os encontros são fundados indiretamente por intermédio de estacas (Telhabel, Construções).



Figura 30 - Ponte sobre o rio Giraul (Telhabel, Construções)

A construção desta obra deveu-se a necessidade de substituir uma ponte antiga, localizada sobre o rio Giraul de Baixo, que teve um colapso parcial em 4 de março de 2011 (Figura 31) devido a ação da erosão. Esta ponte tinha vãos muito pequenos entre os pilares e com as chuvas torrenciais que ocorreram na região provocaram uma concentração de resíduos; estes por sua vez impediam a passagem da água, resultando numa acumulação da mesma que depois de ter atingido o tabuleiro causou o desabamento da ponte. Este colapso obrigou aos

automobilistas a contornar por uma estrada bastante desconfortável e que aumentava significativamente a distância, na viagem do Lubango para o Namibe.

A antiga ponte tinha um comprimento de 280 metros e foi a primeira ponte em curva, assente em fundações diretas, feita no tempo colonial. Foi alvo de intervenções nas décadas de 80 e 90, pois tinha como problema, por exemplo, a danificação das fundações devido à erosão e falta de manutenção (Martins, 2016).



Figura 31 - Colapso da ponte sobre o rio Giraul (ISQ)

A construção da nova ponte tem uma importância crucial, pois além do tráfego normal que circula sobre a mesma, cruzam-se também todos os veículos pesados de mercadorias entre as duas cidades (Namibe e Lubango) e para todos os pontos do país.

A construção desta ponte ocorreu entre 2014 e 2016. A mesma não só providenciou uma extensão maior (possuindo mais do que o dobro do tamanho da anterior), como também os vãos passaram a ser cinco vezes maiores que anteriores de 4 m e a obra revela-se mais alta do que a anterior em, pelo menos 4,5 m.

A ponte foi inaugurada em 4 de fevereiro de 2016, no âmbito do 55º aniversário, data que marca início da luta armada e de libertação nacional (Malanje, 2016) (SEOP, 2015).

1.3 Estratégia atual de gestão das pontes

Neste subcapítulo pretende-se resumir a estratégia atual de gestão das pontes em Angola, destacando-se o processo de implementação de um sistema de gestão de obras de arte.

Devido a vasta rede rodoviária do país, que compreende um amplo número de obras de arte, o INEA viu-se na necessidade de, enquanto gestor de todas as infraestruturas (pontes e outras obras de arte), ter um inventário que permitisse um conhecimento do estado de conservação das mesmas e que ajudasse na definição do planeamento das ações de conservação e de reabilitação de cada estrutura. Assim, surgiu a parceria entre o INEA e o Instituto de Soldadura e Qualidade Reabilitação S.A. (ISQ).

Em 2000, o ISQ apresentou ao INEA o sistema de gestão de obras de arte SGOA Pontis ® Bridge Management System, contudo só em 2005 através do primeiro contrato celebrado entre os dois institutos é que o referido sistema foi implementando. O Pontis ®, atualmente designado de AASHTOWare™ Bridge Management System, foi primeiramente desenvolvido sob um projeto da National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) patrocinado pela Federal Highway Administration (FHWA) no começo da década de 1990 e logo depois foi transferido para AASHTO para maior desenvolvimento, manutenção e apoio (AASHTO Ware Bridge , 2016). Este sistema tem sido utilizado desde então na identificação dos estados de conservação, na definição das intervenções a realizar e na calendarização destes trabalhos, dando resposta às necessidades do INEA. Além disso o software foi adaptado e configurado à realidade angolana fazendo com que a sua utilização seja limitada ao módulo de inspeção (Pericão, et al, 2013).

1.3.1 Implementação do Pontis - Metodologia Implementada

A implementação do Pontis tem sido feita de forma sequencial e sistematizada. Esta implementação parte de uma sistematização que compreende os seguintes aspetos:

- A classificação das obras de arte de acordo com os códigos e instruções da FHWA (Federal Highway Administration) e AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials);
- Elaboração de procedimentos de apoio às inspeções;

- Elaboração de um Manual do inspetor de obras de arte.

De seguida é feita uma inspeção preliminar onde são identificadas as características e especificidades do local que condicionam a inspeção, bem como as características geométricas e dos materiais da obra de arte.

Procede-se posteriormente à inspeção propriamente dita, onde é feito um inventário e levantamento dimensional, assim como o levantamento de anomalias através da inspeção visual de todos os componentes da ponte e por fim é feita uma avaliação do estado de conservação de cada elemento *in situ*.

Finalmente são introduzidos os dados de inspeção ao Pontis, que realiza a avaliação do nível de conservação de cada elemento da ponte, a definição dos trabalhos recomendados pelos inspetores em cada ponte, o cálculo dos índices de avaliação funcional (Sufficiency Rating-SR) e a identificação das técnicas de reparação e manutenção.

Atualmente o ISQ está a reunir informações para obter o índice de classificação SR, nomeadamente os dados relativos ao tráfego e sobrecargas rodoviárias.

1.3.1.1 Inventário e Inspeção

As primeiras atividades de inspeção em Angola iniciaram-se em 1997 ao abrigo de um contacto de cooperação do INEA e a agência de apoio ao desenvolvimento do Governo de Portugal. O âmbito dos trabalhos era o levantamento do estado de conservação das seguintes obras de arte:

- Ponte sobre o rio Kwanza (atirantada);
- Ponte “velha” sobre o rio Catumbela;
- Ponte sobre o rio Balombo e rio Cubal.

Deste levantamento adveio o projeto de reabilitação da Ponte do Kwanza, o qual teve início no ano de 2000 e conclusão em 2002. Para as restantes obras de arte foram elaborados os projetos para a construção de novas pontes (ISQ, 2012).

A implementação do Pontis foi feita em duas fases, contemplando a realização do inventário e inspeção das obras de arte inseridas na rede fundamental de estradas de Angola. A primeira fase, que foi concretizada entre 2005 e 2007, foram inspecionados três troços (tal como ilustrado na Figura 32) previamente definidos pelo INEA: Luanda-Malanje (EN230), Luanda-Benguela (EN100) e Luanda-Soyo (EN100) totalizando 92 pontes. A segunda fase foi realizada em 2013, foram inspecionados 27 troços de estradas nacionais incluindo os troços da primeira fase, totalizando 844 obras de arte. Este número inclui pontes definitivas e provisórias, PH (passagens hidráulicas) boxer cover, passagens inferiores, passagens pedonais, viadutos de betão e um túnel de betão.



Figura 32 - Mapa com os três primeiros troços inspecionados (Alves & Sebastião, 2006)

As pontes atirantadas sobre o rio Kwanza e sobre o rio Catumbela, bem como a ponte 17 de setembro sobre o rio Kwanza localizada na Cabala, possuem um programa próprio de inspeção e monitorização, por isso, ainda não foram inspecionadas no âmbito do sistema de gestão, até ao momento.

As pontes definitivas inspecionadas totalizam 544 obras, dos quais 486 são pontes em betão, 76 são pontes mistas de betão/aço, sete mistas de betão/alvenaria, três em aço e quatro em armaco.

A maior parte das estruturas encontradas apresentam deficiência nas condições de segurança e funcionalidade, conseqüentes das elevadas sobrecargas de tráfego, dos danos causados pelo conflito armado, e a insuficiência nas ações de conservação e manutenção.

Uma vez que não há dados de inventário da maioria das obras de arte, o SGOA teve início *in situ* com a inventariação e o levantamento dimensional. Nesta etapa foram recolhidos os seguintes elementos: identificação do local, coordenadas GPS, extensão da estrutura, número da estrada, quilómetro, tipo de obra de arte, obstáculo que vence, tipo de serviço, etc (Pericão, et al, 2013).

Foi revelado uma diversidade de anomalias, devido a heterogeneidade das estruturas inspecionadas. Dentro dessas anomalias foram identificadas anomalias frequentes e anomalias pontuais, conforme a Figura 33:

Anomalias frequentes	Associadas à falta de acções de manutenção e deterioração de equipamentos e materiais
• Aparelhos de apoio e juntas de dilatação degradados • Sistemas de drenagem obstruídos • Falta de equipamentos de segurança, sinalização inadequada/inexistente • Vegetação excessiva e detritos sobre aparelhos de apoio • Degradação do betuminoso • Fissuração e fracturas em encontros e muros laterais • Eflorescências e infiltrações na face inferior do tabuleiro • Fendilhação no betão devido ao deficiente comportamento estrutural e/ou degradação dos materiais • Delaminação no betão e corrosão das armaduras • Focos de corrosão na estrutura metálica, destacamento e degradação da protecção anticorrosiva	
Anomalias pontuais	Devido a problemas geotécnicos, cheias, colisões, carga excessiva, deficiências de projecto/execução, entre outras
• Estrangulamento na via de acesso à ponte • Perda de secção em armaduras • Deformações resultantes da ocorrência de assentamentos em elementos da estrutura e associadas a deficiências estruturais • Infraescavação e erosão das fundações /fundações à vista • Acções mecânicas devido ao embate de projecteis • Falta e desaperto de parafusos, defeitos em soldaduras • Fendilhação e destacamento da alvenaria • Pontes provisórias: Desaperto/falta de cavilhões e parafusos, fracturas, deformações, empenos e corrosão na estrutura metálica • PH's: Infiltrações de água, fissuração nos elementos de betão e corrosão de elementos metálicos	

Figura 33-Lista das anomalias principais das obras de arte em Angola (Pericão, et al, 2013)

As figuras (Figura 34 e Figura 35) demonstram algumas das anomalias identificadas.



Figura 34 - Vegetação sobre o pilar da ponte sobre o rio Lucala (Pericão, et al, 2013)



Figura 35 - Infraescavação nas fundações da ponte sobre o rio Caluála (Pericão, et al, 2013)

Nas obras de artes com construção mais moderna verificaram-se um conjunto de danos, como por exemplo focos de oxidação, deficiente compactação do terreno, drenagens insuficientes, esquemas de proteção anticorrosiva, que resultam de erros de projeto e de execução, assim como da deficiência no controlo da qualidade durante a execução das obras (Pericão, et al, 2013).

A implementação deste sistema de gestão de obras de arte deparou-se com as seguintes dificuldades principais:

- Não existência de um inventário;
- Não existência ou falta de documentos e desenhos de projeto;

- A reconstrução e manutenção de pontes era feita de uma forma reativa, isto é, só era realizada uma intervenção após as pontes colapsarem total ou parcialmente;
- Falta de pessoal qualificado para realizar as inspeções nas pontes e elaborar planos de reconstrução (Alves & Sebastião, 2006).

A implementação do sistema de gestão tem sido feita de forma faseada e sequenciada, o que permite ter um melhor conhecimento das obras de arte no território angolano. Uma das etapas fundamentais a implementar neste sistema de gestão é a formação de técnicos do INEA, que ainda não foi realizada.

1.3.1.2 Estado de conservação das obras em Angola

O ISQ realizou a avaliação dos estados de conservação, níveis de prioridade e intervenções de reparação com base no Manual do Inspetor de obras de arte.

Enquanto se procede a conclusão da recolha de dados para a determinação do índice de avaliação, SR, pelo Pontis®, foram definidos três níveis de prioridade técnica para as intervenções de reabilitação (Tabela 1) numa escala simplificada de cores. Considerando o estado de conservação definido para cada obra de arte, e em função do tempo de correção das anomalias verificadas, os níveis de classificação são caracterizados por:

- Nível 1 (cor verde) – está associado a estados de conservação de obras de arte razoáveis, cujas prioridades de intervenção são a médio e longo prazo;
- Nível 2 (cor amarela) – está associado a estados de conservação médio ou grave, na qual a obra de arte apresenta alguns problemas estruturais que não comprometem o estado de conservação geral, e/ou obras de arte com estruturas de proteção para utentes danificadas ou inexistentes e/ou estruturas provisórias em bom estado de conservação.
- Nível 3 (cor vermelha) – está associado a estados de conservação de estruturas muito graves, quando é verificado a existência de anomalias estruturais muito graves que comprometem a estabilidade das obras de arte e cuja intervenção é urgente.

Tabela 1 - Classificação do estado de conservação das obras de arte (ISQ, 2012)

Estado de conservação	Nível de intervenção
Razoável	- Intervenções de manutenção.
Médio/Grave	- Reparação de anomalias; - Pontes provisórias; - Adicionar ou reforçar sistemas de proteção de utentes.
Muito grave	- Elaboração de projeto de reabilitação/reforço; - Projeto para ponte nova.

De acordo com (Pericão, et al, 2013) cerca de 40% das 497 obras de arte que foram inspecionadas até a respetiva data da publicação apresentam um estado de conservação médio/grave. As obras com deficiências estruturais e funcionais muito graves, que se encontram em mau estado de conservação, correspondem a 16%. Posteriormente, ainda em 2013, no âmbito da continuação da realização das inspeções é que foi atualizado o número de obras de arte para 844 como já foi referido em 1.3.1.1.

O INEA realiza as intervenções na sequência de relatórios de inspeção e nos relatórios informativos urgentes, através da concretização dos seguintes trabalhos:

- Reforço/substituição de pontes metálicas provisórias;
- Reforço e consolidação de fundações;
- Reabilitação geral e reforço estrutural;
- Limpeza da obra de arte com remoção de vegetação, desobstrução da rede de drenagem de água e melhorias ao nível de sinalização.

Com a implementação do Pontis® cabe ao INEA tomar a iniciativa de cumprir as ações de reabilitação, manutenção e conservação em cada obra de arte.

1.4 Levantamento dos sistemas estruturais e fundações de pontes

A autora realizou um levantamento de algumas pontes existentes em Angola que foram construídas ou reabilitadas durante este século e cuja lista se apresenta em anexo, onde são apresentadas características principais das pontes. Deste levantamento foram retirados dados relativos à data de construção, soluções estruturais, seções transversais, localização (província),

comprimento total, largura total e tipo de fundação. Infelizmente, nem todas as pontes apresentadas possuem todos os dados, pelo que ficaram alguns campos sem elementos. Assim, as Figura 36, Figura 37, Figura 41 e Figura 46 apresentam os gráficos das percentagens dos dados mais importantes para fins de comparação, nomeadamente o comprimento total, secções transversais, soluções estruturais e o tipo de fundação. Todo este levantamento foi feito com amostra de 111 pontes rodoviárias.

Assim, observou-se que quase metade das pontes apresentam um comprimento total inferior a 50 metros, que corresponde a uma percentagem de 45% tal como é ilustrado na Figura 36.

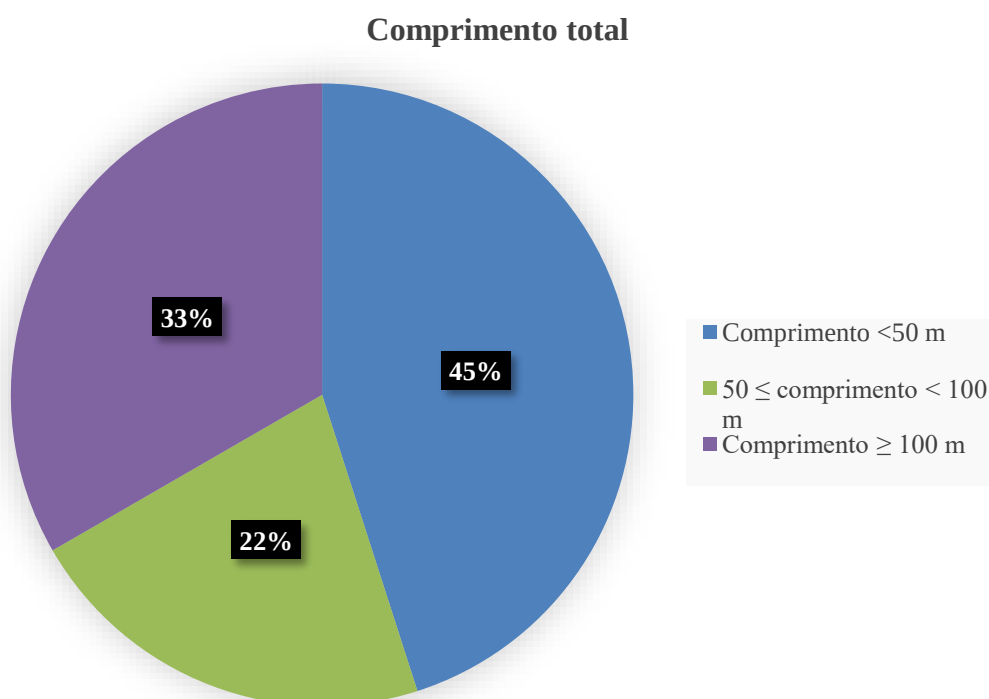


Figura 36 - Caracterização dos comprimentos totais das pontes rodoviárias angolanas

A maior parte das pontes tem uma solução estrutural em laje vigada correspondente a 95% tal como é ilustrado na Figura 37. Os outros casos de soluções diferentes correspondem as pontes de tirantes (2%) e as pontes em arco (3%). Tem-se como exemplo de pontes de tirantes a ponte 4 de Abril já referida no em 1.2.3 e a ponte da Barra do Kwanza datada de 1975 que se localiza na província de Luanda. Esta obra (Figura 38) é uma ponte mista aço-betão, de

tabuleiro auto ancorado e tem um comprimento total de 400 m com dois tramos extremos de 70,00 m de vão e um tramo central com vão de 260,00 m; já foi intervencionada algumas vezes desde a sua data de construção e é um importante eixo de ligação da capital ao resto do país (Armando Rito Engenharia, S.A).

As pontes em arco cujo levantamento foi possível foram a ponte sobre o rio Kwanza na Cangandala já referida em 1.2.1 , a ponte sobre o rio Longa (Figura 39) e ponte sobre a lagoa do Panguila (Figura 40).

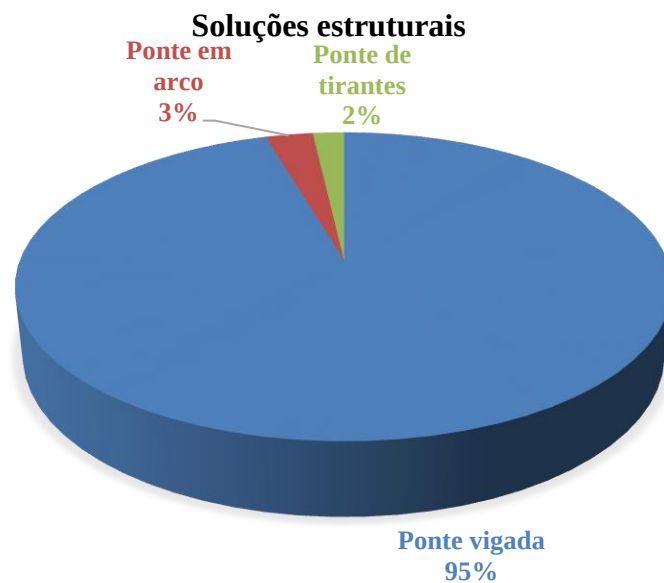


Figura 37- Caraterização das soluções estruturais



Figura 38- Ponte da Barra do Kwanza sobre o rio Kwanza (Armando Rito Engenharia)



Figura 39 - Ponte sobre o rio Longa



Figura 40 - Ponte da Lagoa do Panguila

A Figura 41 apresenta os gráficos das percentagens das seções transversais dos tabuleiros das pontes construídas e reabilitadas no século XIX, com a amostra de 111 pontes, dos quais 11% delas não foi possível levantar este tipo de informação. Todavia, é possível observar que uma boa parte dos tabuleiros das pontes são constituídos por vigas pré-fabricadas em betão armado e pré-esforçado, tal como é exemplificado na Figura 42. Há os outros casos em que os tabuleiros são constituídos por vigas longitudinais em betão armado e pré-esforçado (betonadas *in situ*) (Figura 43), vigas metálicas (misto aço-betão) (exemplificado na Figura 44) e outros casos os tabuleiros são constituídos por uma laje maciça de betão armado (exemplificado na Figura 45). Porém, há casos em que as seções transversais dos tabuleiros são constituídas por laje maciça e vigas pré-fabricadas, devido aos alargamentos que foram efetuados durante o processo de reabilitação das respetivas obras e, por isso foram considerados como um tipo de solução separada (laje maciça + vigas pré-fabricadas) correspondente a 6%.

Seções transversais dos tabuleiros

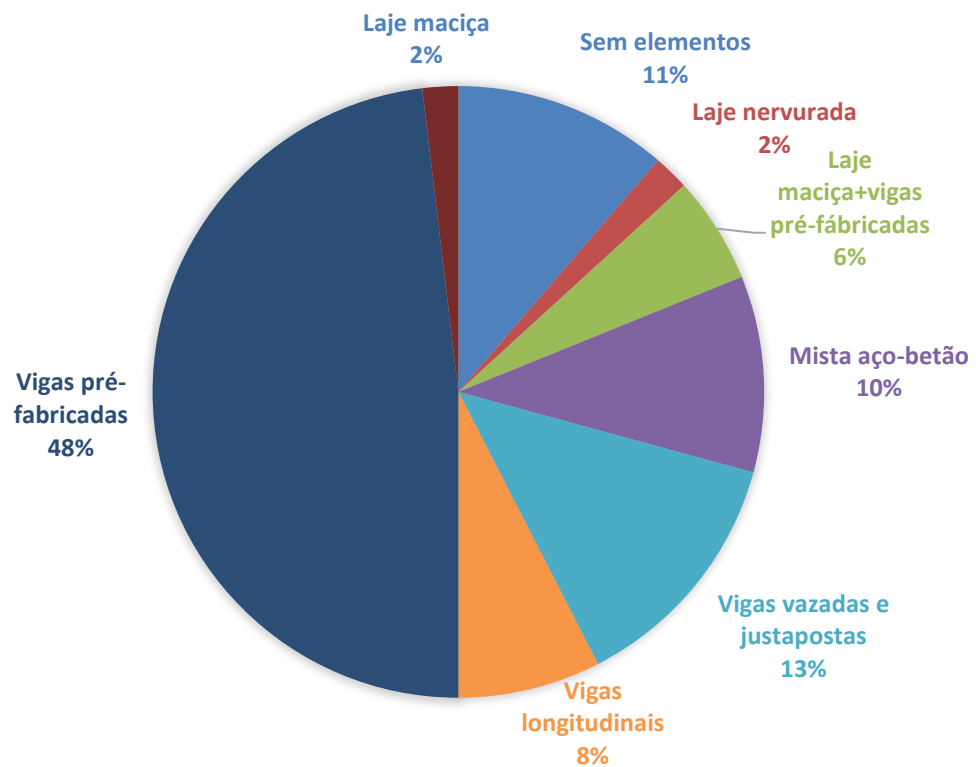


Figura 41 - Tipificação das seções transversais dos tabuleiros



Figura 42 - Ponte sobre o rio Catofe, solução do tabuleiro com vigas pré-fabricadas (Armando Rito Engenharia, S.A)



Figura 43 - Ponte sobre o rio Cubal de Hanha, solução de tabuleiro com duas vigas longitudinais (Armando Rito Engenharia, S.A)



Figura 44 - Ponte sobre o rio Cuilo na fase de construção, solução de tabuleiro com vigas metálicas (COBA)



Figura 45 - Ponte sobre o rio Caimbambo durante a fase de reabilitação, solução de tabuleiro de laje de betão armado maciça (Armando Rito Engenharia, S.A)

E por fim, a Figura 46 ilustra que apesar de não ter sido possível o levantamento do tipo de fundação de 16% das 111 pontes, as mesmas encontram-se maioritariamente assentes em fundações indiretas.

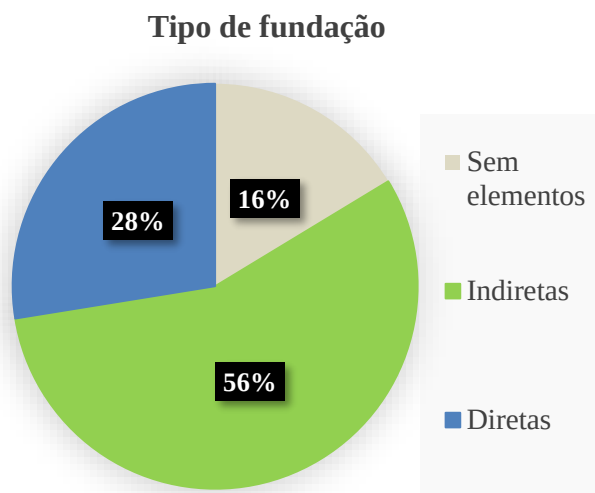


Figura 46 - Caraterização dos tipos de fundação das pontes rodoviárias

1.5 Considerações finais

Angola é um país em desenvolvimento, cuja economia emergiu ao longo dos últimos anos, permitindo o crescimento, ainda que de forma desfasada, nas várias províncias. Parte desse crescimento tem-se sentido muito no sector da construção, principalmente na área de infraestruturas rodoviárias.

Com este capítulo pretendeu-se caraterizar o parque de pontes rodoviárias angolanas, incluindo uma descrição resumida e breve sobre a história da sua construção e as adversidades que tiveram de suportar, nomeadamente a guerra civil.

Durante os 27 anos de conflito armado, a rede rodoviária de Angola foi bastante danificada sendo que uma grande parte das pontes foram destruídas. Após a guerra civil, o Governo direccionou a sua atenção para a reconstrução das infraestruturas e neste processo foram reabilitadas muitas pontes, outras foram substituídas temporária e/ou definitivamente, sendo que algumas ainda se encontram em fase de reabilitação.

Para permitir uma melhor gestão das obras de arte do país, foi apresentado pelo ISQ ao INEA, o sistema de gestão de obras de arte Pontis®. Este sistema tem sido implementado de forma faseada e sequenciada, de modo a permitir um melhor conhecimento sobre obras de arte no território. A introdução de informação no Pontis, a inventariação e a inspeção, têm contribuído na identificação do estado de conservação, na definição das ações de reabilitação, manutenção e conservação a serem tomadas em cada obra de arte, bem como a respetiva priorização de intervenção e a definição da sua calendarização.

De acordo com o levantamento feito pela autora com uma amostra de 111 pontes, a maior parte das pontes em Angola apresenta uma solução estrutural em laje vigada e com seção transversal com vigas pré-fabricadas, sendo que 67% têm comprimento inferior a 100 m e estão fundadas maioritariamente por estacas.

Capítulo 2

Gestão de pontes nos EUA e em Portugal

2.1 Considerações gerais

A avaliação das condições de obras de arte como as pontes, bem como a manutenção das mesmas, tem sido exigida pela sociedade, para se evitar colapsos, mas também pelos danos das pontes de forma a evitar a deterioração das mesmas. Atualmente, a motivação para essa avaliação permanente ou temporária, tem sido, impulsionada, prudentemente, pelos colapsos catastróficos que têm ocorrido muito em diversas partes do mundo.

Tem-se como exemplos, o colapso da ponte Hintze Ribeiro sobre o rio Douro em Entre-os-Rios Portugal (Figura 47), ocorrido a 4 de março de 2001 que resultou da morte de 59 pessoas e o colapso da ponte I-35 W nos Estados Unidos da América_(EUA), sobre o rio Mississippi em Minneapolis, ocorrido a 1 de agosto de 2007, resultando na morte de 13 pessoas (Figura 48) (Figueiredo, et al, 2013).

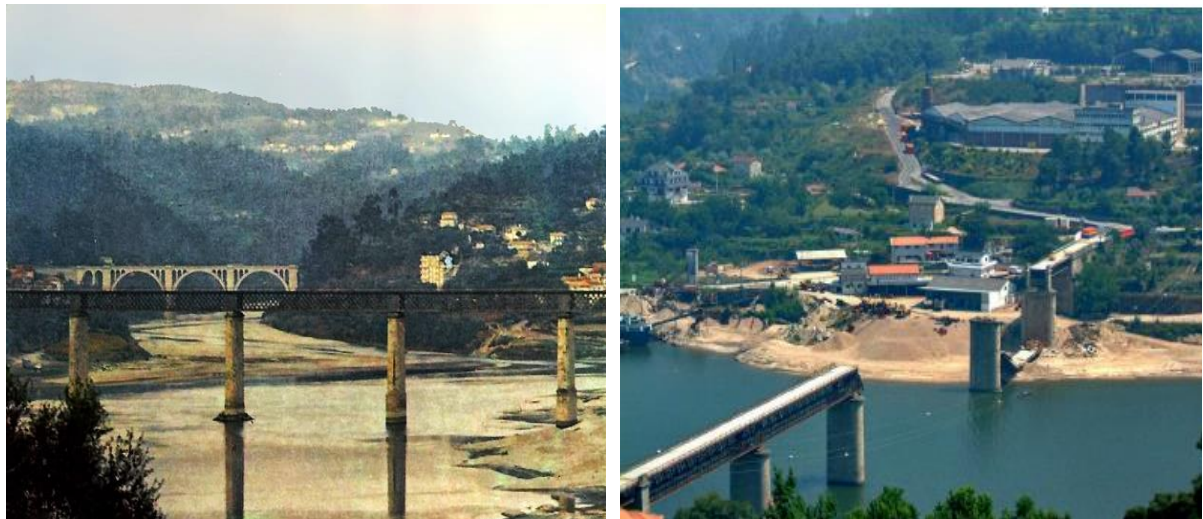


Figura 47 - Ponte Hintze Ribeiro sobre o rio Douro, antes e depois do colapso (Branco, 2013)

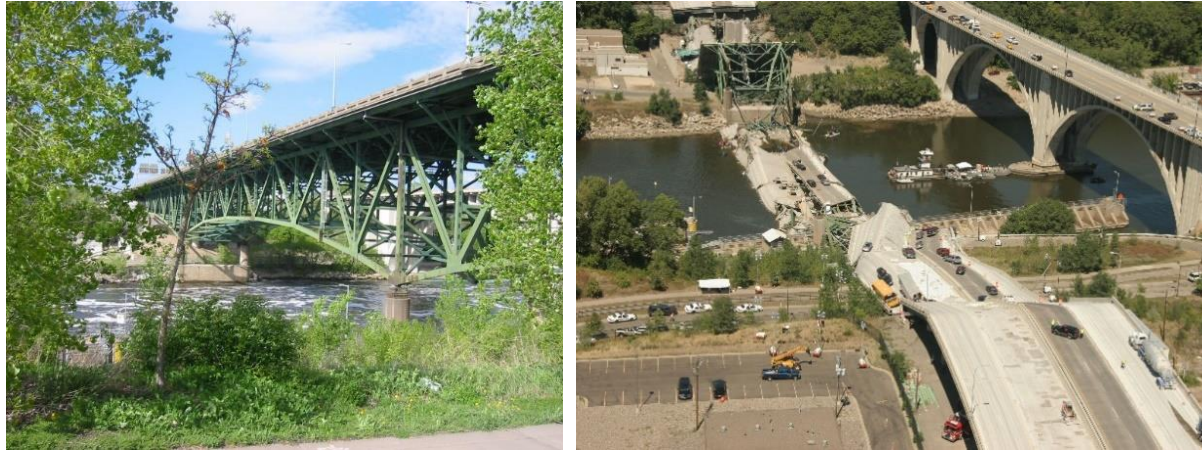


Figura 48 - Ponte I-35 W sobre o rio Mississippi, antes e depois do colapso (National Transportation Safety Board, 2007)

Assim, neste capítulo pretende-se abordar o que é feito em termos de gestão das obras de arte como pontes nos EUA e em Portugal, tendo em conta as respetivas histórias da gestão de pontes e a implementação dos respetivos sistemas de gestão de obras de arte usados nesses países. Para tal, este capítulo é constituído por seis subcapítulos, incluindo o presente. O segundo subcapítulo pretende abordar de forma sucinta a história da gestão das pontes nos EUA bem como o estado de conservação das mesmas. No terceiro subcapítulo, faz-se menção da história da gestão de obras de arte em Portugal. Em seguida, no quarto subcapítulo aborda a implementação de um sistema de gestão de obras de arte nos principais donos de obra de rede viária. Finalmente, no quinto e último subcapítulo são feitas as considerações finais.

2.2 História da gestão de pontes nos Estados Unidos da América

Nos EUA, a preocupação com segurança e manutenção das pontes existentes surge no final dos anos sessenta, quando a Silver Bridge construída em 1928 sobre o rio Ohio em Point Pleasant, West Virgínia (Figura 49), colapsou subitamente durante a hora de ponta (Figura 50), a 15 de dezembro de 1967 resultando na morte de 46 pessoas (FHWA, 2012) (Figueiredo, et al, 2013). Esta ponte tinha particularidade de cada cabo ser constituído por com um conjunto de barras de olhal (literatura inglesa *eyebars*). De uma forma geral, o colapso desta ponte foi associado a deficiências do projeto e falta de inspeção (Salasky, 2013).

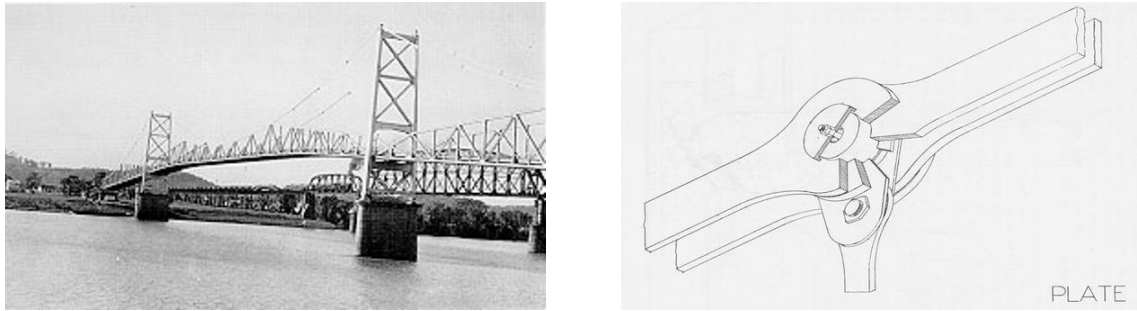


Figura 49 - (a) Silver Bridge sobre rio Ohio. (b) Detalhe típico de uma corrente de “eyebars” (Wikipédia, 2017) (Salasky, 2013)

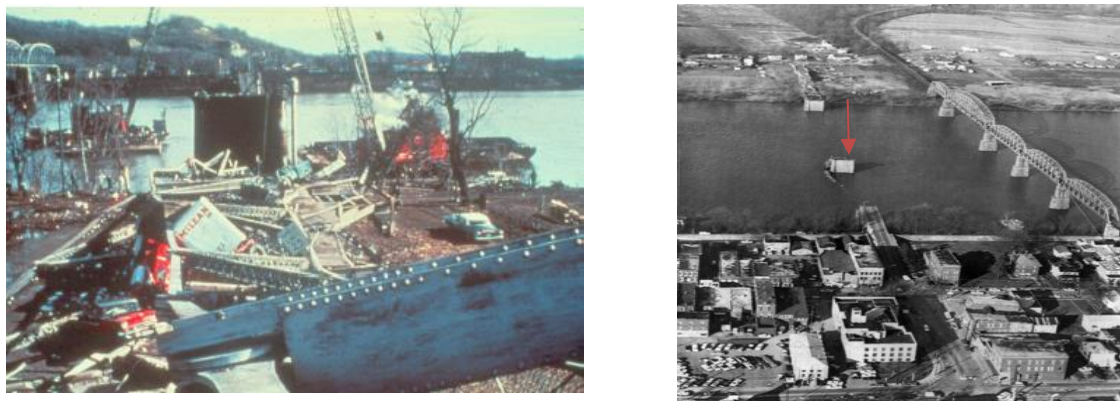


Figura 50 - Colapso da Silver Bridge em 1967 (FHWA, 2012) (Salasky, 2013)

Esta catástrofe motivou a Federal Highway Administration (FHWA), que é uma agência dentro do Departamento de Transportes nos EUA que apoia estados e governos locais na conceção, construção e manutenção do sistema rodoviário nacional, a estabelecer o programa nacional de inspeção de pontes denominado de *National Bridge Inspection Program* em 1970, que reconheceu a necessidade da realização de inspeções periódicas e consistentes às pontes. Este programa exigia que as pontes fossem inspecionadas de dois em dois anos e a criação de uma base de dados nacional do inventário de ponte, denominada de *National Bridge Inventory database*. Em 1971 foram desenvolvidas as primeiras normas nacionais de inspeções de pontes, intituladas de *National Bridge Inspection Standards* (NBIS) (FHWA, 2012). As NBIS estabeleciam normas nacionais referentes a:

- Procedimentos de inspeção;
- Frequência das inspeções;

- Qualificação dos inspetores;
- Relatórios de inspeção;
- Inventário de manutenção do estado das pontes.

Apesar dos esforços para inspecionar as pontes, em junho de 1983 a ponte sobre o rio Mianus, na I-95 em Connecticut, colapsou, causando três vítimas (Figura 51); este evento motivou uma preocupação acrescida relativamente à fadiga nas pontes (LPESA) (Figueiredo, et al, 2013).

Em 1987 e 1989, a erosão dos pilares que induziu os colapsos da ponte sobre o ribeiro Schorarie em Nova Iorque (Figura 52) e da ponte sobre o rio Hatchie em Tennessee (Figura 53), respetivamente, promoveu a necessidade de projetar pontes com pilares resistentes a erosões como também o início de um programa de inspeções subaquáticas (Figueiredo, et al, 2013) (FHWA, 2012) (LPESA).



Figura 51 - Colapso da ponte sobre rio Mianus (LPESA)



Figura 52 - Colapso da ponte sobre o ribeiro Schorarie (LPESA)



Figura 53 - Colapso da ponte sobre Hatchie (LPESA)

O início dos anos de 1990 representa o nascimento dos sistemas de gestão de pontes denominados de *Bridge Management System* (BMS); alguns pacotes de softwares foram desenvolvidos para auxiliar na gestão das pontes, como o PONTIS® (cujo nome deriva da palavra latina que significa ponte) e o BRIDGIT que foi desenvolvido, simultaneamente, pela National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) da Transportation Research Board (TRB) (Figueiredo, et al, 2013)(FHWA, 2012).

O Pontis é um software que auxilia os donos de obra na manutenção e operacionalidade das obras de arte rodoviárias ou ferroviárias, encontrando-se geralmente organizado nos seguintes módulos (Pericão, et al, 2013) (AASHTO, 2011):

- Inspeção (Inspection)

- Introdução de dados de inventariação e inspeção;
- Relatórios das inspeções anteriores;
- Planificação de novas inspeções;
- Recomendações dos inspetores.

- Planeamento de projetos (Project planning)

- Revisão e modificação das recomendações feitas pelo programa ou pelos inspetores;
- Ordenação de projetos prioritários;
- Elaboração de projetos baseados em restrições orçamentais e acompanhamento da evolução dos mesmos.

- Previsão (Programming)

- Desenvolvimento de modelos de deterioração de estruturas e de custos;
- Planificação a longo prazo de políticas de conservação (baseadas em estudos económicos e normas de cada agência);
- Identificação das necessidades atuais e futuras de manutenção e conservação;
- Avaliação de cenários alternativos de investimento (baseados no estado da estrutura, na sua performance e na relação custo-benefício).

- Conservação (Preservation)

- Simulação de modelos para determinar a solução ótima para as ações de manutenção, reparação e reabilitação de cada elemento da estrutura.

- Resultados

- Análise de gráficos, dos relatórios das inspeções e das necessidades de manutenção e beneficiação.

- Transferência de Dados: Importação e exportação de dados;

- Configuração: Ajustamento a novos utilizadores, adequação e modificação de parâmetros e informação.

Para além da avaliação estrutural ao nível das componentes da obra de arte, o PONTIS® atribui a obra de arte uma classificação de eficiência, denominada *Sufficiency Rating* (SR), resultante de um balanço e ponderação de quatro parâmetros distintos, nomeadamente: Adequabilidade e Segurança Estrutural (S1); Funcionalidade (S2); Utilidade Pública (S3); Reduções Extraordinárias (S4). Este índice de avaliação (SR), apresentado em percentagem, retrata a prioridade de intervenção de uma obra de arte e será tanto mais baixo, quanto menor for o nível de segurança e desempenho da estrutura; os valores variam entre 0% (absolutamente insuficiente ou ponte deficiente) e 100% (ponte absolutamente suficiente). Na análise deste índice é possível também identificar uma ponte estruturalmente deficiente e as funcionalmente obsoletas. Abaixo (Figura 54) é demonstrada a fórmula de obtenção do parâmetro SR da obra de arte (Pericão, et al, 2013) (Figueiredo, et al, 2013).

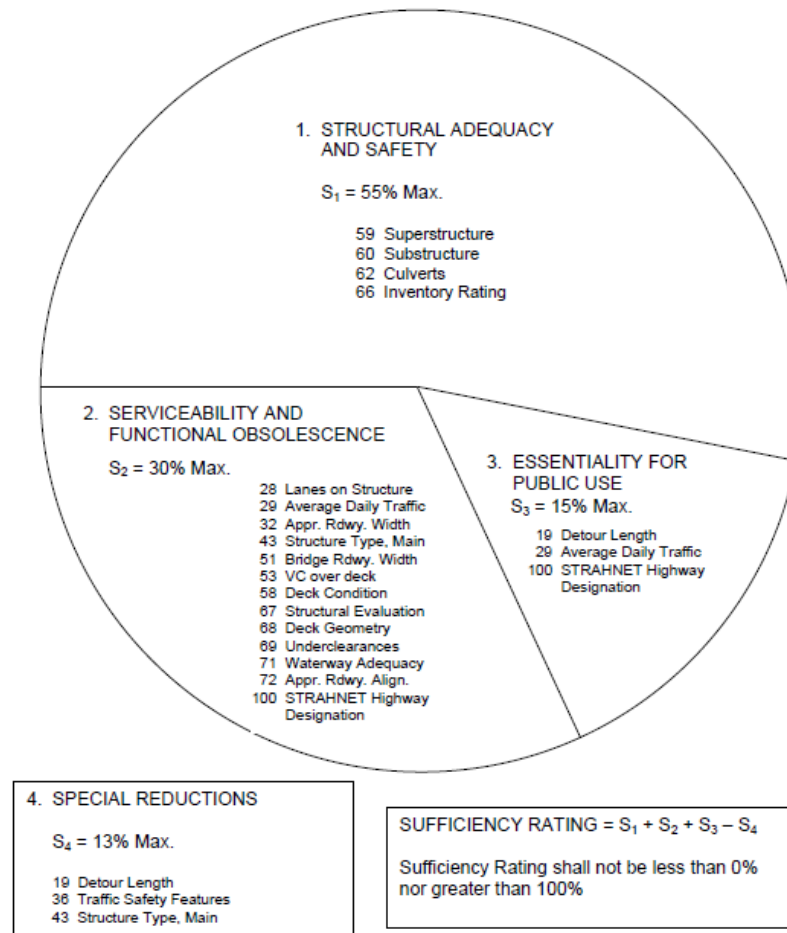


Figura 54 - Resumo da Classificação da Eficiência, SR (Nebraska Department of Roads, 2009)

Este sistema de gestão de obras de arte é usado por mais de 50 departamentos de transportes dos estados e outras agências dos EUA e no estrangeiro (Pericão, Martins, Feliciano, & Camuanho, 2013; AASHTO, 2011). Recomenda a manutenção para cada estrutura realizando uma análise custo-benefício, onde o benefício é calculado em função das poupanças feitas através da manutenção imediata comparada com o adiamento da manutenção feita em um ou dois anos (Figueiredo, et al, 2013).

Apesar do grande desenvolvimento que houve com o sistema de gestão de obras de arte, ocorreu o colapso da ponte I-35 W em 2007 durante a hora de ponta (Figura 55 (a)) (Figueiredo, Moldavan, & Marques, 2013). De acordo com dados disponibilizados em 2004, essa ponte tinha um tráfego médio diário de 141000 veículos, sendo que 5640 eram pesados (National Transportation Safety Board, 2007). Depois de uma exaustiva investigação, chegou-se à

conclusão que a causa do colapso da ponte I-35 W prendia-se com a inadequada capacidade de carga das placas *gusset* num dos nós (Figura 55 (b)), juntamente com o peso adicional na ponte causado por obras (Figueiredo, et al, 2013).



Figura 55 - (a) Ponte I-35 W Colapsada. (b) Exemplo de um nó da ponte I-35 W constituído por placas gusset. (National Transportation Safety Board, 2007)

O colapso da ponte I-35 W teve um impacto negativo sobre a economia na região, uma vez que esta ponte era diariamente utilizada por cerca de 141000 veículos, o que consequentemente afetou as empresas localizadas em Minneapolis devido a falta de fluxo de tráfego que se fazia sentir diariamente. Muitas pessoas deixaram de frequentar vários estabelecimentos que existiam na cidade e algumas empresas relataram perdas de receita na ordem dos 50%. E além disso ainda houve gastos relacionados com indemnizações para as pessoas presentes no dia do colapso da ponte.

Em 18 de setembro de 2008, foi inaugurada a ponte St. Anthony Falls, que veio substituir a antiga ponte I-35 W (Figura 56) (Branco, 2013).



Figura 56 - Nova ponte sobre o rio Mississippi, denominada de Ponte St. Anthony Falls (Branco, 2013)

2.2.1 Estado de conservação das pontes nos EUA

Em 2013, a FHWA declarou no seu inventário 607700 pontes, abrangendo pontes rurais com uma faixa que atravessam pequenas linhas de água e as pontes urbanas intraestatais com vários níveis (DoT, 2016).

Existem dois tipos de categorias de deficiência das pontes: estruturalmente deficiente e funcionalmente obsoleta.

Estruturalmente deficiente é o status que descreve uma ponte que tem um ou mais defeitos estruturais que necessitam de atenção, nomeadamente em termos de reparação ou substituição. Este status não indica a severidade do defeito, mas a presença de defeito.

Funcionalmente obsoleta é a categoria usada para descrever uma ponte que já não é considerada por projeto funcionalmente adequada para a sua tarefa. São pontes que frequentemente são carregadas com volumes de tráfego que excedem os seus limites de projeto e podem necessitar de serem ampliadas ou substituídas (Svrisky, 2016).

Muitas das pontes nos EUA encontram-se bastante envelhecidas, uma vez que neste país ocorreu o “boom” da construção nas décadas de 1950 e 1960 (FHWA, 2012). A Figura 57, obtida através de um estudo recente, permite analisar o número de quedas de ponte nos últimos anos, pelo que o EUA apresenta o maior número de queda de pontes.

De acordo o relatório anual estatístico de transportes de 2015 (DoT, 2016), num universo de 607700, cerca de 24,3% das pontes estão deficientes, dos quais 10,5% correspondem as pontes estruturalmente deficientes e 13,9% estão funcionalmente obsoletas (Figura 58).

A Figura 58 demonstra uma informação adicional das pontes deficientes divididas em grupos de idade, apesar de que só a idade não é um indicador automático da integridade estrutural. Por exemplo, a ponte de Brooklyn com 132 anos, devido à manutenção consistente e vários projetos principais de reabilitação, é ainda considerada como segura para uso diário; enquanto que a ponte já mencionada I-95, sobre rio Mianus colapsou em 1983 depois de 25 anos de serviço apenas.

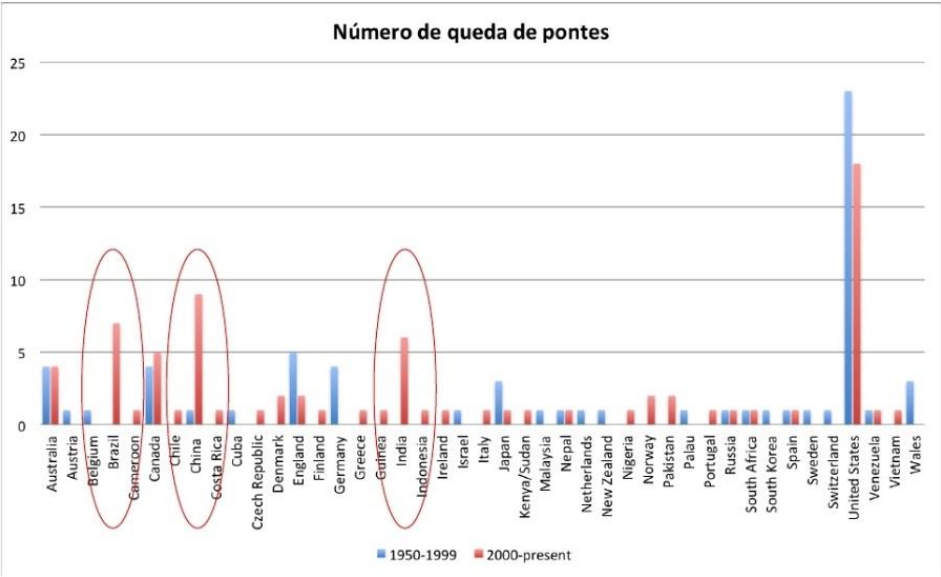


Figura 57 - Número de queda de pontes (Campos, Santos, Figueiredo, & Costa, 2016)

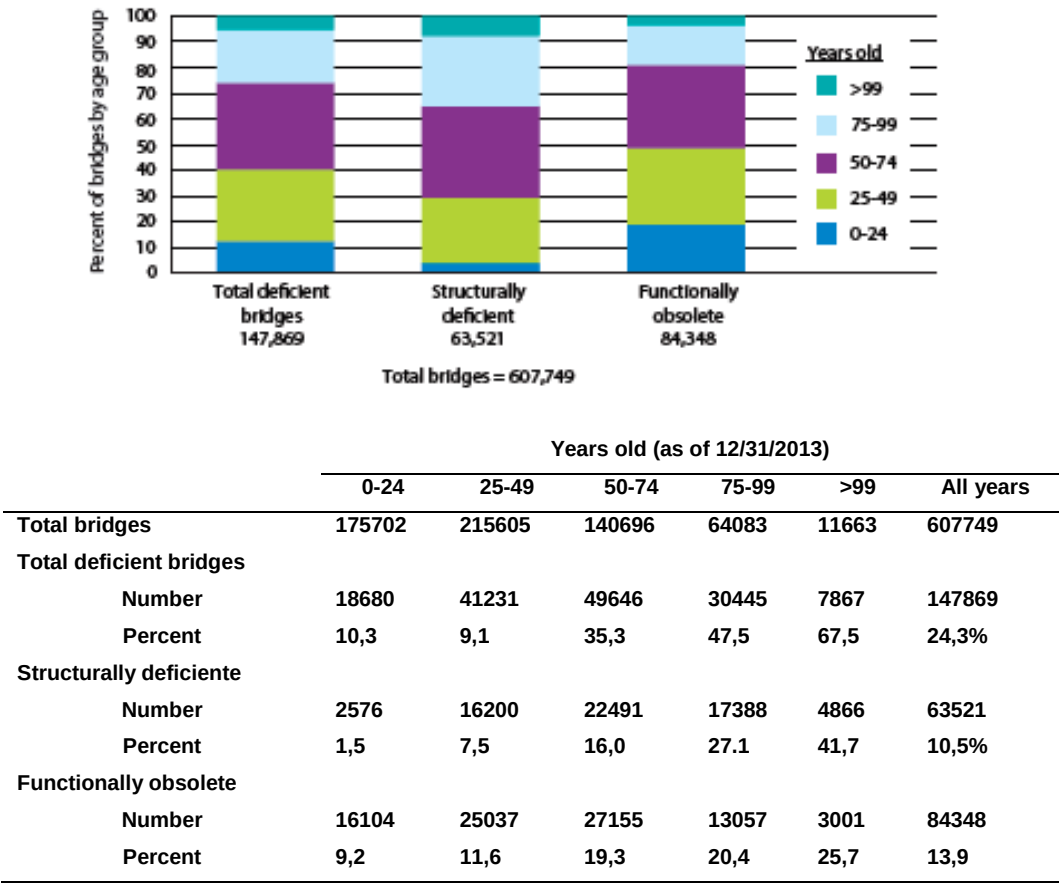


Figura 58 - Condição das pontes nos EUA por grupos de idade: 2013 (DoT, 2016)

A tendência, contudo, é clara, pois a probabilidade de uma ponte ser considerada deficiente aumenta com a idade da ponte. Cerca de 60% das pontes deficientes têm mais de 50 anos, e metade das pontes existentes com 75 anos ou mais são classificadas deficientes (DoT, 2016).

Até ao presente, as pontes nos EUA são geralmente avaliadas durante as inspeções bienais mandatadas federalmente, em grande parte com o uso de técnicas de inspeções visuais. Este tipo de procedimento é lento, não quantificável e partes das pontes são inacessíveis para tal inspeção visual. Há a possibilidade que danos na ponte não sejam detetáveis na inspeção ou fissuras nos elementos da ponte podem crescer a níveis críticos durante os intervalos de inspeções.

Este tipo de preocupação, tem levado à realização de estudos de abordagens quantitativas, possivelmente contínuas, de monitorização estrutural das pontes; como forma de reforçar e/ou substituir os métodos comuns de inspeção visual (Farrar & Worden, 2013).

2.3 História da gestão de pontes em Portugal

Por volta da década de 60, a Junta Autónoma de Estrada (JAE) que depois passou para Estradas de Portugal (EP) e posteriormente Infraestruturas de Portugal (IP), possuía quatro equipas de brigadas de pontes para as atividades de manutenção. Contudo, devido às várias mudanças internas efetuadas na empresa, deu-se o fim dessas brigadas e consequentemente as atividades de manutenção de pontes tornaram-se essencialmente reativas.

Até aos anos 90, nem todas as pontes eram inspecionadas regularmente. As que eram, especialmente as ferroviárias, eram feitas por técnicas especializadas, mas o sistema de gestão e controlo de informação era simplista. Os primeiros sistemas de gestão tinham falhas de informação significativas, devido ao facto de serem preenchidos manualmente. Além disso, esses sistemas não estavam preparados para interagir com programação financeira como também com as necessidades de toda rede de transporte.

Em 1994 a empresa Brisa deu o primeiro passo para a criação de um sistema de gestão de obras de arte, baseado num modelo assente numa base de dados e na atividade cíclica de inspeção de pontes, nomeadamente com o desenvolvimento do STONE.

Em 1995, assistiu-se, o início das inspeções periódicas, para estruturas importantes. Em 1997 dá-se o início do desenvolvimento de um sistema de gestão de obras de arte chamado GOA (Gestão de Obras de Arte) e em 1999 a Rede Ferroviária Nacional (REFER, EPE) implementou esse sistema.

No início do ano de 2000 foi lançado o Sistema de Gestão de Obras de Arte (SGOA), desenvolvido pela Betar Consultores Lda.

Contudo, a tragédia da Ponte Hintze Ribeiro em Entre-os-Rios, ocorrida no dia 4 de março de 2001, mostrou as deficiências que existiam na gestão de pontes realizadas em Portugal e marcou a mudança para uma nova era na gestão das mesmas. O colapso da ponte ocorreu depois de vários dias de chuva intensa, e consequente aumento do caudal do rio, quando um dos pilares colapsou resultando na queda parcial do tabuleiro, que arrastou um autocarro e três veículos. A Figura 59 ilustra a ponte dias após o colapso. Como resposta de emergência, de abril a junho do mesmo ano, o Instituto para a Conservação e Exploração da Rede Rodoviária (ICERR), lançou um programa para inspeções de emergência. Na sequência destas inspeções foram encerradas três pontes, foram introduzidas restrições à utilização de 56 e foram desenvolvidos 60 projetos de reforço estrutural. Entretanto, o ICERR e a REFER, EPE promoveram campanhas para inspeções subaquáticas (Figueiredo, et al, 2013).

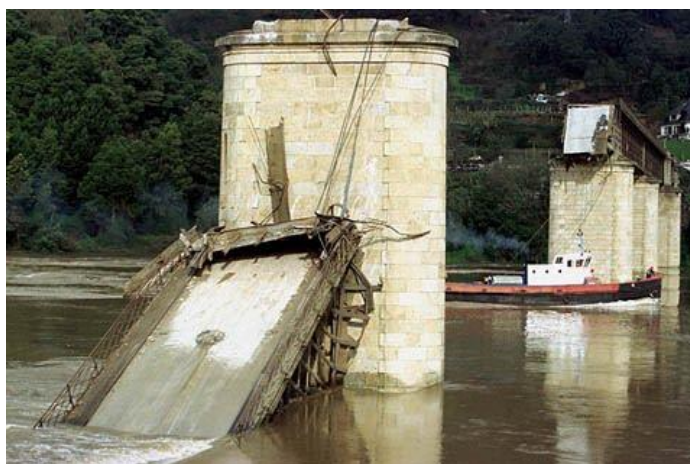


Figura 59 - Ponte Hintze Ribeiro no dia do colapso (Branco, 2013)

O colapso desta ponte representa o momento mais significativo em termos de conservação de pontes, pois isto impulsionou para que todas as autoridades portuguesas de

pontes a realização inspeções regulares em ponte, impulsionou também a necessidade da realização de inspeções aquáticas periódicas e adoção do SGOA pelos principais donos de obra.

O SGOA constitui uma ferramenta importante, pois permite ao Dono de Obra conhecer o estado de conservação e manutenção das obras de arte (pontes, viadutos, túneis, passagens hidráulicas, passagens agrícolas, etc), podendo assim tomar decisões relativamente à definição dos investimentos a realizar, priorizando-os de forma prudente. Este sistema foi desenvolvido e organizado de forma permitir a adaptação das necessidades dos diversos Donos de Obra; o sistema apresenta um conjunto de módulos que interagem entre si e nos quais a informação recolhida no campo está devidamente ordenada e catalogada (Mendonça, et al, 2013).

Os módulos do sistema completo são:

- Tabelas auxiliares;
- Gestão de permissões;
- Módulo de Inventário;
- Módulo de Inspeções Principais;
- Módulo de Inspeções de Rotina;
- Módulo de Inspeções Subaquáticas;
- Módulo de Batimetria;
- Módulo de Histórico;
- Módulo de Consultas;
- Módulo de Registo de Transportes Especiais;
- Módulo de Relatórios- Exportação em Lotes.

Inventário

O Inventário de uma obra de arte é o registo, de uma forma sistemática e organizada, das características dessa obra que possam servir de base ou interessar à sua manutenção e conservação. Consiste, fundamentalmente, na localização, identificação e descrição da ponte, de acordo com critérios preestabelecidos, de forma a obter uma base de dados documentada que permita, efetuar com eficiência, todos os procedimentos posteriores de gestão (Cruz, 2013).

Constitui o primeiro passo para a futura realização de todas as atividades de gestão de obras de arte. Deve, por isso, constituir a primeira atividade na implementação de um SGOA e ser efetuado quando é recebida uma nova obra, precedendo qualquer outro trabalho de Inspeção, Manutenção ou Reparação (Mendonça, et al, 2013).

Inspeção de pontes

As inspeções assumem uma importância crucial, dentro dos programas de conservação, uma vez que permitem obter os dados necessários para conhecer, em cada momento, o seu estado funcional, resistente e inclusivamente estético.

A manutenção e conservação de pontes baseiam-se, principalmente nos resultados obtidos nas atividades de inspeção (de inventário, de rotina, principais, especiais e subaquáticas) (Cruz, 2013).

Inspeção principal

Uma inspeção principal consiste em observar e registar as condições de funcionamento de uma ponte. Neste registo ficam identificadas as anomalias mais graves que comprometem o bom desempenho dos diversos componentes da obra de arte, quer a nível de durabilidade quer ao nível da segurança. Tem uma periodicidade de seis anos, podendo, entretanto, em alguns casos particulares ser inferior devido as características de uma determinada ponte.

Quando é verificada uma anomalia cuja causa, extensão ou gravidade se desconhece, deve ser requisitada a realização de uma **inspeção especial**, por forma a efetuar análises técnicas específicas que permitam um estudo detalhado dessa anomalia e propor o trabalho mais aconselhável para sua correção (Cruz, 2013).

Inspeção de rotina

Este tipo de inspeção destina-se a avaliar o estado de manutenção das obras de arte que traduz a boa ou má execução regular dos trabalhos de manutenção, e, em função disso, propor a realização de trabalhos de manutenção com o objetivo de garantir níveis de serviço e segurança adequados.

A manutenção de rotina consiste em limpezas e pequenas reparações, realizadas a intervalos determinados. O objetivo é manter e recuperar os diversos componentes, de forma a evitar a sua degradação acelerada. São exemplos desta atividade o aperto de porcas frouxas e a selagem de juntas de dilatação. Geralmente, têm uma periodicidade de dois anos. (Mendonça, Brito, & Milhazes, 2013)

Inspeção subaquática

Este tipo de inspeção tem um intervalo máximo de cinco anos; uma periodicidade de menor intervalo poderá ser definida em face do estado de conservação da obra ou da ocorrência de situações excecionais indicando alterações geométricas ou estruturais detetadas noutra tipo de inspeção.

As obras que necessitam de uma vigilância especial, pode ter um periodicidade inferior, como por exemplo nos seguintes casos: alterações significativas do leito do rio em resultado de modificações das condições hidráulicas do curso de água; fundações muito expostas à ação do escoamento (velocidade elevada, erosões significativas, etc.); construção de barragens a montante da ponte; existência de obras na zona de influência da ponte, que fazem temer uma evolução desfavorável para a estabilidade dos apoios (Cruz, 2013).

2.4 Implementação do SGOA pelos principais donos de obras de arte

Em Portugal existem dois principais donos de obras de arte, nomeadamente as Infraestruturas de Portugal (IP) e a Brisa.

Em seguida é referido como ambas as empresas implementaram o SGOA, desenvolvido pela Betar, bem como a sua adaptação a realidade de cada empresa.

2.4.1 Implementação do SGOA na empresa Infraestruturas de Portugal (vertente rodoviária)

A empresa pública Infraestruturas de Portugal (IP) é uma empresa que resulta da fusão entre a Estradas de Portugal (EP) e a Rede Ferroviária Nacional (REFER, E. P.E). Esta fusão foi reconhecida a 1 de junho de 2015, a partir do Decreto-Lei nº 91/2015 de 29 de maio.

Este subcapítulo aborda a implementação do SGOA na vertente rodoviária da IP, ou seja, antigamente EP.

O SGOA, foi contratado pela EP, no final de 2003. Foi implementado em 2006, mas a sua concretização efetiva, de acordo com os pressupostos base do SGOA, apenas foi possível em 2007, com conclusão do inventário e o início de campanhas de inspeção. Estas campanhas foram planeadas, com periodicidade de um a dois anos nas Inspeções de Rotina, e um máximo de seis anos nas Inspeções Principais e Subaquáticas (Horta & Freire, 2013).

O SGOA tem sido melhorado continuamente, de forma a enquadrar-se na realidade da empresa e atender a todos os desafios enfrentados (Amado J. , 2016).

A EP tem um modelo funcional que pode ser compreendido como três grandes grupos de atividades relativas à gestão da informação, nomeadamente inventário, histórico e inspeções, que determinam, definem e priorizam as necessidades de conservação e exploração, as quais, por sua vez, podem ser divididas em: (i) avaliação estrutural e conceção de projetos de execução; (ii) intervenções de reabilitação e manutenção; e (iii) ações de acompanhamento e monitorização.

As atividades de inspeções de rotina, subaquática, principal e vistorias, constituem o cerne deste modelo, na medida em que, do seu caráter periódico, resulta a programação das intervenções necessárias de manutenção e reparação ou reabilitação. As intervenções são priorizadas conforme a classificação obtida no âmbito de uma inspeção de rotina ou de uma inspeção principal efetuada. Numa inspeção de rotina obtém-se o estado de manutenção da obra de arte com classificações “Bom” ou “Mau” e numa inspeção principal obtém-se o Estado de Conservação (EC) cujas classificações variam entre 0 e 5, onde o EC5 representa a situação mais gravosa e EC0 representa uma condição excelente.

A condição pertencente aos estados de conservação EC4 e EC5 demanda, na maior parte dos casos, a elaboração de um projeto de intervenção. Enquanto ocorre a elaboração dos projetos e a concretização de intervenções, as obras de arte são acompanhadas por vistorias, cujo objetivo é a avaliação da evolução das suas principais anomalias e garantir condições de

segurança, como por exemplo restrições de tráfego, escoramentos provisórios ou incremento de observação e monitorização.

O registo e atualização da informação referente a cada obra de arte, ocorrem no inventário e no histórico. Para além do registo, planeamento e orçamento dos estudos e intervenções aprovados, são incluídos pedidos de inspeção principal realizados nas inspeções de rotina, os registos e relatórios da monitorização, cuja análise e interpretação pode conduzir à necessidade de inspeções não periódicas, extraordinária ou de dano, a verificação dos condicionamentos de exploração e o registo e validação dos trabalhos (Freire & Amado, 2014).

A Figura 60 ilustra a representação do modelo funcional da EP.

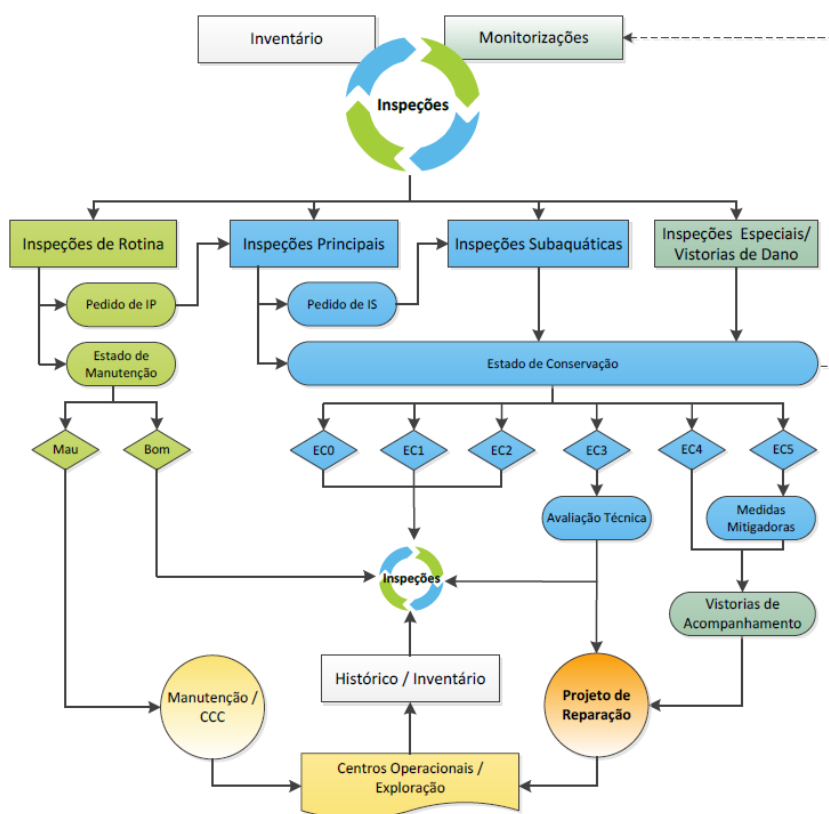


Figura 60 - Modelo Funcional do SGOA da EP (Freire & Amado, 2014)

Inventário

Foi inicialmente realizado, de modo simplificada, em 2005, tendo evoluído para formatação atual que possui apenas em 2007. É composto pelos dados técnicos (definição da tipologia da obra de arte), administrativos (localização, projetista, entidade construtora, dono de obra) e de constituição (materiais e equipamentos que a constituem) (Horta & Freire, 2013).

Inspeções principais

Estas inspeções têm uma periodicidade máxima de 6 anos, pelo que a primeira ronda por todas as Obras de Arte da empresa terminou no ano de 2011, o segundo ciclo iniciou-se em 2012.

A inspeção principal permite por avaliação da sua importância relativa, graduar com um indicador, designado do Estado de Conservação da Obra de Arte (EC) de cada componente e da Obra de Arte, a urgência da intervenção.

O EC é um indicador que, resultante da agregação de informação sobre a gravidade das anomalias verificadas nos diferentes elementos estruturais de uma obra de arte, determina a prioridade pela qual deve ser intervencionada, tendo em vista a correção das anomalias identificadas.

Para estados de conservação igual a quatro ou cinco, a IP intervém num período até 2 anos, pelo que para EC igual a cinco são implementados condicionamentos ou intervenções provisórias prioritárias, através da realização de vistorias de acompanhamento e/ou eventual necessidade de implementação de monitorização e restrições (carga, velocidade, etc). Para estados de conservação igual a três, a intervenção ou a reavaliação da condição das estruturas, decorre num período de cinco anos. Para os outros estados de conservação é somente feita uma nova avaliação do EC na próxima inspeção principal. (Horta & Freire, 2013; Freire & Amado, 2014)

A Tabela 2 sumariza as periodicidades das inspeções definidas pela EP, que por sua vez constituem três níveis de vigilância diferenciados para as obras de arte geridas pela empresa, conforme a classificação atribuída na inspeção anterior:

Tabela 2 - Periodicidade das inspeções principais associadas aos níveis de vigilância (adaptado de (Amado J. , 2016))

Vigilância normal	
EC0, EC1, EC2	Inspeção principal cada 6 anos
↓	
Vigilância reforçada	
EC3 ou elementos submersos	Inspeção principal cada 4 anos
↓	
Vigilância alta	
EC4, EC5	Inspeção principal cada 4 anos Vistorias de acompanhamentos anuais

Inspeções de rotina

As inspeções de rotina têm uma periodicidade bienal, permite realizar a avaliação do estado de manutenção. Se a estrutura tiver um estado de manutenção “Bom” não será necessário a realização de trabalhos de manutenção; para estado de manutenção “Mau” será necessário a realização de trabalhos de manutenção (Amado, 2015).

Inspeções subaquáticas

O SGOA, define 4 tipos de inspeções subaquáticas, que diferem entre si pelo nível de detalhe exigido ou ocorrência que motiva a sua necessidade.

Neste tipo de inspeção é realizada uma avaliação do EC dos elementos submersos e submersíveis das obras de arte, complementadas com registos videográficos destes elementos; como também é feita uma avaliação das características do leito e margens (Amado, 2015).

2.4.1.1 Estado de conservação das obras de arte na rede da Infraestruturas de Portugal (obras de arte rodoviárias)

De acordo com a informação recolhida até 31 de dezembro de 2014 pela EP, a percentagem de obras (incluindo pontes e outras obras de arte) classificadas com estados de conservação mais gravosos (EC4 e EC5) era de 1,80% da infraestrutura da empresa. Nesse mesmo período, a percentagem de obras de arte classificadas com EC3 era de 10,38%, conclui-

se que 87,82% das infraestruturas se encontram num estado de conservação que se pode definir entre Muito Bom a Bom, e, portanto, não necessitam de intervenções de reabilitação, tal como é ilustrado na Figura 61.

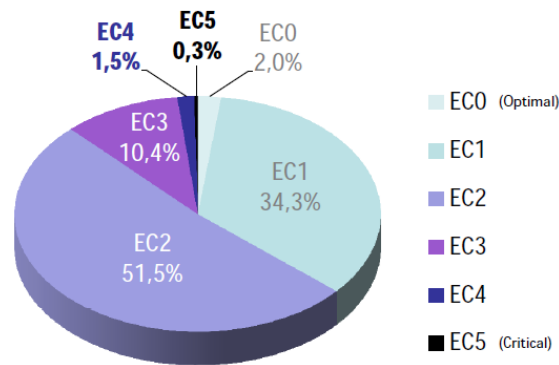


Figura 61 - Distribuição do estado de conservação do património de obras de arte da EP (Amado J. , 2016)

2.4.2 Implementação do SGOA pela empresa Brisa

A empresa Brisa foi fundada em 22 de novembro de 1972. Para além da rede principal, designada de Brisa Concessão Rodoviária, esta empresa tem mais cinco concessões, nomeadamente as concessões Brisa Autoestradas Litoral (Brisa), Autoestradas do Atlântico (AEA) e Autoestradas Douro Litoral (AEDL), e as subconcessões Autoestradas Baixo Tejo (AEBT) e Autoestradas Litoral Oeste (AELO).

Em 1994 ocorreu o início da atividade de gestão de obras de arte suportada num modelo assente numa base de dados e a atividade cíclica de inspeção de obras de arte. A base de dados usada foi o sistema italiano STONE; tratava-se de um sistema muito simples que permitiu a realização da primeira ronda sistematizada de inventariação e inspeção global da rede.

Em 2002, a Brisa adquiriu o sistema GOA, que ainda foi adaptado para a realidade da Brisa. Desde 2000, que a gestão de obras de arte tem sido realizada por um departamento específico, designado de Brisa Engenharia e Gestão (BEG), devido ao crescimento significativo da rede. Este departamento, que envolve atividades que compreendem a monitorização das infraestruturas, a avaliação global e a análise da necessidade de intervenção em função de

padrões de um estado de conservação de referência a observar, assume a gestão das obras de arte das concessões e subconcessões da Brisa.

Em 2008, o serviço de gestão de obras de arte da Brisa obteve a certificação de qualidade ISO 9001 (Barros, et al, 2013).

Como parte do contrato de concessão entre a Brisa e o estado português existe o Plano de Controlo de Qualidade (PCQ). Este plano permite que a Brisa mantenha um padrão para a classificação da condição de cada obra de arte, bem como para toda a rede (Figueiredo, et al, 2013).

Um Manual de Inspeção foi especialmente desenvolvido pela Brisa, que define um procedimento comum a ser levado pelos inspetores, bem como as regras de inspeções de obras de arte. A inspeção de cada obra de arte acaba com um relatório, que é usado para identificar danos locais bem como classificar o impacto dos mesmos nas componentes da ponte através da avaliação da condição da ponte.

A observação contínua das pontes também é baseada nas quatro categorias de inspeção mencionadas no subcapítulo 2.3.

O inventário abrange o registo do inventário constituído por dados administrativos, técnicos e de constituição bem como esquemas e desenhos; dados históricos e dados de inspeção.

As inspeções de rotina são responsáveis para despoletar as atividades de manutenção. Têm uma periodicidade bienal. As inspeções principais e subaquáticas servem para desencadear as ações de reparação e reabilitação. As inspeções especiais ou extraordinárias são requisitadas em caso de acidentes ou eventos naturais.

A periodicidade das inspeções principais é de quatro anos para obras de arte correntes e seis anos para estruturas especiais (pontes, viadutos e túneis).

A avaliação do estado da obra de arte é feita usando um sistema com base no componente, isto é, os componentes são inspecionados e classificados de zero a cinco (Tabela 3), bem como a obra de arte (Tabela 4), onde zero é considerado “excelente” e cinco é “mau”.

O procedimento interno da Brisa determina que: (i) classificação da condição menor que três- não é necessária qualquer ação; (ii) classificação da condição maior ou igual que três- é necessário implementar uma ação (plano de observação, reparações locais, reparação global) (Figueiredo, et al, 2013).

Tabela 3 - Avaliação dos componentes (Barros, 2013)

Avaliação	Descrição
0	Sem anomalias
1	Anomalias sem evolução
2	Anomalias que podem evoluir
3	Anomalias com evolução
4	Anomalias que podem afetar a durabilidade da obra
5	Anomalias que podem afetar a segurança estrutural da obra

Tabela 4 - Avaliação do componente- obra de arte (Barros, 2013)

Avaliação	Descrição
0	Sem anomalias nos componentes principais- Não requer a implementação de qualquer ação
1	Anomalias sem evolução- Não requer a implementação de qualquer ação
2	Anomalias que podem evoluir- Não requer a implementação de qualquer ação
3	Anomalias com evolução- Plano de avaliação/ Implementação de ação no prazo de 1 ano
4	Anomalias que podem afetar a durabilidade da obra- Plano de avaliação/ Implementação de ação no prazo de 6 meses
5	Anomalias que podem afetar a segurança estrutural da obra- plano de intervenção no prazo de 1 mês; eventuais restrições ao tráfego

2.4.2.1 Estado global das obras de arte da rede Brisa

O estado global das obras de arte da rede Brisa apresenta-se da seguinte forma:

- 25 % tem classificação “0”
- 51% tem classificação “1”
- 17% tem classificação “2”
- 7 % necessitam de intervenção, nomeadamente obras de arte com classificação “3” a “5”.

As intervenções têm sido caracterizadas têm sido por reabilitações locais/reabilitações pontuais, reabilitações/reforços gerais e alargamentos, nas pontes existentes (Figueiredo, et al, 2013).

2.5 Considerações finais

A avaliação permanente ou temporária das pontes tem sido impulsionada por eventos catastróficos, como por exemplo os colapsos das pontes I-35 W nos EUA e Hintze Ribeiro em Portugal.

Nos EUA, a preocupação com a deterioração e segurança das pontes, surge na década de sessenta, com o colapso da ponte denominada de Silver Bridge e que resultou na morte de 46 pessoas. Este evento despertou o interesse nacional na segurança, inspeção e manutenção das pontes. Em 1971 foram desenvolvidas as NBIS, que estabelecem as normas relativas a inspeção de pontes. No início da década de 1990 foram desenvolvidos sistemas de gestão de pontes como o Pontis e o Bridgit. O Pontis é usado por mais 50 agências nos EUA e no estrangeiro. Apesar do esforço que houve para desenvolver este sistema, em agosto de 2007 a ponte I-35 W colapsou na hora de ponta resultando na morte de 13 pessoas. Atualmente a FHWA declarou no seu inventário 607700 pontes, dois quais 24,3% encontram-se estruturalmente deficientes. O “boom” da construção nos EUA ocorreu entre 1950 e 1960 e por isso existe, uma deterioração significativa das suas pontes e um número elevado de colapsos.

Em Portugal o colapso da ponte Hintze Ribeiro em 2001, impulsionou as autoridades portuguesas para a realização de inspeções periódicas, como também a realização de inspeções subaquáticas. No início de 2000 foi desenvolvido o SGOA, que tem sido utilizado e adaptado pelos principais donos de obras, de acordo com a realidade das respetivas empresas.

A implementação efetiva do SGOA, na EP, atualmente IP, ocorreu 2007, através de um modelo funcional desenvolvido na empresa. De acordo com as informações recolhidas no final de 2014, grande parte das suas obras de arte está classificada com EC que se pode definir entre “Muito Bom e Bom”.

Já na empresa Brisa, o SGOA foi implementado em 2002. A maior parte das suas obras de arte não requer implementação de qualquer ação, pois as mesmas são mais recentes em relação as obras de arte da IP.

Capítulo 3

Monitorização da integridade estrutural

3.1 Considerações gerais

Todas as estruturas, incluindo infraestruturas, como as pontes, deterioram com tempo devido a várias razões como por exemplo fadiga causada por cargas de tráfego repetitivas, efeitos das condições ambientais, e eventos extremos como sismos. Esta deterioração pode ser detetada por inspeções de rotina ou inspeções especiais baseadas em eventos críticos. Alternativamente, de forma a reduzir a intervenção humana em atividades de inspeção, a monitorização contínua da estrutura pode providenciar uma avaliação das alterações em função do tempo e fornecer um aviso antecipado da condição danificada, usando dados em tempo real (Abdo, 2014).

O processo de implementação de uma estratégia de deteção de danos, em infraestruturas aeroespaciais, civis e mecânicas é referido como Monitorização da Integridade Estrutural (SHM), de forma a melhorar a segurança e fiabilidade dessas infraestruturas. Este processo envolve a observação da estrutura durante um certo período de tempo usando medições recolhidas por sistemas de monitorização, a extração de características dessas medições, e a análise dessas características para determinar o estado corrente do sistema estrutural (Farrar & Worden, 2007; Farrar & Worden, 2013).

O presente capítulo está dividido em oito subcapítulos, incluindo estas considerações gerais. No segundo subcapítulo é abordado uma perspectiva histórica da Monitorização da Integridade Estrutural (SHM). De seguida, no terceiro subcapítulo é descrita a analogia que se tem feito sobre o conceito de sistemas de SHM em relação ao ser humano. No quarto subcapítulo é descrito o paradigma de reconhecimento de padrões, bem como duas abordagens de algoritmos de aprendizagem automática. O quinto subcapítulo aborda de uma forma muito sucinta e genérica os componentes e tipos de sistemas da SHM. Os subcapítulos seis e sete demonstram exemplo de monitorização contínua em Portugal e em Angola, respetivamente. Por fim, no último subcapítulo são feitas conclusões em forma de considerações finais.

3.2 Perspetiva histórica da Monitorização da Integridade Estrutural (SHM)

Há várias décadas que a deteção de danos é realizada com base em métodos de inspeção visual, com aplicação ocasional de técnicas convencionais de testes não destrutivos tais como ultrassons e emissão acústica. Nos últimos 40 anos, os métodos para deteção de danos baseados em vibrações têm recebido uma atenção considerável.

A aplicação melhor sucedida até aos dias de hoje sobre métodos de deteção de danos, baseados em vibrações, tem sido relatada em máquinas rotativas.

A indústria aeroespacial foi a pioneira na transição da SHM da investigação para a prática, na variedade de utilizações civis e de defesas. No início dos anos 80, o desenvolvimento dos vaivéns espaciais motivou a comunidade aeronáutica a implementar métodos baseados em vibração. O sistema de inspeção modal do vaivém (*space shuttle*) foi desenvolvido para detetar dano e fadiga na fuselagem dos painéis, tipicamente coberto com um sistema de proteção térmica tornando a inspeção visual difícil. O sistema tem sido usado de forma bem-sucedida para detetar e localizar danos em componentes escondidos usando procedimentos analíticos e correlação modal.

Durante os anos 70 e 80, a indústria petrolífera também fez tentativas para detetar danos com base global em plataformas *offshore* usando métodos baseados em vibrações.

Assim, desde do início dos anos 80, a comunidade de engenharia civil tem investigado também a hipótese de aplicar nas pontes métodos baseados em vibrações para deteção de anomalias. Esses métodos eram fundamentalmente baseados em abordagens de modelação inversa, usando parâmetros modais assim como quantidades derivadas, tais como as curvaturas dos modos de vibração e uma matriz dinâmica de flexibilidade. Contudo, tais quantidades são vulneráveis, à variabilidade operacional e ambiental, pelo que aumenta as dificuldades para detetar danos em estruturas com grande escala (Figueiredo, 2010) (Farrar & Worden, 2007).

Nas últimas décadas a Monitorização da Integridade Estrutural (SHM), surgiu nas infraestruturas importantes, como as pontes e barragens, e tem tido uma aplicação cada vez mais alargada, na comunidade de Engenharia Civil (Brownjohn, 2007; Figueiras, 2008).

O conceito geral de SHM corresponde à verificação do desempenho das estruturas em serviço, baseada na medição de grandezas relevantes que permitem recolher informação sobre o estado atual da estrutura. As estruturas “vivas”, dotadas de sistema de monitorização incorporando diferentes tipos de sensores, têm surgido como uma solução potencial no diagnóstico precoce da deterioração estrutural (antes desta se tornar crítica), representando assim um instrumento poderoso na luta pela sustentabilidade das infraestruturas.

A monitorização da integridade estrutural pode ser definida como um método não destrutivo de avaliação estrutural *in situ* que utiliza vários sensores, aplicados à superfície ou embebidos na estrutura, que permitem medir diferentes grandezas de forma permanente ou temporária. Os dados recolhidos podem ser usados para a verificação da segurança, da integridade, da resistência, ou do desempenho da estrutura, e ainda para identificar possível dano no início da sua ocorrência (Figueiras, 2008).

A monitorização abrange geralmente um acompanhamento ininterrupto das estruturas no tempo, através de um sistema SHM e permanente, permitindo posteriormente a avaliação da integridade estrutural e assim apoiar o processo de tomada de decisão referente à realização de intervenções de reparação, ou reforço, eventualmente de substituição, bem como quanto à sua melhor calendarização.

Os sistemas de SHM são aplicáveis as estruturas tais como pontes, viadutos, túneis e barragens; que pelo seu volume, dimensão e pela sua importância, exigem um acompanhamento vigilante quer durante a fase construtiva quer após a sua entrada em serviço. Esta aplicação ainda abrange outras estruturas como edifícios e condutas (Figueiredo, 2006; Figueiras, 2008).

3.3 Analogia ao ser humano

A utilização da expressão SHM advém da analogia com o sistema nervoso do corpo humano (Figura 62). Da mesma maneira que um médico é solicitado para verificar a saúde de um paciente, um engenheiro tem de ser capaz de monitorizar a condição atual de uma dada estrutura. Um médico utiliza equipamentos próprios e especializados para detetar os sinais vitais de um paciente, de forma semelhante um engenheiro usa sensores especializados para recolher informação sobre o estado de “saúde” da estrutura. Se o paciente apresentar algum

problema é prescrito pelo médico um medicamento; igualmente nas aplicações de SHM, se for detetado pelos sensores deformações e tensões excessivas na estrutura, o engenheiro pode tomar medidas apropriadas para corrigir a situação.

A rotina de “check-ups” anuais na medicina representam uma forma preventiva de manutenção para os seres humanos e têm permitido a melhoria da saúde da população em geral. Futuramente, a SHM das infraestruturas funcionará de igual modo na rotina, e proporcionará informação atempada sobre a degradação estrutural, contribuindo assim para a manutenção eficaz do sistema de infraestruturas de um país (Figueiras, 2008).

Assim, a ideia básica do princípio de funcionamento da SHM é desenvolver um sistema similar ao corpo humano (Figura 63), onde o cérebro (computador) processa a informação e determina as ações (atividade de manutenção), e os nervos sentem a dor (dano). Pretende-se que o sistema de monitorização estrutural funcione como o sistema de monitorização do Ser Humano, quer ao nível da recolha de informação do meio ambiente quer ao nível do tratamento de dados (Figueiredo, 2006).

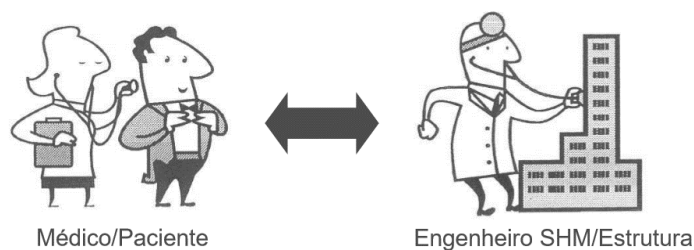


Figura 62 - Analogia de uma estrutura ao ser humano (Félix, 2010)

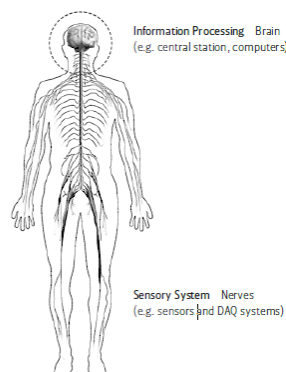


Figura 63 - Analogia de um SHM com o sistema nervoso humano (Figueiredo, et al, 2013)

O sistema nervoso trata as sensações recolhidas pelos terminais sensitivos (sensores), que posteriormente são transmitidas sob a forma de sinais elétricos ao sistema nervoso central (computador) através dos nervos sensitivos (cablagens), que após armazenamento e tratamento no cérebro a um nível superior, e a medula espinal a um nível inferior, elabora uma resposta que é transmitida aos órgãos motores, por exemplo os músculos (atuadores), através dos nervos motores (cablagens). A Tabela 5 demonstra a comparação entre o sistema nervoso do Ser Humano com um sistema de monitorização estrutural.

Tabela 5 - Correspondência ideológica entre o sistema nervoso do ser humano e um sistema de monitorização estrutural (Figueiredo, 2006)

Sistema Nervoso do Ser Humano	Sistema de Monitorização Estrutural
Corpo humano	Estrutura
Cérebro	Computador central
Médula espinal	Computador periférico/sistema de aquisição
Nervos	Cablagens
Órgãos sensoriais ou terminais sensitivos	Sensores
Órgãos motores (ex. músculos)	Atuadores

Uma boa parte dos elementos relativos à monitorização estrutural, referenciados na Tabela 5, encontram-se já em níveis avançados de desenvolvimento tecnológico. Todavia, ao nível do tratamento e análise dos dados no computador central e dos atuadores, ainda se tem assistido a vários desenvolvimentos na última década. Futuros desenvolvimentos estão muito dependentes do contexto tecnológico e científico.

Relativamente ao processamento e tratamento de dados, observa-se um desenvolvimento crescente nas técnicas de análise e a um ritmo mais acelerado do que propriamente nos atuadores. Tem havido tentativas em introduzir sensibilidade e inteligência a estes processos. Existem processos mais complexos e menos complexos que contribuem para a análise da integridade estrutural e identificação de danos. Neste âmbito têm sido propostos e desenvolvidos algoritmos inteligentes ao nível da inteligência computacional, que operam de maneira semelhante ao princípio de funcionamento do cérebro humano (Figueiredo, 2006).

3.4 Paradigma estatístico de reconhecimento de padrões para a SHM

A implementação completa dos sistemas de SHM ainda enfrenta alguns desafios, como os efeitos da variabilidade operacional e ambiental. Atualmente, na experimentação das infraestruturas, esses efeitos afetam na caracterização dos parâmetros estruturais e, conseqüentemente, na deteção estrutural de dano. Um dano, é definido neste contexto, como alterações dos materiais e/ou alterações nas propriedades geométricas do sistema estrutural, incluindo alterações nas condições fronteira e na conectividade do sistema, que afetam negativamente o desempenho atual ou futuro do sistema (Farrar & Worden, 2007).

(Figueiredo, 2010) acredita que todas as abordagens para SHM, como também todos os métodos de avaliação não destrutivos, podem ser colocados no contexto de um problema de paradigma de reconhecimento de padrões. Deste modo, o paradigma estatístico de reconhecimento de padrões (SPR – Statistical Pattern Recognition paradigm) para o desenvolvimento das soluções de SHM pode ser descrito num processo de quatro etapas (Farrar & Worden, 2006; Figueiredo, et al, 2013), como ilustrado na Figura 64:

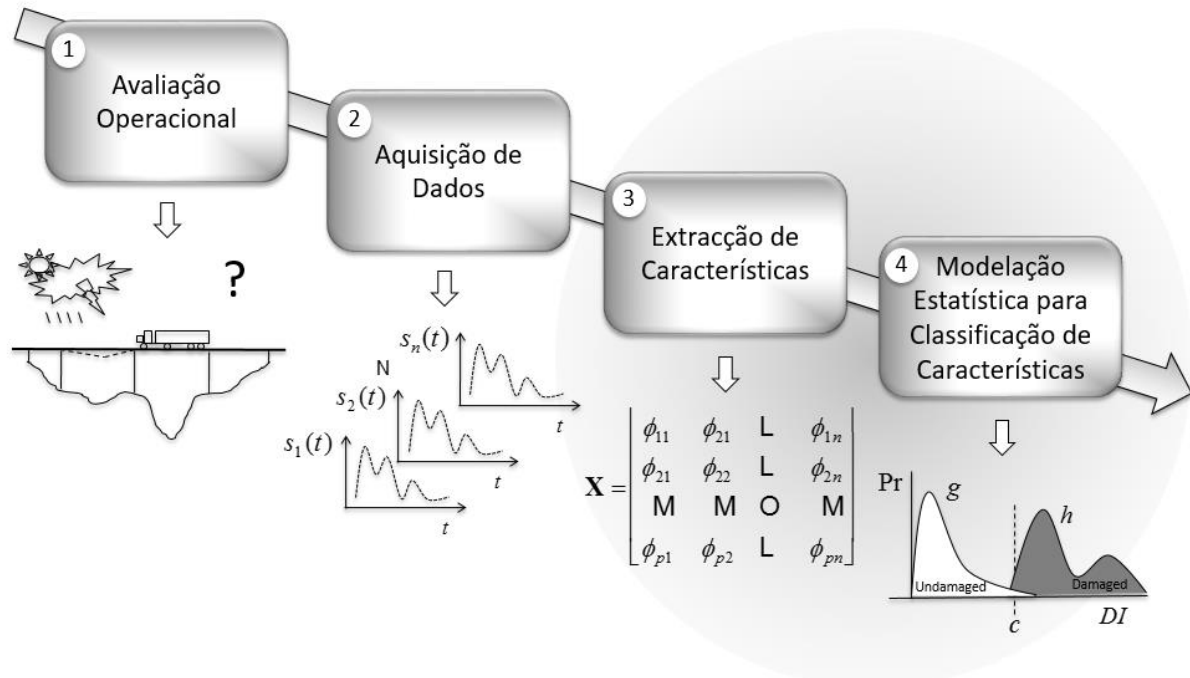


Figura 64 - Paradigma SPR para SHM (Figueiredo, 2013)

- (1) A **avaliação operacional** começa por estabelecer as limitações sobre o que será monitorizado e como a monitorização será realizada, bem como adaptar a monitorização aos aspetos específicos do sistema e às características singulares do dano a ser identificado. Também define os benefícios a serem adquiridos com a implementação de um sistema SHM.
- (2) A **aquisição de dados** do processo da SHM envolve a seleção de métodos de excitação, tipo de sensores, números e localizações, e um hardware de aquisição, armazenamento e transmissão de dados.
- (3) A parte que recebe maior atenção no processo da SHM, na literatura técnica, é a identificação das características dos dados que permite distinguir entre a estrutura danificada e não danificada.
- (4) A parte do processo de SHM que tem recebido a menor atenção na literatura técnica, é a do desenvolvimento de modelos estatísticos para a discriminação entre as características das estruturas não danificadas e danificadas. O desenvolvimento de um modelo estatístico está envolvido com a implementação de algoritmos que operam características extraídas para quantificar o estado de dano da estrutura.

No contexto das aplicações de SHM, o objetivo principal do paradigma SPR é reconhecer e distinguir entre padrões relacionados com a condição não danificada da estrutura sob influências operacionais e ambientais e aqueles associados na mesma estrutura sob a condição de danos, partindo das medições do sensor da estrutura monitorizada e terminando com a avaliação da condição estrutural atual.

O conceito de algoritmo de aprendizagem automática insere-se principalmente nas etapas três e quatro do paradigma SPR.

3.4.1 Algoritmos de aprendizagem automática

Ao longo dos últimos 15 anos têm sido propostos e testados algoritmos, que permitem eliminar os efeitos da variabilidade operacional e ambiental na deteção de danos. Por exemplo, vários estudos demonstram que a temperatura e o tráfego podem causar variabilidade diária nas

propriedades modais numa gama de 5-10%, que disfarçam as potenciais alterações causadas por dano (Figueiredo, 2010; Campos, et al, 2016).

O objetivo dos algoritmos de aprendizagem automática (*machine learning algorithms*) no SPR da SHM, é melhorar a deteção de danos na presença de diferentes condições operacionais e ambientais em que a resposta estrutural é medida. Estes algoritmos de aprendizagem automática tem um papel importante, uma vez que eles são treinados com dados já medidos, de forma semelhante ao cérebro humano. À medida que se fornece aos algoritmos dados recolhidos durante todos os cenários operacionais, esses algoritmos devem ser capazes de detetar anomalias ou padrões ocultos durante o funcionamento normal. Estes algoritmos também têm o potencial de simplificar dados e informações complexas em representações gráficas e índices simples. Dependentemente da formulação, alguns desses algoritmos são capazes de filtrar padrões lineares e não lineares e, por consequência, melhorar a caracterização dos parâmetros estruturais (Santos, et al, 2016).

Os algoritmos de aprendizagem automática podem ser divididos em duas categorias, nomeadamente, os algoritmos de aprendizagem não supervisionada e os algoritmos de aprendizagem supervisionada. De uma forma geral, na primeira categoria a aprendizagem é baseada apenas com dados da condição normal, isto é, provenientes de uma estrutura sem danos. A segunda categoria desenvolve um modelo previsível baseado com dados de condição normal e de condição de dano (MathWorks, 2014).

Basicamente, no contexto de SHM, a aprendizagem supervisionada refere-se ao caso em que os dados da condição normal e da condição com dano estão disponíveis para treinar os algoritmos. Quando aplicados numa forma supervisionada e acoplados com modelos numéricos, os algoritmos podem ser usados para uma melhor determinação do tipo de dano, a severidade do dano, e a vida útil restante. Já a aprendizagem não supervisionada refere-se ao caso onde os dados treinados disponíveis são os da condição normal. Quando aplicados de forma não supervisionada, os algoritmos de aprendizagem automática são tipicamente usados para responder a questões relacionadas com a deteção, localização e a evolução limitada da severidade do dano. É importante realçar que para estruturas com capital investido, como a maior parte da infraestruturas, os algoritmos de aprendizagem não supervisionada são

frequentemente solicitados porque normalmente só estão disponíveis os dados da condição normal (Farrar & Worden, 2013) (Figueiredo, et al, 2013).

Apesar dos algoritmos possuírem diferentes formulações matemáticas subjacentes, eles são implementados numa sequência comum de passos: (i) primeiro, cada algoritmo é treinado e os seus parâmetros são ajustados usando vetores de características extraídos da condição normal, isto é, séries cronológicas de dados recolhidos sob diferentes condições ambientais e operacionais quando se assume que a estrutura está sem danos; (ii) segundo, na fase de teste todos os algoritmos de aprendizagem automática (exceto a distância Quadrada de Mahalanobis baseados numa só dimensão) transformaram cada vetor característica de entrada em um vetor característica de saída numa só dimensão.

Todos os algoritmos pressupõem uma matriz de treino dos vetores de características extraídos da condição normal, $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{m \times n}$, onde m são as diferentes condições operacionais e ambientais e n são os vetores de características dimensionais, e a matriz de teste $\mathbf{Z} \in \mathbb{R}^{m \times k}$, onde k é o número de vetores de características extraídos potencialmente da condição danificada (Figueiredo, 2010).

Os modelos estatísticos são elaborados de forma a minimizar as indicações de danos. Os diagnósticos falsos repartem-se em duas categorias: (i) falso-positivo (o sistema de monitorização indica presença de dano quando o mesmo não existe, ou seja, indica um dano na condição normal) e (ii) falso-negativo (o sistema de monitorização não indica de dano quando o mesmo existe efetivamente, ou seja, indica uma condição normal na condição danificada) (Farrar & Worden, 2013).

Nesta dissertação são referidas duas das abordagens de algoritmos de aprendizagem automática, nomeadamente, a distância quadrada de Mahalanobis designada na literatura inglesa por *Mahalanobis Squared Distance* (MSD) e a Análise Linear das Componentes Principais denominada de *Principal Component Analysis* (PCA).

Distância quadrada de Mahalanobis (MSD)

A distância MSD, introduzida em 1936 por Prasanta Mahalanobis, é uma medida da distância entre um ponto e uma distribuição; ela difere da distância Euclidiana porque tem em conta a correlação entre as variáveis e não depende da escala das características (observações). A distância tem sido usada em SHM em análises de agrupamentos e técnicas de classificação (Figueiredo, 2010) (Pereira, 2012).

Alguns autores (Worden, Manson, & Fieller, 2000) têm utilizado a MSD para detetar *outliers*, também designados por observações atípicas. Considerando uma matriz de treino $X \in \mathbb{R}^{n \times m}$, com vetor da média, μ , e matriz de covariância, Σ , a MSD, ou índice de dano (ID) no contexto deste trabalho, entre as observações da matriz de treino e uma observação, $\mathbf{z}$, da matriz de teste $\mathbf{Z} \in \mathbb{R}^{l \times m}$, é definido por

$$ID = (\mathbf{z} - \mu)^T \Sigma^{-1} (\mathbf{z} - \mu) \quad (1)$$

Este algoritmo baseia-se no pressuposto de que se uma nova observação de teste, $\mathbf{z}$, é obtida de uma estrutura danificada, mesmo sob o efeito da variabilidade operacional e ambiental, a observação estará longe da média ponderada e o ID será atípico. Por outro lado, se a observação $\mathbf{z}$ é obtida de uma estrutura não danificada, mesmo sujeita a variações operacionais e ambientais, ela estará próxima da média ponderada da condição normal e o ID será residual.

Para classificação estatística de observações, assume-se que: se uma observação, $\mathbf{z}$, é extraída de uma estrutura não danificada e segue uma distribuição Gaussiana, então o seu ID seguirá uma distribuição Chi-quadrada com m graus de liberdade, $ID \sim \chi_m^2$. Portanto, *outliers* ou observações atípicas podem, simplesmente, serem definidos como observações que têm ID acima de um certo nível de confiança ou limiar.

Análise de componentes principais (PCA)

A PCA foi introduzida por Karl Pearson em 1901, contudo foi graças ao trabalho de Hotteling, em 1930 que este método teve um tratamento formal.

A PCA é um método de estatística clássica para transformar observações multidimensionais do espaço original para um espaço de menor dimensão (espaço de características) com a perda mínima de informação (Figueiredo, 2010) (Farrar & Worden, 2013). Basicamente, a matriz de aprendizagem, $\mathbf{X}$, pode ser decomposta na forma de:

$$\mathbf{X} = \mathbf{T}\mathbf{U}^T, \quad (2)$$

Onde:

$\mathbf{T}$ - é conhecida pela matriz de *scores*;

$\mathbf{U}$ - é uma matriz com m vetores ortogonais, $\mathbf{u}_i$, também conhecida pela matriz de *loadings*.

Os vetores ortogonais podem ser obtidos decompondo a matriz de covariância de $\mathbf{X}$ na forma de $\Sigma = \mathbf{U}\Lambda\mathbf{U}^T$, onde Λ é uma matriz diagonal que contém autovalores λ_i , e $\mathbf{U}$ é uma matriz que contém os correspondentes autovetores. Os autovetores, associados com os autovalores mais elevados, são as componentes principais, da matriz das observações, e correspondem às dimensões que possuem maior variabilidade. Basicamente, esta técnica permite executar uma transformação linear retendo apenas os autovetores mais significativos d ($\leq m$), também conhecido como componentes principais. Assim, escolhendo os primeiros d autovetores, a matriz $\mathbf{X}$ pode ser formulada da seguinte forma sem perda significativa de informação:

$$\mathbf{X} = \mathbf{T}_d\mathbf{U}_d^T + \mathbf{E}, \quad (3)$$

Onde:

$\mathbf{T}$ - é conhecida pela matriz de *scores*;

$\mathbf{U}$ - é uma matriz com m vetores ortogonais, $\mathbf{u}_i$, também conhecida pela matriz de *loadings*.

Assim, no contexto de deteção de dano, o algoritmo baseado na PCA pode ser resumido da seguinte forma: (i) a matriz $\mathbf{U}$ é obtida a partir da matriz de aprendizagem $\mathbf{X}$, (ii) a matriz de

teste $\mathbf{Z}$ é transformada para o espaço das características e depois reconvertida para o espaço original usando apenas os d componentes mais significativos, (iii) a matriz dos resíduos da matriz $\mathbf{Z}$, $\mathbf{E}$, é obtida através da diferença entre a matriz original e reconstruída, e finalmente, (iv) os ID são calculados usando a MSD sobre os resíduos:

$$\mathbf{E} = \mathbf{Z} - (\mathbf{Z}\mathbf{U}_d)\mathbf{U}_d^T, \quad (4)$$

Esta aproximação assume que os resíduos são distribuídos segundo uma distribuição Gaussiana para a condição não danificada.

3.5 Componentes e tipos de sistemas de SHM

Apesar dos detalhes específicos de um sistema de monitorização possam variar substancialmente, um sistema moderno de SHM deve incluir tipicamente as cinco componentes seguintes: i) Sistema de sensores e aquisição de dados; ii) Comunicação de dados; iii) Processamento inteligente, armazenamento e gestão de dados; iv) Diagnóstico e interpretação da resposta estrutural; v) Acesso à informação relevante para a tomada de decisão. A Figura 65 ilustra uma representação sinóptica de um sistema típico de monitorização estrutural (Figueiras, 2008).

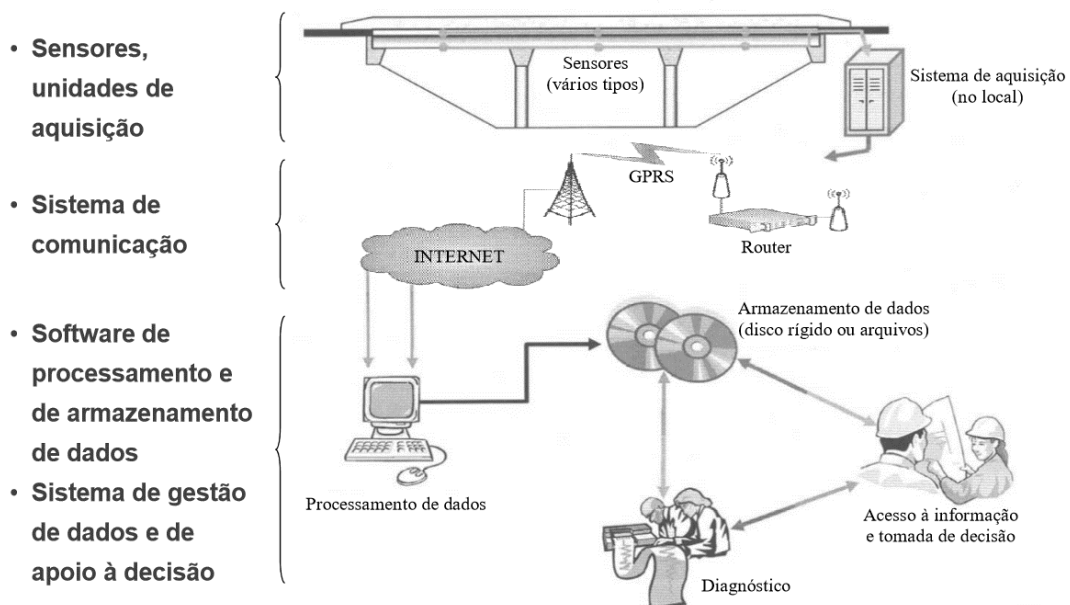


Figura 65 - Componentes de um sistema SHM (Félix, 2010)

A monitorização da integridade estrutural pode ser classificada numa das seguintes quatro categorias: ensaios estáticos, ensaios dinâmicos, monitorização periódica e monitorização contínua. Estas categorias, que se podem repartir em diferentes subtipos como indicado na Figura 66, diferenciam-se pelo tipo de ação que as estruturas são sujeitas, quer em termos da frequência da medição das grandezas físicas, quer no que diz respeito à escala temporal para recolha dos dados.

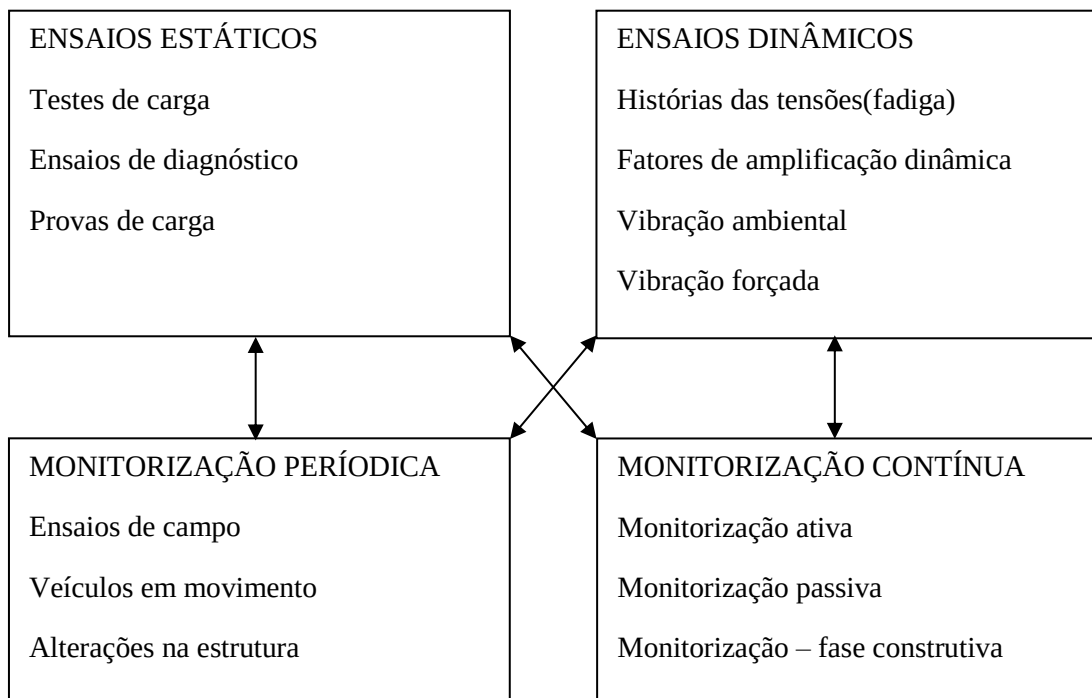


Figura 66 - Categorias da monitorização da integridade estrutural (Figueiras, 2008)

Por mais de 40 anos, vários sistemas de monitorização têm sido instalados em várias pontes em todo mundo. Contudo, nas duas últimas décadas, o número de sistemas SHM instalados em pontes tem aumentado consideravelmente. Os EUA e a China têm tido um papel importante na comunidade SHM. Os EUA têm sido a força motriz no desenvolvimento da tecnologia de deteção e aquisição de dados, enquanto que a China levou a implementação da tecnologia SHM ao mundo real das infraestruturas (Figueiredo, 2010).

3.6 Exemplos de sistemas de monitorização contínua em Portugal

Em Portugal, existem algumas pontes que estão a ser monitorizadas continuamente. A Tabela 6 faz referência a algumas pontes que são monitorizadas. É importante realçar que a monitorização da ponte não implica necessariamente a SHM, uma vez que o sistema pode não estar integrando como uma estratégia de deteção de danos.

Tabela 6 - Sistemas de monitorização a longo prazo em Portugal (adaptado de Figueiredo, et al, 2013)

Ano de construção	Nome da Ponte	Tipo de estrutura	Localização	Vão principal	Tipo de sensores instalados	Número de sensores
1966	Ponte 25 de Abril	Suspensa	Lisboa	1013	1-5, 14, 19	160
1975	Ponte Barra	Vão contínuo	Aveiro	80	2, 8	74
1982	Ponte Edgar Cardoso	Atirantada	Figueira da Foz	225	2, 8	105
1991	Ponte internacional sobre o rio Guadiana	Atirantada	Castro Marim	324	2, 3, 5, 11, 12, 19	80
1991	Ponte Arade	Atirantada	Portimão	256	2, 3, 11, 19	100
1991	Ponte São João	Pórtico	Porto	250	2(73), 3(118), 5(18), 11(4), 19(4)	217
1992	Ponte internacional de Valença	Vão contínuo em viga-caixão	Valença	170	2, 3, 11, 19	105
1992	Ponte Alcácer do Sal*	Vão contínuo em viga-caixão	Alcácer do Sal	85	2, 3, 11, 19	80
1994	Ponte Angueira*	Vão contínuo em viga-caixão	Algoso	115	2, 3, 11, 19	70
1995	Ponte Freixo	Vão contínuo em viga-caixão	Porto	150	2, 3, 11, 19	175
1997	Ponte Miguel Torga	Pórtico	Peso da Régua	180	2(35), 3(69), 11(2), 17(1), 19(4)	111
1998	Ponte Ermida	Vão contínuo em viga-caixão	Resende	140	2, 3, 11, 19	50
2000	Ponte Salgueiro Maia	Atirantada	Santarém	246	2, 3, 5, 11, 19	170
2003	Ponte Infante Dom Henrique	Arco	Porto	280	2(8), 3(16), 4(12), 11(8)	44
2004	Ponte Rainha Santa Isabel	Atirantada	Coimbra	186	2, 3, 11, 19	85
2007	Ponte Lezíria	Vão contínuo em viga-caixão	Carregado	130	2(108), 3(212), 4(20), 5(2), 8(15), 10(47), 11(9), 16(8), 19(20), 21(2)	443

*Sistema inativo

1-anemómetros; 2- sensores de temperatura; 3-medidores de tensão; 4-acelerómetros; 5- transdutor de deslocamentos; 6- sistema global de posicionamento (GPS); 7- sistemas de pesagem em movimento; 8- sensores de corrosão; 9- sensores elasto magnético; 10- sensores de fibra ótica; 11- inclinómetros; 12- sensores de nível-, 13- estações totais; 14- sismómetro; 15- barómetros; 16- higrómetro; 17- pluviómetros; 18- câmaras de vídeo; 19- juntas de expansão de deslocamentos; 20- medição de fadiga; 21- sonar.

3.7 Exemplos de sistemas de monitorização contínua em Angola

Até ao momento, em Angola, duas pontes estão a ser monitorizadas, nomeadamente a ponte de 17 de Setembro sobre o rio Kwanza na Cabala e a Ponte 4 de Abril sobre rio Catumbela em Benguela. Estas obras são monitorizadas especialmente pelas respetivas dimensões e importância na sociedade. Adicionalmente, a partir uma parceria estabelecida entre o LEA e o LNEC, as mesmas pontes foram ensaiadas após o final da construção, antecedendo a sua entrada em serviço.

O sistema de monitorização instalado na ponte 17 de Setembro permite a medição de deslocamentos verticais, rotações e extensões em diversas secções do tabuleiro e foi também controlada a evolução das temperaturas ambiente e no interior do betão. Na Tabela 7 está sumariado os equipamentos que foram utilizados para a realização da observação estrutural bem como o tipo de grandeza medida (Fonseca, 2014).

Tabela 7 - Sistema de observação instalado na ponte 17 de setembro (Fonseca, 2014)

Grandeza	Equipamento	Unidades
Deslocamento vertical	Células de pressão (Nivelamento hidrostático)	8
Rotação	Clinómetros elétricos	2
Extensão do betão	Extensómetros de corda vibrante	24
Temperatura	Termómetros de resistência	21
	Sensor de temperatura e humidade	1
Aquisição de dados	Datalogger Datataker DT 80G	3
	Módulo de expansão Datataker CEM 20	4
	Computador industrial Advantech Uno 2182	1

O sistema de monitorização foi distribuído em três secções do tabuleiro, correspondentes a dois dos tramos da ponte principal sobre rio Kwanza.

Quanto ao sistema de monitorização estrutural instalado na ponte 4 de abril, este permitiu também a medição de várias grandezas, nomeadamente os deslocamentos verticais, as rotações, as extensões, como também foi controlada a evolução das temperaturas ambiente e no interior do betão (Santos, et al, 2010).

Nesta obra de arte foram instrumentadas duas secções do tabuleiro que correspondem ao tramo principal da ponte sobre rio, uma a meio vão e a outra lateralmente, como é posteriormente apresentado e ilustrado no Capítulo 4.

3.8 Considerações finais

Como consequência das limitações das inspeções visuais, têm sido desenvolvidas monitorizações a longo prazo nomeadamente no surgimento da SHM. Este conceito de SHM tem surgido nos últimos anos em vários estágios de desenvolvimento e é referido como um processo de implementação de uma estratégia de deteção de danos em infraestruturas aeroespaciais, civis e mecânicas. Este processo envolve a observação da estrutura durante um determinado período, permitindo avaliar o estado da mesma a partir da extração das características de medições feitas periodicamente e que são posteriormente analisadas.

Tem sido feita uma analogia do conceito da SHM com o corpo humano, de maneira que o funcionamento da SHM tenha um comportamento similar ao sistema nervoso do corpo humano. Uma boa parte dos elementos relativos à monitorização estrutural encontram-se em níveis adiantados de desenvolvimento tecnológico, nomeadamente, sensores, sistemas de aquisição, cablagens, entre outros.

Para o estabelecimento de uma estratégia de deteção de danos desde o início dos anos oitenta, a comunidade de engenharia civil tem investigado a aplicação de métodos baseados em vibrações nas pontes. Contudo, os efeitos da variabilidade operacional e ambiental afetam a caracterização dos parâmetros e consequentemente na deteção de dano estrutural. As abordagens para SHM podem ser colocados no contexto de um problema de paradigma de reconhecimento de padrões que é descrito num processo de quatro fases e que tem como objetivo principal comparar a condição normal da estrutural em relação a condição de dano.

Como forma de eliminar os efeitos da variabilidade operacional e ambiental, têm sido desenvolvidos algoritmos, oriundos da área de ciência computacional, que são treinados com dados recolhidos de maneira que sejam capazes de detetar anomalias ou padrões invisíveis durante o funcionamento normal. Nesta dissertação foram abordados dois algoritmos, nomeadamente a MSD e o PCA.

Capítulo 4

Monitorização da integridade estrutural de uma ponte em Angola

4.1 Considerações gerais

Pretende-se neste capítulo exemplificar a aplicação de uma estratégia de deteção de dano no âmbito da exploração de um sistema de monitorização da integridade estrutural. Para esse efeito, utilizou-se como caso de estudo a Ponte 4 de Abril, sobre o rio Catumbela, na província de Benguela.

Desta forma, este capítulo é constituído por mais seis subcapítulos, para além desta introdução. No segundo subcapítulo é feita uma descrição sucinta da obra; em seguida faz-se também uma descrição do sistema de monitorização da ponte e os ensaios de carga realizados, nos subcapítulos três e quatro, respetivamente. No quinto subcapítulo são apresentados os resultados das medições dos extensómetros de corda vibrante da seção S1 correspondente à seção de meio vão do tramo principal da ponte. O sexto subcapítulo corresponde a análise de deteção de anomalias que foi feita com dados fornecidos pelo LNEC até a data da última observação registada, relativas as medições dos extensómetros. A mesma procedeu-se através do desempenho de dois algoritmos associados aos erros do tipo I, nomeadamente a PCA e a MSD, que foram abordados no subcapítulo 3.4.1. E por fim, no sétimo e último subcapítulo são efetuadas as conclusões.

4.2 Descrição da obra

A Ponte 4 de Abril é uma ponte atirantada de suspensão total, cujo tabuleiro é uma estrutura contínua com os viadutos de acesso em ambas as margens do rio, tendo um comprimento total de 438 m.



Figura 67 - Ponte 4 de Abril, vista da margem esquerda (Armando Rito Engenharia, S.A)

Esta ponte é em betão armado pré-esforçado e é constituída por duas torres em forma de U, com cerca de 50 m de altura, e por três vãos suspensos através de tirantes dispostos em semi-harpa. O tramo central tem um vão de 160 m e os tramos laterais têm vãos de 64 m. O viaduto situado na margem esquerda tem uma extensão de 90 m e o viaduto da margem direita tem uma extensão de 60 m. Os viadutos de acesso são constituídos por vãos de 30 m. Toda obra está fundada em estacas. (Rito, et al, 2011; Secil, 2011)

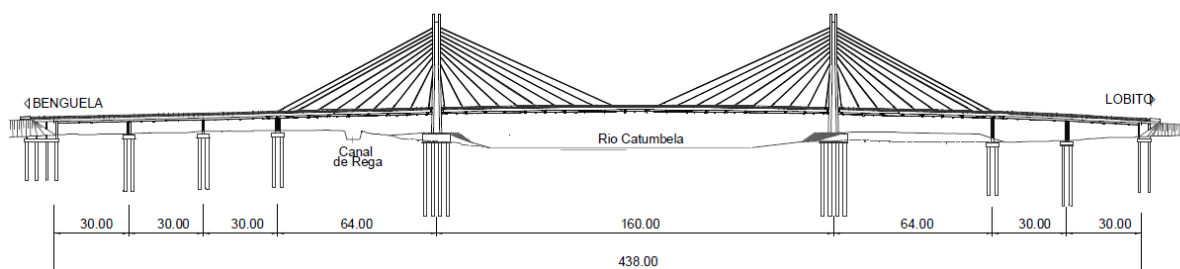


Figura 68 - Alçado da Ponte 4 de Abril (Santos, et al, 2010)

O tabuleiro da ponte, em betão C35/45, é constituído por duas vigas largas longitudinais, aligeiradas por intermédio de moldes cilíndricos perdidos, ligadas entre si superiormente por uma laje e por carlingas pré-esforçadas. (Rito, et al, 2011). O tabuleiro possui uma largura total de 24,50 m (Figura 69); os tabuleiros dos viadutos de acesso possuem uma largura total de 22,90 m. O acréscimo de largura na ponte deveu-se a necessidade de acomodar as ancoragens dos tirantes, a uma distância segura das faixas de rodagem. (Secil, 2011)

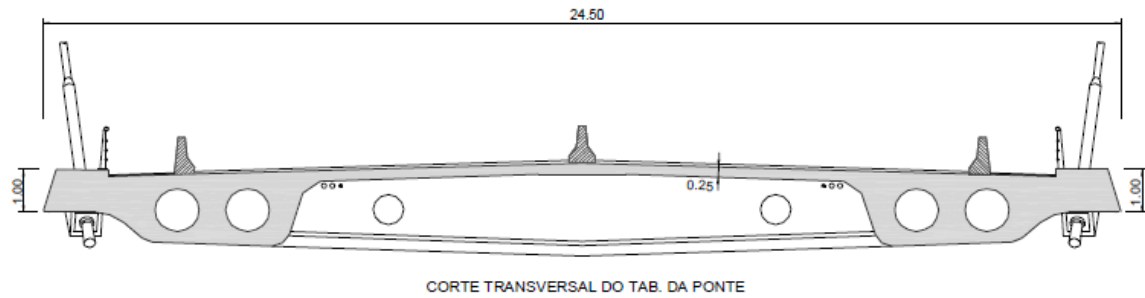


Figura 69 - Seção transversal do tabuleiro da ponte (Rito, et al, 2011)

4.3 Descrição do sistema de monitorização estrutural

A ponte foi instrumentada, durante a construção, através uma série de equipamentos para medição de várias grandezas que permitem a monitorização do comportamento da estrutura em serviço. Foram instrumentadas duas secções do tabuleiro (S1 e S2) com extensómetros de corda vibrante e termómetros elétricos de resistência embebidos no betão, cuja localização é ilustrada na Figura 70. Na Figura 71 está ilustrado a instrumentação de uma seção transversal do tabuleiro com extensómetros de corda vibrante. As rotações foram medidas a partir de clinómetros elétricos instalados nos mastros. (Santos, et al, 2010)

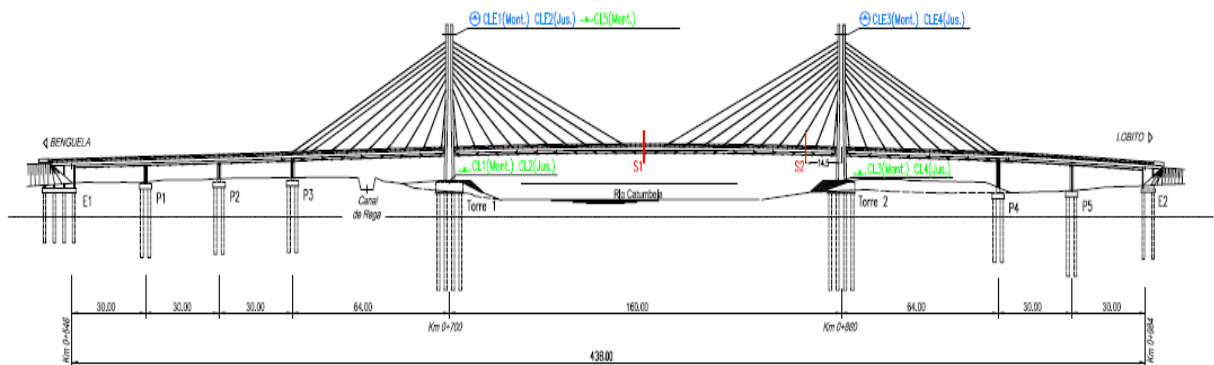


Figura 70 - Plano geral de monitorização da ponte (Santos, et al, 2010)

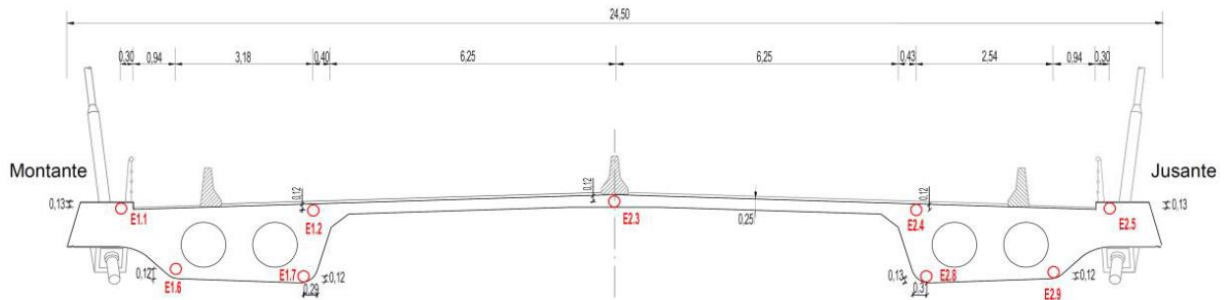


Figura 71 - Seção instrumentada: disposição dos extensómetros de corda vibrante (Santos, et al, 2010)

A Tabela 8 sintetiza as grandezas medidas na Ponte 4 de Abril juntamente com a indicação dos sensores utilizados e respetivas quantidades.

Tabela 8 - Sistema de monitorização instalado na Ponte 4 de Abril (adaptado de (Santos L. , 2015))

Grandeza	Equipamento	Unidades
Deslocamento vertical	Bases para nivelamento geométrico	36
Rotação	Clinómetros elétricos	4
Extensão do betão	Extensómetros de corda vibrante	18
Temperatura	Termómetros de resistência	12
	Sensor de temperatura e humidade	1
Aquisição de dados	Datalogger Datataker DT515	4
	Módulo de expansão de canais	2
	Computador industrial Advantech Uno 2182	1

4.4 Ensaios de carga

No final da construção foram realizados ensaios de carga estáticos e dinâmicos. Nos ensaios estáticos foi possível determinar as linhas de influência das grandezas observadas e pretendeu-se maximizar a resposta da estrutura, designadamente, em termos de deslocamentos verticais, rotações e de momentos fletores em diversas seções do tabuleiro.

Os ensaios estáticos envolveram o ensaio dos tramos suspensos. A realização destes ensaios foi feita em três fases distintas: (i) numa fase inicial foi utilizada uma carga concentrada que se posicionou em diversas seções do tabuleiro; (ii) de seguida foi usada uma carga rolante, que circulou a velocidade muito vagarosa ao longo do tabuleiro e por fim (iii) recorreu-se a uma sobrecarga distribuída. As cargas concentrada e rolante foram materializadas por intermédio de quatro camiões carregados, perfazendo uma carga total de 1277 kN (Figura 72). A carga distribuída foi constituída por intermédio de 16 camiões perfazendo um total de 5107 kN, que foi colocada sucessivamente em onze posições diferentes. A aplicação desta última carga foi realizada no período da noite, de forma a minimizar o efeito das variações de temperatura (Figura 73).

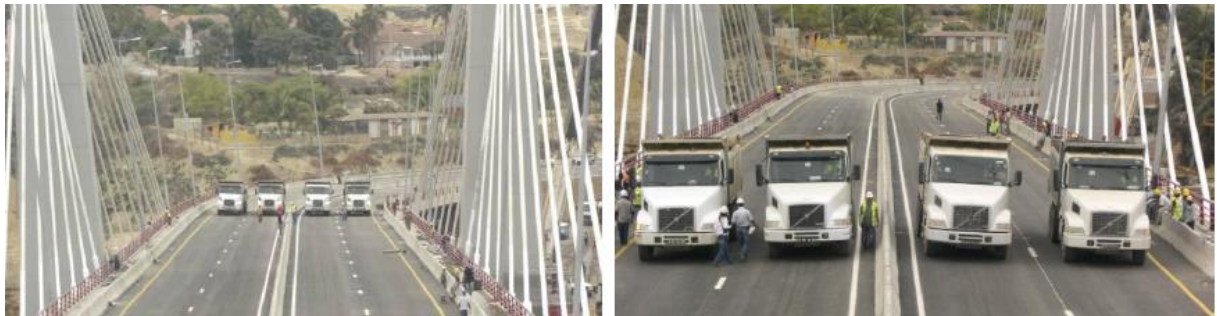


Figura 72- Ensaio da carga concentrada (Santos, et al, 2010)



Figura 73 - Comboio de carga (Santos, et al, 2010)

Durante os ensaios dinâmicos foram medidas as acelerações na estrutura, nomeadamente as acelerações nos tramos suspensos assim como no topo das torres, provocadas basicamente pela ação do vento. Estes ensaios de caracterização dinâmica tiveram como

principal objetivo a avaliação das frequências dos principais modos de vibração da estrutura. Assim, foram instrumentadas 17 seções do tabuleiro, em cada uma das quais foram colocados dois macro sismógrafos, um do lado do montante e outro do lado da jusante. Para além disso, foram também medidas as acelerações no topo dos quatro mastros das duas torres. Os macro sismógrafos permitiram a medição das acelerações longitudinal, transversal e vertical.

Depois de estabelecidos todos os procedimentos necessários, foram então identificadas as frequências de diversos modos de vibração, tendo-se obtido para os primeiros modos vertical, transversal e de torção frequências de 0,55 Hz, 0,70 Hz e 1,04 Hz, respetivamente (Santos, et al, 2010).

4.5 Resultados da medição dos extensómetros

O trabalho desta dissertação tem apenas em conta a medição feita pelos extensómetros e na seção S1 (Figura 74) correspondente à seção de meio vão do tramo principal da ponte, que foi monitorizada superior e inferiormente com nove extensómetros (conforme a Figura 74), no período entre a 10 de junho de 2009 e 14 de janeiro de 2013.

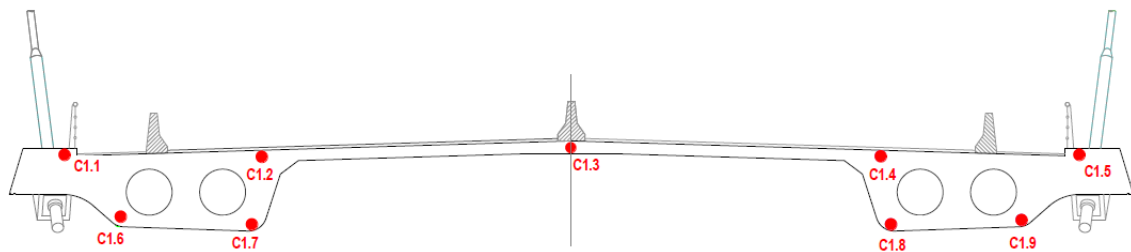


Figura 74 - Seção S1 com referência e posicionamento dos extensómetros de corda vibrante

O extensómetro de corda vibrante (exemplo na Figura 75) é um sensor baseado na variação da frequência de uma corda de aço em função da tensão/deformação a que mesma está sujeita (IST, DECivil); a corda encontra-se fixa nas duas extremidades do equipamento e por

isso, está sujeita a uma elevada tensão de tração (Silva A. , 2013). Assim, o princípio de funcionamento é baseado na teoria das cordas vibrantes, dado pela seguinte expressão:

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{g \sigma}{\gamma}}$$

Onde:

f_n - frequência do n-ésimo modo de vibração;

n - número do modo de vibração;

g - aceleração de gravidade;

σ - tensão na corda;

L - comprimento da corda;

γ - peso específico.

A variação da extensão do elemento onde o extensómetro está embebido é dada pela seguinte expressão (Gage Technique International Ltd, 1999):

$$\mu\epsilon = (f_0^2 - f_1^2) \times GF \quad (5)$$

Onde:

$\mu\epsilon$ - micro extensão (10^{-6});

f_0^2 - frequência de vibração inicial ou de referência (Hz);

f_1^2 - frequência medida subsequente (Hz);

GF - fator de calibração apropriado para o extensómetro.



Figura 75 - Exemplo de um extensómetro de corda vibrante usado na monitorização da Ponte 4 de Abril (Santos L. , 2015)

Uma vez que a variação de temperatura provoca uma variação de comprimento na corda devido a diferença entre o coeficiente de dilatação térmica da corda e do elemento em que está inserido, os extensómetros possuem um termístor incorporado para corrigir esse efeito e cuja medição é utilizada na seguinte expressão:

$$\Delta \varepsilon = (\varepsilon_0 - \varepsilon_1) + (T_0 - T_1) K \quad (6)$$

Onde:

ε_0 - medição da extensão inicial;

ε_1 - medição da extensão subsequente;

T_0 - Temperatura inicial (°C);

T_1 - Temperatura subsequente (°C);

K – Fator corretivo da temperatura (/°C).

As figuras Figura 76 e Figura 77 apresentam, a título ilustrativo, os gráficos obtidos a partir das extensões medidas ao longo do período de 10 de junho de 2009 a 14 de janeiro de 2013.

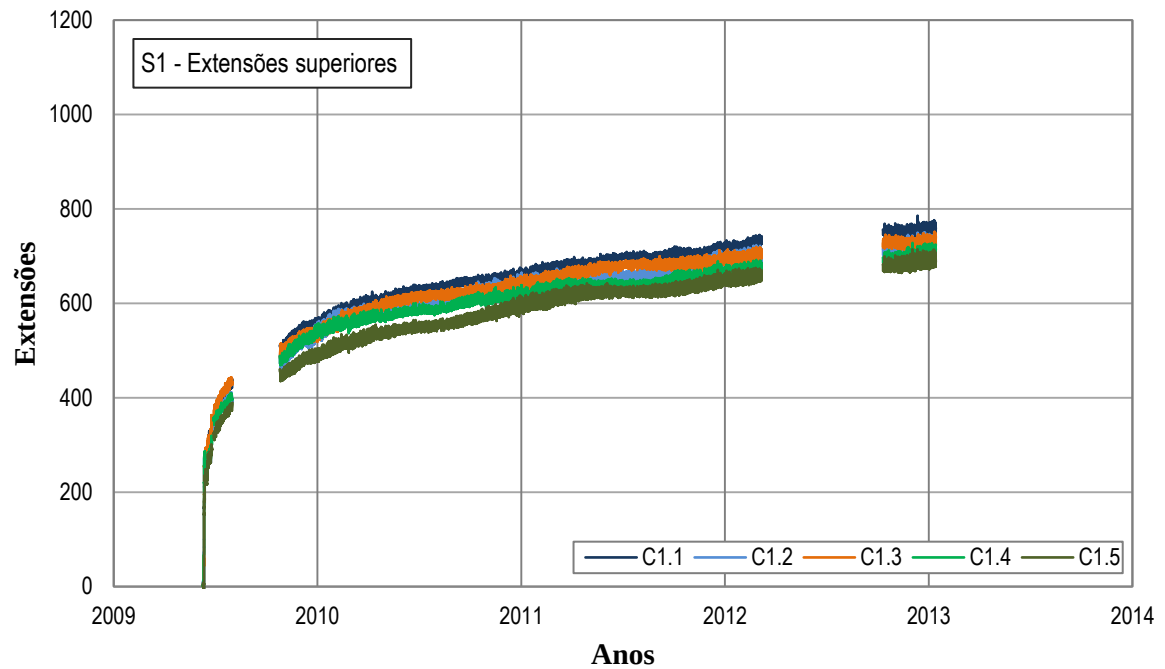


Figura 76 - Gráfico dos resultados das extensões superiores. (Santos L. , 2015)

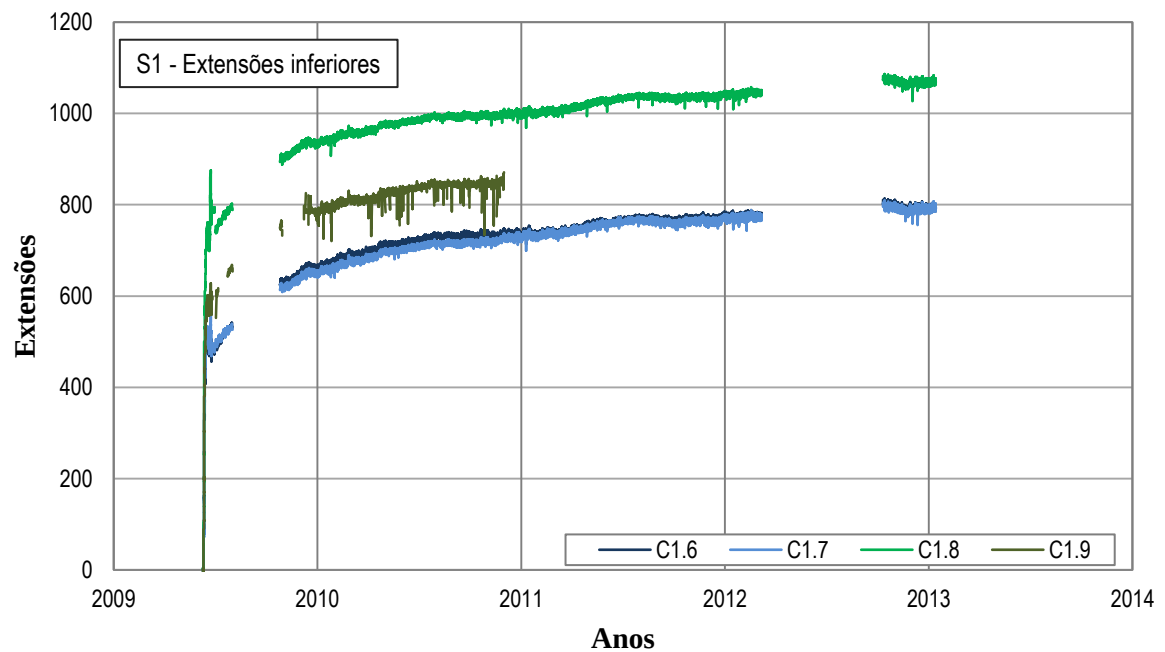


Figura 77 - Gráfico dos resultados dos extensómetros inferiores (Santos L. , 2015)

De acordo com as informações fornecidas, os espaços vazios apresentados nos gráficos correspondem a períodos em que houve falta de energia e, como se pode observar no gráfico da Figura 77, os valores das extensões do extensómetro C1.9 não têm continuidade devido as falhas que ocorreram no próprio equipamento.

4.6 Detecção de danos ou anomalias através de algoritmos inteligentes

A partir das abordagens detalhadas no subcapítulo 3.4.1, as quais foram implementadas de forma não supervisionada em MATLAB, procedeu-se à análise dos sensores C1.1 a C1.8 de deteção para danos (ou anomalias) na estrutura. Para tal, teve-se em conta apenas oito sensores, pois o nono (C1.9) contém várias falhas devido a problemas do próprio equipamento, como já foi mencionado. Os valores das extensões já se apresentam corrigidos tendo em conta o efeito da temperatura em cada extensómetro.

Pretende-se então comparar o desempenho dos dois algoritmos, nomeadamente a MSD e PCA, com base nos erros tipo I. Como já foi mencionado no subcapítulo 3.4.1, no contexto da SHM, o erro tipo I também designado de “falso-positivo”, indica a presença de dano apesar de sua inexistência. Uma vez que a monitorização da Ponte 4 de Abril foi realizada durante a sua construção seguida da sua entrada em serviço, não há, portanto, registos de dano, pelo que os algoritmos são treinados e testados para a condição normal (sem dano).

Para a realização desta análise considerou-se a monitorização feita a partir de 04 de julho de 2009 (960ª observação) até 14 de janeiro de 2013, o que correspondente a um número total de 3943 observações, sendo que os restantes dados iniciais (1-959) foram excluídos por corresponderem à fase de construção. Assim, para a matriz de treino foi considerado o período inicial de dois anos, de 04 de julho de 2009 até 01 de julho de 2011, que corresponde a um número total de 2563 observações e para a matriz de teste foi considerado o número total de observações para o período em questão.

Na implementação do PCA em MATLAB, a percentagem de variabilidade dos dados retida foi de 90%. O limiar para a deteção de dano foi adotado com 95% de confiança, considerando que os ID's seguem uma distribuição Chi-quadrada.

Numa fase inicial, para a análise de deteção de anomalias, foram considerados os oito extensómetros, cujas matrizes de treino e de teste são respetivamente, $X^{2563 \times 8}$ e $Z^{3943 \times 8}$.

A Figura 78 ilustra os pesos das componentes principais, ou seja, as dimensões que têm maior percentagem de variabilidade. Como se pode observar, a primeira componente principal é mais significativa, com uma percentagem de variabilidade de aproximadamente 98%, ou seja, representa a maior parte das observações de aprendizagem.

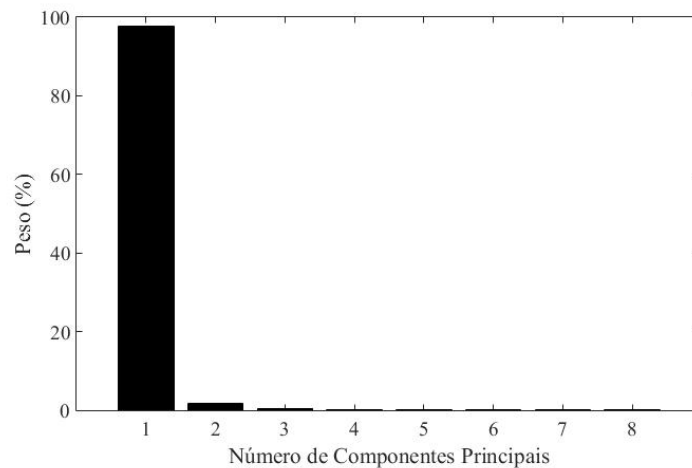


Figura 78 - Distribuição dos pesos de cada componente principal.

A Tabela 9 representa a matriz de correlação entre os sensores, que demonstra claramente a forte correlação entre eles (correlações superiores a 0,9352), possivelmente associado ao comportamento similar que os mesmos apresentam considerando o desenvolvimento das curvas apresentadas nos gráficos das figuras Figura 76 e Figura 77 no subcapítulo 4.5. Esta forte correlação permite também chegar à conclusão que a utilização de uma componente principal é suficiente para fazer uma deteção de anomalias, assim como a reconstrução dos dados originais (redundância de informação).

A Figura 79 ilustra o gráfico da matriz de teste original. Analogamente, na Figura 80 é ilustrado o gráfico da matriz de teste reconstruída a partir de uma componente principal; nota-se que na mesma figura o ruído dos dados foi claramente reduzido, comparado aos dados originais, sem grande perda de informação aparente.

Tabela 9 - Matriz de covariância entre sensores

	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6	C1.7	C1.8
C1.1	1.0000	0.9931	0.9678	0.9933	0.9906	0.9701	0.9772	0.9650
C1.2		1.0000	0.9540	0.9973	0.9906	0.9515	0.9607	0.9472
C1.3			1.0000	0.9628	0.9572	0.9765	0.9895	0.9688
C1.4				1.0000	0.9872	0.9634	0.9709	0.9620
C1.5					1.0000	0.9403	0.9591	0.9352
C1.6						1.0000	0.9945	0.9965
C1.7							1.0000	0.9915
C1.8								1.0000

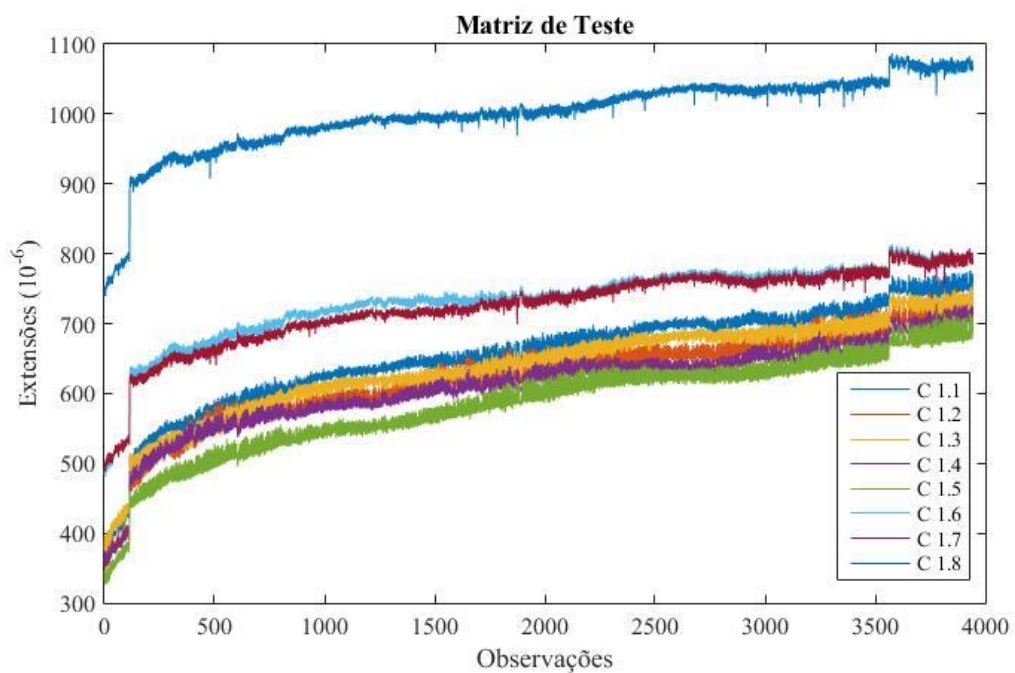


Figura 79 - Gráfico da Matriz de Teste

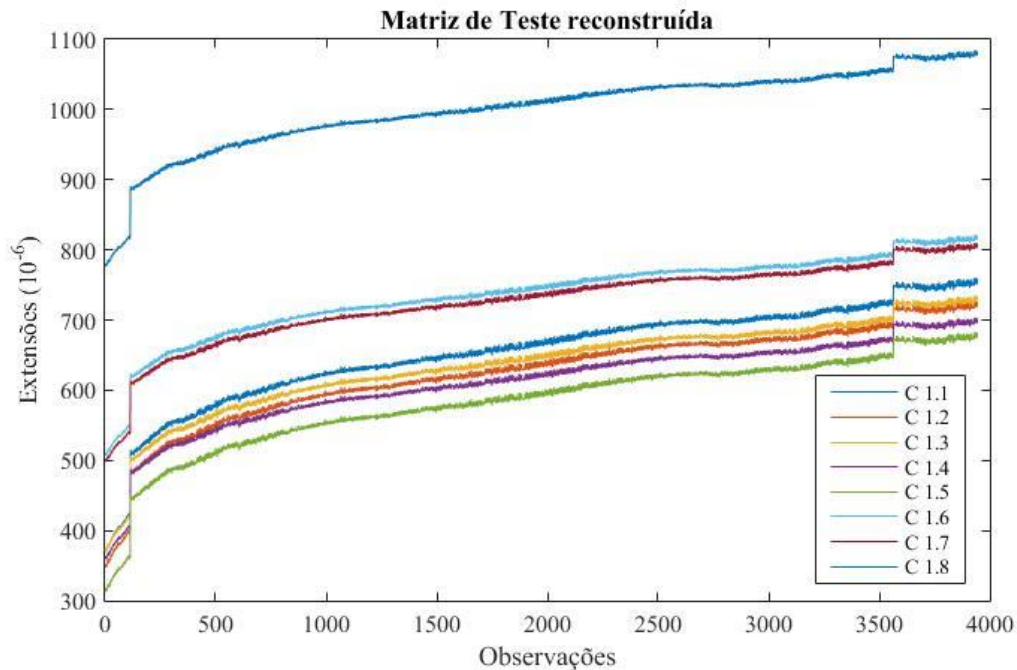


Figura 80 - Gráfico da Matriz de Teste reconstruída com uma componente

Contudo, como se pode observar na Figura 81 em que CN significa condição normal, a utilização de todos os extensómetros resulta numa elevada percentagem de anomalias associadas ao erro tipo I (14,8% para a PCA e 18,4% para a MSD, como se pode constatar na (Tabela 10), pelo que se optou pela utilização separada entre sensores superiores e inferiores.

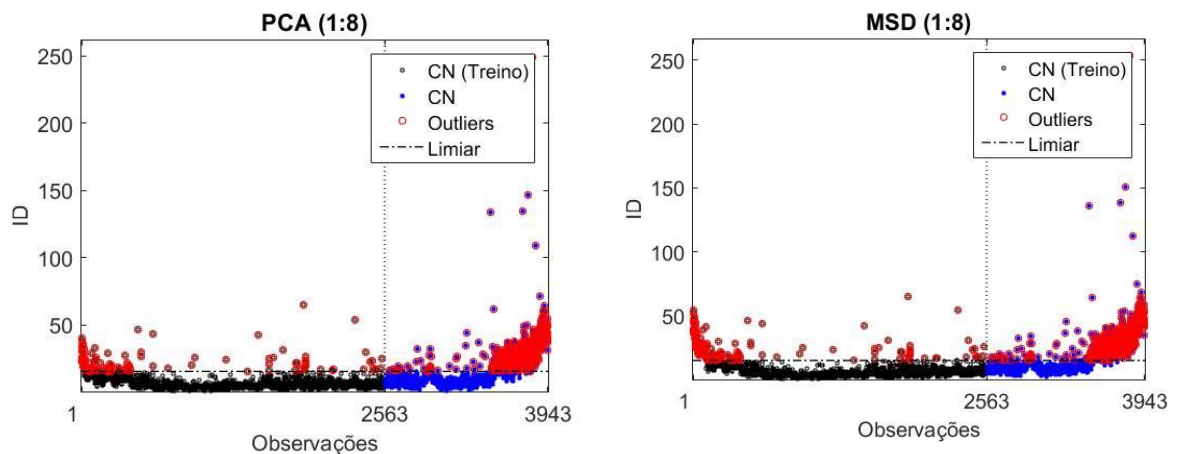


Figura 81 - Detecção de anomalias através dos algoritmos PCA e MSD

Assim, foram consideradas as seguintes combinações entre sensores, conforme estão localizados superior ou inferiormente na seção S1: (i) sensores 1 e 2; (ii) sensores 1 até 3; (iii)

sensores 1 até 4; (iv) sensores 1 até 5; (v) sensores 6 e 7; (vi) sensores 7 e 8 e (vii) sensores 6 até 8. Desta forma, obtiveram-se diferentes matrizes de treino e de teste em função do número de características, isto é, o número total de sensores considerados. Mediante o desempenho de cada algoritmo obtiveram-se diferentes valores de erros tipo I associados, conforme os exemplos das figuras Figura 82 e Figura 83 :

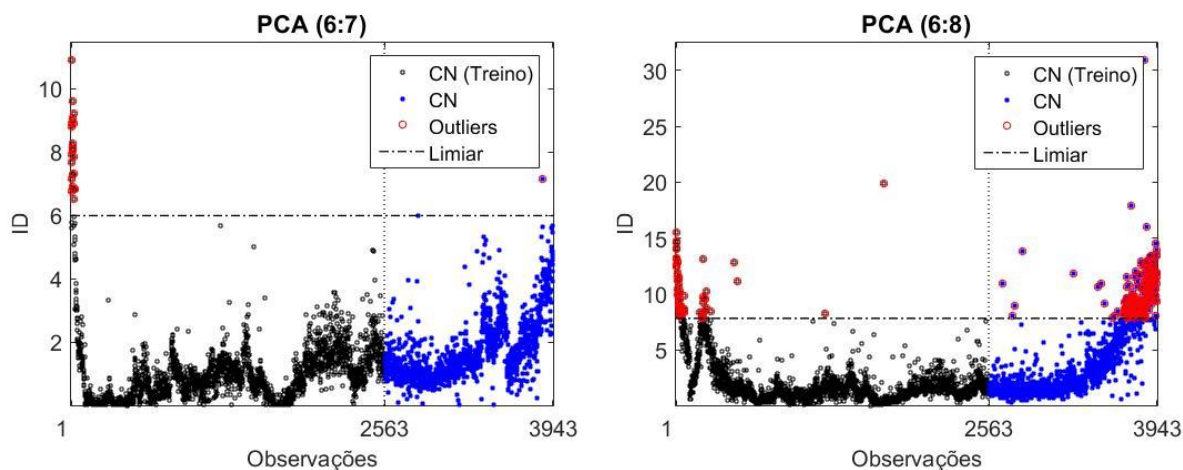


Figura 82 - Exemplos de deteção de anomalias através do algoritmo PCA

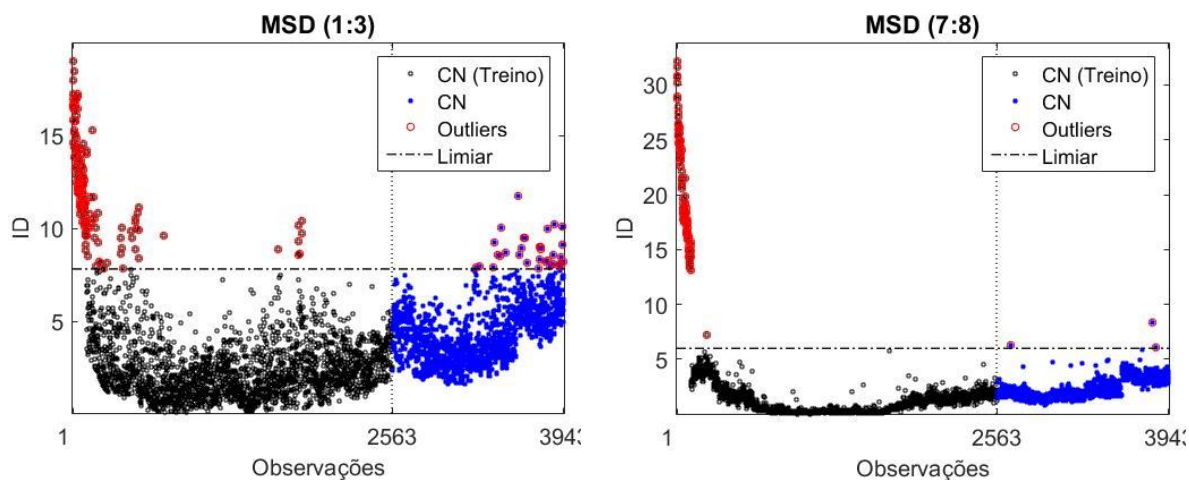


Figura 83- Exemplos de deteção de anomalias do algoritmo MSD

A Tabela 10 resume o desempenho em termos de classificação de cada algoritmo, considerando todos os extensómetros e as diferentes combinações entre os extensómetros superiores e inferiores.

Tabela 10 - Desempenho dos algoritmos baseados nos erros tipo I

PCA		MSD	
Sensores	Erros	Sensores	Erros
1 a 8	586 (14,8%)	1 a 8	729 (18,4%)
1 e 2	26 (0,6%)	1 e 2	232 (5,8%)
1 a 3	29 (0,7%)	1 a 3	188 (4,7%)
1 a 4	164 (4,2%)	1 a 4	371 (9,4%)
1 a 5	214 (5,4%)	1 a 5	377 (9,5%)
6 e 7	24 (0,6%)	6 e 7	232 (5,8%)
7 e 8	66 (1,7%)	7 e 8	118 (2,9%)
6 a 8	276 (6,9%)	6 a 8	539 (13,6%)

A análise da Tabela 10 permite extrair as seguintes conclusões:

- A combinação de todos os sensores gera uma maior percentagem de erros, pelo que apresenta os piores desempenhos nos dois algoritmos, devido ao ruído associado aos sensores que são utilizados para a determinação das componentes principais;
- De forma a obter resultados mais aceitáveis, foram consideradas combinações separadas entre sensores, pelo que, em termos de desempenho do algoritmo baseado na PCA, a combinação de sensores superiores, que teve melhor desempenho (menores erros tipo I), foi a combinação 1 e 2; e em relação aos sensores inferiores, a combinação 6 e 7 obteve o melhor desempenho.
- Quanto ao desempenho do algoritmo baseado na MSD, a combinação de sensores de 1 até 3 e a combinação 7 e 8 tiveram os melhores desempenhos para sensores superiores e sensores inferiores, respectivamente.

Entretanto, considerando uma nova abordagem para a combinação dos oito sensores, a MSD pode ser aplicada nos dados da matriz de teste reconstruída através da PCA, ou seja, os dados dos sensores sem ruídos. Pode-se observar na Figura 84 que o desempenho dessa abordagem apresenta uma melhoria significativa em termos de erros tipo I. Além disso, é possível observar que a utilização de todos os sensores em vez das combinações de apenas alguns obtém-se melhores resultados, pois não são detetadas nenhuma anomalias.

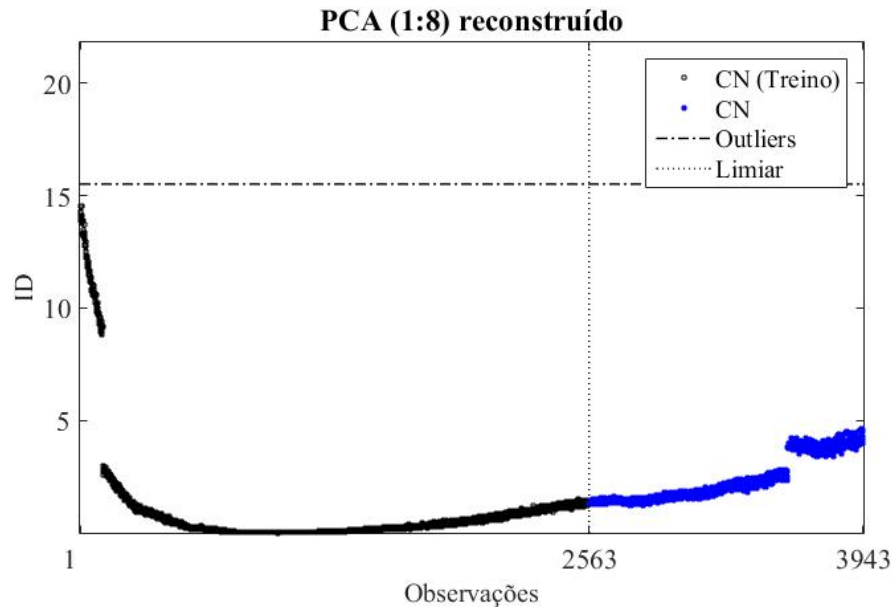


Figura 84 - Detecção de anomalias através do algoritmo PCA apenas com a matriz de teste reconstruída

4.7 Considerações finais

A Ponte 4 de Abril foi instrumentada e monitorizada durante a construção, e posteriori entrada em serviço. Foram efetuados ensaios estáticos e dinâmicos, com objetivos de maximizar a resposta da estrutura e identificar os primeiros modos de vibração da ponte. A monitorização da ponte com extensómetros de corda vibrante na seção S1, iniciou-se a partir de 10 de junho de 2009, e desde então têm sido feitas leituras correspondentes aos valores das extensões.

Nesta dissertação consideram-se as medições feitas nessa seção S1, correspondente à seção de meio vão do tramo principal da ponte. Mediante essas medições registadas até 14 de janeiro de 2013, foi realizada uma análise de deteção de anomalias a partir dos algoritmos baseados na PCA e na MSD. A partir do primeiro algoritmo observou-se que há uma forte correlação entre os sensores, que permitiu chegar a conclusão que a consideração de uma componente principal é suficiente para deteção de anomalias e reconstrução dos dados originais, pelo que a utilização de um sensor é suficiente pois há redundância de informação.

Conforme a análise de deteção de danos efetuada, verificou-se que as combinações separadas entre sensores obtiveram os melhores desempenhos pois apresentaram menos erros do tipo I durante o período de teste não compreendido no treino, ou seja, entre as observações

2563 e 3943. Contudo, a aplicação da MSD com os dados da matriz de teste reconstruída através da PCA, demonstra que a combinação de todos os sensores obtém melhores resultados.

Em suma, o algoritmo baseado em PCA obteve um melhor desempenho através da minimização dos erros tipo I, o que possivelmente está associado ao facto de possuir como uma das principais características a redução de grande parte do ruído experimental. Essa redução é possível porque o ruído não está correlacionado com as informações contidas na matriz de treino. Uma vez que grande parte do ruído é removido na fase de treino, o algoritmo consegue também generalizar tal modelo para a fase de teste, obtendo resultados aceitáveis.

O algoritmo baseado na MSD, teve o pior desempenho, pois tenta englobar todas as observações num só aglomerado incluindo o ruído, e portanto resulta numa deficiente deteção de outliers quando comparado ao desempenho do PCA.

Conclusões

Os objetivos principais desta dissertação foram contribuir para o conhecimento das pontes existentes em Angola, do seu processo atual de gestão e definir a base de uma nova estratégia de deteção de anomalias através da aplicação de algoritmos de aprendizagem automática. Nesta dissertação, os algoritmos foram apenas aplicados nos dados de um sistema de monitorização de uma ponte angolana, nomeadamente a Ponte 4 de Abril sobre o rio Catumbela. Note-se que os algoritmos de aprendizagem são o elemento chave de uma estratégia mais alargada de gestão de pontes, com capacidade de fundir, aprender e processar dados provenientes das inspeções visuais, monitorização estrutural e modelos numéricos de elementos finitos.

O Capítulo 1 permitiu caraterizar o parque de pontes rodoviárias angolanas, incluindo uma descrição sucinta sobre a história da sua construção, destruição durante a guerra civil e reconstrução no início do século XXI. Assim foi demonstrado que, após os 27 anos de conflito armado, o país foi capaz de reconstruir parte da sua infraestrutura. Várias pontes foram consideradas marcos de paz e revelam-se atualmente de extrema importância no desenvolvimento socioeconómico das respetivas regiões. Para além disso, foi apresentada a estratégia atual de gestão das pontes no país, através da implementação do sistema de gestão de obras de arte americano. Este sistema foi adaptado à realidade do país e tem permitido proceder-se à inventariação das obras de arte, bem como definir o estado de conservação das mesmas através de inspeções visuais programadas. Adicionalmente, uma grande contribuição desta dissertação incide sobre o levantamento feito pela autora com uma amostra de 111 pontes, do qual se concluiu que a maior parte das pontes em Angola apresentam uma solução estrutural em laje vigada, com seção transversal em vigas pré-fabricadas adicionalmente, 67% das pontes têm comprimento inferior a 100 m e estão fundadas maioritariamente por estacas.

O Capítulo 2 apresentou a história da gestão de obras de arte nos EUA e em Portugal, muito marcada por eventos catastróficos. Estes eventos causaram várias vítimas humanas e motivaram a criação e implementação de sistemas de gestão de obras de arte. Nos EUA foram criados os sistemas Pontis e Bridgit. O Pontis é hoje utilizado por mais de 50 agências no país e no estrangeiro. Em Portugal, a empresa Brisa deu o primeiro passo com a criação de um

sistema de gestão de obras de arte, nomeadamente o STONE. Entretanto, em 2000, foi lançado o SGOA, desenvolvido pela empresa Betar, e tem sido implementado pelos principais donos de obras de arte. O sistema foi adaptado à realidade de cada empresa e tem auxiliado os donos de obra a terem um conhecimento atualizado das obras, bem como o estado de conservação das mesmas. Concluiu-se que estes sistemas são hoje imprescindíveis para os donos de obra, uma vez que os mesmos permitem identificar as obras, classificar a condição estrutural das mesmas e priorizar serviços de intervenção e manutenção. Contudo, observa-se que os mesmos estão ainda muito dependentes das inspeções visuais, que devido ao seu carácter subjetivo, causado pelas limitações humanas de ver para além da superfície, pode não ser suficiente para prevenir colapsos, tal como ficou demonstrado com a queda da ponte I-35W no Mississippi, EUA.

O Capítulo 3 permitiu rever o conceito da Monitorização da Integridade Estrutural, assim como o papel dos algoritmos de aprendizagem automática. Este conceito tem surgido nas últimas décadas como um processo contínuo de deteção de danos nas estruturas. A aplicação de algoritmos de aprendizagem automática tem sido uma ferramenta importante no tratamento de dados, principalmente para eliminar os efeitos da variabilidade operacional e ambiental que afetam a caracterização de parâmetros de resposta estrutural e, consequentemente, a deteção de danos, bem como para reduzir o volume de informação a ser interpretado pelos donos de obra. Em Portugal várias pontes estão a ser monitorizadas continuamente. Em Angola, até ao momento, apenas se identificaram duas pontes em processo de monitorização.

O Capítulo 4 abordou a monitorização da integridade estrutural da Ponte 4 de Abril sobre o rio Catumbela. Esta ponte foi instrumentada durante a construção, de forma a acompanhar o comportamento estrutural da ponte durante a construção e após a entrada em serviço. Desta monitorização, foram fornecidos pelo LNEC à autora os dados recolhidos das medições dos extensómetros de corda vibrante da seção S1, correspondente à seção de meio vão do tramo principal da ponte. Mediante essas medições registadas até 14 de janeiro de 2013, e onde não foi identificado à partida existência de danos estruturais, foi realizada uma análise de aprendizagem e de deteção de anomalias a partir dos algoritmos baseados na Análise das componentes principais (PCA) e na Distância quadrada de Mahalanobis (MSD). Desta análise, observou-se que no algoritmo baseado na PCA, a consideração de uma componente principal poderá ser suficiente para deteção de anomalias globais e reconstrução dados originais, pelo

que a utilização de um sensor poderá ser suficiente devido à redundância de informação. Apesar de ter sido feita uma análise de combinações separadas entre sensores, posteriormente foi demonstrado que a aplicação da MSD sobre os dados da matriz de teste reconstruída através da PCA, demonstra que a combinação de todos os sensores obtém melhores resultados. De uma forma geral, o algoritmo baseado em PCA obteve um melhor desempenho através da minimização dos erros tipo I (falso-positivo), que possivelmente está associado ao facto de conseguir reduzir, através da escolha seletiva de componentes principais, parte do ruído experimental. O algoritmo baseado na MSD teve o pior desempenho, pois o ruído existente nas características estimula uma deficiente deteção de anomalias quando comparado ao desempenho da PCA. Além disso, ficou demonstrada a utilidade destes algoritmos para analisar e reduzir os dados a um índice diário. Este índice pode assim ser utilizado pelos donos de obra para acompanhar, de forma permanente, o estado de condição das pontes e, assim, permitir a identificação da ocorrência de danos.

Note-se que a aplicação de algoritmos de aprendizagem automática pode ser inserida numa estratégia da gestão das pontes mais alargada, uma vez que constituem uma ferramenta importante na gestão de dados de diversas fontes e deteção de anomalias ou danos através de uma monitorização contínua.

Desenvolvimentos futuros

Após a realização deste trabalho, no qual se fez um levantamento histórico das pontes em Angola e se definiu uma estratégia de deteção de anomalias contínua através dos algoritmos de aprendizagem automática, nomeadamente a PCA e a MSD, fica em aberto: a realização de estudos que visam a criação de uma plataforma digital que permita ter acesso às informações mais relevantes sobre as pontes em Angola; e o desenvolvimento de outros algoritmos (ex. modelos de mistura Gaussiana) na deteção de anomalias. Para além disso, a autora propõe a criação de uma estratégia mais alargada, onde os algoritmos de aprendizagem automática funcionem como elemento chave para possibilitar a implementação de uma nova estratégia de gestão das pontes, com capacidade para analisar dados provenientes de várias fontes, tais como sistemas de monitorização, modelos numéricos de elementos finitos e inspeções visuais. Esta

estratégia visa melhorar a avaliação da condição estrutural e assim ultrapassar as limitações impostas pelas inspeções visuais.

Referências

- AASHTO. (Setembro de 2011). Pontis Release 4.5 and 5.1.2 User's Manual. Obtido em Outubro de 2016, de <https://pt.scribd.com/document/172768076/Pontis-5-1-2-User-Manual-pdf>
- AASHTO Ware Bridge . (2016). Obtido em Setembro de 2016, de AASHTO Ware Bridge : <http://aashtowarebridge.com/>
- Abdo, M. (2014). *Structural Health Monitoring. History, Applications and Future*. Assiut, Egipto: Open Science. Obtido em Setembro de 2016, de https://www.researchgate.net/publication/266854280_Structural_Health_Monitoring_History_Applications_and_Future_A_Review_Book
- Africa-turismo. (2016). Obtido em 17 de Setembro de 2016, de Africa-turismo: <http://www.africa-turismo.com/mapas/angola.htm>
- Alves, M., & Sebastião, J. (2006). Development of a Reconstruction Strategy for the Angolan Bridge Network. *Third International Conference on Bridge Maintenance, Management and Safety*. Porto.
- Amado, J. (2016). Overview on Asset Management.
- Amado, J. L. (24 de Setembro de 2015). *Prezi*. Obtido em Outubro de 2016, de <https://prezi.com/igncl5vyumon/balanco-de-atividades-sgoa-2014-ponto-de-situacao/>
- ANGOP. (14 de Outubro de 2005). *Obras de reabilitação da ponte sobre o rio Keve iniciam este mês*. Obtido em Outubro de 2016, de ANGOP: http://www.angop.ao/angola/pt_pt/noticias/economia/2005/9/41/Obras-reabilitacao-ponte-sobre-rio-Keve-iniciam-este-mes,f18f3ff7-321c-494b-bf61-f5c8d86cfe13.html
- Appleton, J. (2013). *Estruturas de Betão* (Vol. 1). Lisboa: Edições Orion.
- Armando Rito Engenharia, S.A. (s.d.). Memórias Descritivas e Justificativas.
- Barros, P. (2013). Gestão de obras de arte na rede brisa reabilitação e requalificação. *Jornadas ATIC*. Lisboa. Obtido em Abril de 2016, de http://www.jornadasatic.com/apresentacoes_2013/III.3.Paulo_Lima_Barros_BRISA.pdf
- Barros, P., Oliveira, D., Martins, N., & Perdigão, V. (2013). A gestão de obras de arte no âmbito da operação, manutenção e requalificação. *7º Congresso Rodoviário Português*. Lisboa. Obtido em Setembro de 2016, de http://www.crp.pt/docs/A45S144-6_Art_T6a_7CRP_2013.pdf

- Baxter, P. (04 de Fevereiro de 2012). *The South African Border War*. Obtido em Setembro de 2016, de Peter Baxter Africa: <http://peterbaxterafrica.com/index.php/2012/02/04/the-south-african-border-war/>
- Boshoff, J. (20 de Outubro de 2010). *Aurecon's winning streak continues at the 2010 SAICE awards*. Obtido em Junho de 2016, de Aurecon Group: <http://www.aurecongroup.com/en/about/latest-news/2010/oct/aurecons-winning-streak-continues-at-the-2010-saice-awards.aspx>
- Branco, H. (2013). *Colapsos de pontes: Lições Aprendidas*. Dissertação de Mestrado, ISEL, Departamento de Engenharia Civil, Lisboa. Obtido em Setembro de 2016, de <http://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/3164/1/Disserta%c3%a7%c3%a3o.pdf>
- Brownjohn, J. (13 de Dezembro de 2007). Structural health monitoring of civil infrastructure. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365. doi:10.1098/rsta.2006.1925
- Campos, P., Santos, A., Figueiredo, E., & Costa, J. (2016). Algoritmos inteligentes para detecção de danos em pontes sob variabilidade operacional e ambiental. *Encontro Nacional de Betão Estrutural 2016*. Coimbra.
- Ceita, A. (16 de Setembro de 2009). Cunene na rota do desenvolvimento regional. *Jornal de Angola*. Obtido em Setembro de 2016, de http://jornaldeangola.sapo.ao/regioes/cunene/cunene_na_rota_do_desenvolvimento_regional
- Claudino, F. (1884). *Em As pontes de Lucalla na província de Angola*. Lisboa: Typhonografia de Adolfo, Modesto & C.
- Conduril. (s.d.). Obtido em Outubro de 2016, de <http://www.conduril.pt/obrasangola.php>
- CRBC. (s.d.). Cunene River's Bridge.
- Cruz, P. (2013). Inspeção, Diagnóstico, Conservação e Monitorização de Pontes. 4º *Congresso Rodoviário Português*. Braga. Obtido em Abril de 2016, de <http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/6446/1/PC%2023-INSPEC%C3%87%C3%83O,%20DIAGN%C3%93STICO,%20CONSERVA%C3%87%C3%83O.pdf>
- DoT. (2016). Transportation Statistics Annual Report 2015. Washington DC. Obtido de http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov/bts/files/publications/transportation_statistics_annual_report/2015/index.html
- Esteves, E. (2000). Em *Africana Studia - Revista Internacional de Estudos Africanos* (Vol. 3, pp. 49-72). Porto: Faculdade de Letras da Universidade do Porto.

- Farrar, C., & Worden, K. (12 de Dezembro de 2007). An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365. doi:10.1098/rsta.2006.1928
- Farrar, C., & Worden, K. (2013). *Structural Health Monitoring: a machine learning perspective*. United Kingdom : Wiley.
- Félix, C. (Outubro de 2010). A Monitorização das Estruturas na Conservação de Património em Betão. *2º Encontro Internacional Património Mundial e Origem Portuguesa*. Coimbra. Obtido em Outubro de 2016, de http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/RREst/Aulas_Apresentacoes/07_Bibliografia/_slides%20aulas/Aula_05.4_Monitorizacao.pdf
- FHWA. (Dezembro de 2012). *Bridge Inspector's Reference Manual (BIRM)*. Obtido em Outubro de 2016, de <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/nbis/pubs/nhi12049.pdf>
- Figueiras, J. (2008). Monitorização da integridade estrutural de obras de arte. *Encontro Nacional de Betão Estrutural*. Guimarães. Obtido em Setembro de 2016, de <http://www.hms.civil.uminho.pt/events/be2008/79.pdf>
- Figueiredo, E. (2006). *Monitorização e Avaliação do Comportamento de Obras de Arte*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia Civil.
- Figueiredo, E. (2010). *Damage Identification in Civil Infrastructure under Operational and Environmental Conditions*. Doctor of Philosophy, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia.
- Figueiredo, E. (2013). Detecção de Dano em Pontes através de Algoritmos Inteligentes. *3º Congresso Nacional sobre Segurança e Conservação de Pontes*. Porto.
- Figueiredo, E., Moldavan, I., & Marques, M. B. (2013). *Condition Assessment of Bridges: Past, Present and Future*. Lisboa: Universidade Católica.
- Fonseca, J. (10 de Março de 2014). Observação estrutural das pontes 17 de Setembro e de 4 de Abril. Luanda, Angola. Obtido em Setembro de 2016, de <http://www.lem.co.mz/Observacao-Estrutural-das-pontes-17-de-setembro-e-4-de-abril.pdf>
- Freire, L., & Amado, J. (2014). SGOA- Sistema de gestão da conservação de obras de arte da EP- Novos desafios. *5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*. Lisboa.
- Freire, L., & Amado, J. (2015). SGOA- Sistema de Gestão de Conservação de Obras de Arte da EP - Novos Desafios. *Congresso de Segurança e Conservação de Pontes 2015*. Lisboa.
- Gage Technique International Ltd. (Novembro de 1999). Vibrating wire strain gauge technical data sheet.

- George, E. (2005). *The cuban intervention in Angola, 1965-1991*. London. New York: Frank Cass. Obtido em 3 de Março de 2017, de https://books.google.pt/books?id=gcR_AgAAQBAJ&pg=PA216&lpg=PA216&dq=bridge+over+cuito+river+destroyed&source=bl&ots=Sl-_U-hSbX&sig=Q6R5o6SRG17U5j7TdCJOi61pmIg&hl=pt-PT&sa=X&ved=0ahUKEwiE6qLL6LjSAhWMVRQKHdfeBbQQ6AEILjAH#v=onepage&q=bridge%20over%20cuito%20
- Hemeroteca Digital*. (21 de Março de 1887). Obtido em Junho de 2016, de http://hemerotecadigital.cm-lisboa.pt/OBRAS/Ocidente/1887/N297/N297_master/N297
- Horta, C., & Freire, L. (2013). SGOA- Sistema de Gestão de Conservação de Obras de Arte da EP- Balanço de uma implementação consolidada. *7º Congresso Rodoviário Português*. Lisboa. Obtido em Setembro de 2016, de http://www.crp.pt/docs/A45S144-143_Art_T6a_7CRP_2013.pdf
- INEA. (2015). Estradas de Angola: Fomento para diversificação e desenvolvimento da economia. *Seminário internacional sobre pavimentação e conservação rodoviária*. Luanda.
- Interesting aspects of the South African Bushwar / Border War* . (s.d.). Obtido em Setembro de 2016, de A Site about the South African Bushwar / Border War (Grensoorlog of Bosoorlog in Afrikaans): <https://sites.google.com/site/sabushwarsite/interesting>
- ISQ. (2012). Relatório Final da 1ª Fase de Projeto.
- IST, DECivil. (s.d.). Transdutores e aquisição de dados. Obtido em 24 de Janeiro de 2017, de <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779577332854/6.3%20Transdutores.pdf>
- Landerset, J.-R., & Perloiro, J. D. (1964). Construção de Pontes no Ultramar Português. Em *Revista Fomento* (Vol. 2, pp. 89-141).
- Landerset, J.-R., & Perloiro, J. G. (1968). *Pontes no Ultramar Português*. Lisboa: Agência Geral do Ultramar.
- Libânio, N. (Dezembro de 2012). *Ponte da Muxima – Análise e dimensionamento segundo os Eurocódigos e relatório de construção*. Dissertação de mestrado, ISEL, Departamento de Engenharia Civil, Lisboa.
- LPESA. (s.d.). Bridge Inspection History. Obtido em Setembro de 2016, de http://www.lpesa.org/PDF/pontis_ppt.pdf
- Malanje, A. (2016). Secretário de Estado da Construção inaugura Ponte do Rio Giraul em Angola. Obtido em 27 de Fevereiro de 2017, de <https://www.redeconstrucao.com/secretario-de-estado-da-construcao-inaugura-ponte-do-rio-giraul-em-angola-11212>

- Martins, E. (2 de Março de 2016). *Como se constrói a quarta maior ponte de Angola*. Obtido em Julho de 2016, de <http://www.mercado.co.ao/business/como-se-constroi-a-quarta-maior-ponte-do-pais/>
- MathWorks. (22 de Maio de 2014). Machine Learning with MATLAB. Obtido em 2017 de Fevereiro de 8, de <https://www.mathworks.com/videos/machine-learning-with-matlab-92623.html>
- Mendonça, T., Brito, V., & Milhazes, F. (2013). Aplicação de Gestão de Obras de Arte- GOA- Nova Geração. 7º Congresso Rodoviário Português. Lisboa. Obtido em Setembro de 2016, de http://www.crp.pt/docs/A45S139-41_Art_T6a_7CRP_2013.pdf
- Miranda, J. (Setembro de 2011). Ponte sobre o rio Cunene. *Infrastructure Partnerships for African Development*. Luanda. Obtido em Maio de 2016, de https://www.esi-africa.com/wp-content/uploads/Jose_Miranda.pdf
- National Transportation Safety Board. (1 de Agosto de 2007). *Collapse of I-35W Highway Bridge Minneapolis, Minnesota, August 1, 2007. Accident Report*. Washington, D.C. Obtido em Setembro de 2016, de <http://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/HAR0803.pdf>
- Nebraska Department of Roads. (25 de Janeiro de 2009). Sufficiency Calculation (English units) . Obtido em Setembro de 2016, de <http://www.transportation.nebraska.gov/design/bridge/bipm/BIP-Manual-Appendix-Rev1/Sufficiency-Calculation-English-units-v>
- Nepomuceno, W. (24 de Novembro de 2014). *A guerra civil de angola*. Obtido em Setembro de 2016, de Prezi: <https://prezi.com/zf1inxybpdsw/a-guerra-civil-da-angola/>
- Pereira, J. (Setembro de 2012). *Applicability of the Statistical Pattern Recognition Paradigm for Structural Health Monitoring of Bridges*. Dissertação de Mestrado, Universidade Católica Portuguesa, Faculdade de Engenharia, Lisboa. Obtido em 29 de Novembro de 2016, de <http://repositorio.ucp.pt/bitstream/10400.14/15656/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20de%20Mestrado%20-%20Jo%C3%A3o%20Tiago%20Pereira.pdf>
- Pericão, M., Martins, P., Feliciano, F., & Camuanho, C. (2013). Implementação de um Sistema de Gestão de Obras de Arte em Angola. 3º Congresso Nacional sobre Segurança e Conservação de Pontes. Porto.
- Pissaro, T. (s.d.). *Operação savana - 1975*. Obtido de Memórias, Angola 1951-1975: <http://tpissarro.com/savana.htm>
- Pissaro, T. (s.d.). *A batalha da ponte 14*. Obtido de Memórias, Angola 1951-1975: <http://tpissarro.com/ponte14.htm>

- Ribeiro, J. (23 de Agosto de 2016). As batalhas de bravura no Cunene. *Jornal de Angola*. Obtido em 2017 de Março de 2017, de http://jornaldeangola.sapo.ao/reportagem/as_batalhas_de_bravura_no_cunene
- Ribeiro, J. (30 de Março de 2016). As tentativas de destruição da ponte sobre o rio Cuito. *Jornal de Angola*. Obtido em Julho de 2016, de http://jornaldeangola.sapo.ao/reportagem/as_tentativas_de_destruicao_da_ponte_sobre_o_rio_cuito
- Rito, A., Cabral, P., & Lamy, T. (2008). Ponte sobre o rio Kwanza na Cangandala. *Encontro Nacional de Betão Estrutural*. Guimarães. Obtido em Setembro de 2016, de http://www.arito.com.pt/Backoffice/UserFiles/File/pdfs/BE2008_Cangandala_ResAlargado.pdf
- Rito, A., Feio, R., Pereira, A., Leite, S., & Pereira, D. (2011). *Ponte 4 de Abril. Nova ponte sobre o rio Catumbela*. Mota-Engil, Engenharia e Construções S.A e Soares da Costa, SGPS.
- Rodrigues, A., & Pedro, V. (15 de Novembro de 2016). Batalha de Cuito Cuanavale. *Jornal de Angola*. Obtido em 30 de Novembro de 2016, de http://jornaldeangola.sapo.ao/politica/batalha_do_cuito_cuanavale_foi_tema_de_palestra
- Rosa, K. (3 de Setembro de 2011). Ponte 17 de Setembro aberta à circulação. *Jornal de Angola*. Obtido em Julho de 2016, de http://jornaldeangola.sapo.ao/politica/ponte_17_de_setembro_aberta_a_circulacao
- Sa Bushwar. (10 de Fevereiro de 2014). *A Short Overview of the South African Bushwar / Border War*. Obtido em 23 de Janeiro de 2017, de Geosites.sa_bushwar: <https://sites.google.com/site/sabushwarsite/overview>
- Salasky, H. (2013). *Silver Bridge (Point Pleasant) Collapse*. Obtido em 27 de Fevereiro de 2017, de Wikispaces: [https://failures.wikispaces.com/Silver+Bridge+\(Point+Pleasant\)+Collapse](https://failures.wikispaces.com/Silver+Bridge+(Point+Pleasant)+Collapse)
- Sampaio, M. (11 de 12 de 2013). *Cronologia 1974-2002: Das independências ao fim da guerra em Moçambique e Angola*. Obtido em Agosto de 2016, de DW: <http://www.dw.com/pt-002/cronologia-1974-2002-das-independ%C3%A2ncias-ao-fim-da-guerra-em-mo%C3%A7ambique-e-angola/a-17280940>
- Santos, A., Figueiredo, E., Costa, J., Silva, A., & Miguel, J. (2016). Pattern Recognition for Experimentation of civil engineering. *1º Congresso de Ensaios e Experimentação em Engenharia Civil*. Lisboa.
- Santos, A., Santos, R., Silva, M., Figueiredo, E., Sales, C., & Costa, J. (Fevereiro de 2017). A Global Expectation–Maximization Approach Based on Memetic Algorithm for

- Vibration-Based Structural Damage Detection. *IEEE Instrumentation and Measurement Society*, 66, 661 - 670. doi:10.1109/TIM.2017.2663478
- Santos, L. (2015). *Monitorização da Integridade Estrutural da Ponte 4 de Abril sobre o rio Catumbela em Angola. Resultados obtidos até Outubro 2013*. doi:Relatório 240/2015 – DE/NOE
- Santos, L., Min, X., Silveira, P., & Molares D'Abril, M. (Novembro de 2010). Observação e ensaio da Ponte 4 de Abril sobre o rio Catumbela em Angola. *Encontro Nacional de Betão Estrutural 2010*. Lisboa.
- Secil. (2011). *Prémio Secil 2011 Engenharia Civil. Ponte 4 de Abril na Catumbela, Angola*. Secil.
- Segadães, T. (12 de Fevereiro de 2010). Pontes em Angola. Lições do passado. *Novo Jornal*. Obtido em Junho de 2016, de [http://sta-eng.com/DOCUMENTOS/ARTIGOS/10.02 PONTES EM ANGOLA , LICOES DO PASSADO_ NOVO JORNAL.pdf](http://sta-eng.com/DOCUMENTOS/ARTIGOS/10.02_PONTES_EM_ANGOLA_LICOES_DO_PASSADO_NOVO_JORNAL.pdf)
- SEOP. (3 de Julho de 2015). *Dados comerciais gerais*. Obtido em 27 de Fevereiro de 2017, de seopangola: <http://pt.seopangola.com/project/ponte/>
- Silva, A. (2013). *Comportamento mecânico do betão nas primeiras idades: propriedades e monitorização de deformações*. Dissertação de mestrado, Universidade do Minho, Escola de engenharia, Braga. Obtido em 07 de Março de 2017, de <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/30671/1/Tese%20Andreia%20Silva.pdf>
- Silva, E. (Maio de 2008). *Companhia do Caminho de Ferro- Uma história sucinta da sua formação e desenvolvimento*. Obtido em Maio de 2016, de <https://sites.google.com/site/cfbumahistoriasucinta/>
- Silva, M., Santos, A., Figueiredo, E., Santos, R., Costa, J., & Sales, C. (Junho de 2016). A novel unsupervised approach based on a genetic algorithm for structural damage detection in bridges. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 52, 168–180. Obtido em 10 de Março de 2017, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197616300355>
- Silva, M., Santos, A., Santos, R., Figueiredo, E., Sales, C., & Costa, J. (2017). Agglomerative concentric hypersphere clustering applied to structural damage detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 92, 196–212. Obtido em 10 de Março de 2017, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327017300328>
- Svrisky, A. (2016). *A Guide to Important National Bridge Inventory Terms*. Obtido em Outubro de 2016, de National Bridges: <http://nationalbridges.com/guide-to-ratings>
- Telhabel, Construções. (s.d.). Obtido em 19 de Maio de 2016, de http://www.telhabel-angola.com/_portfolio

Wikipédia. (Maio de 2016). Obtido em Julho de 2016, de
https://pt.wikipedia.org/wiki/Caminho_de_Ferro_de_Benguela

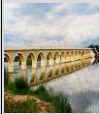
Wikipédia. (Março de 2017). Battle of Cuito Cuanavale. Obtido em 3 de Março de 2017, de
https://en.wikipedia.org/wiki/Battle_of_Cuito_Cuanavale#RicardoLuis

Wikipédia. (2017). *Silver Bridge*. Obtido em 08 de Março de 2017, de Wikipédia:
https://pt.wikipedia.org/wiki/Silver_Bridge

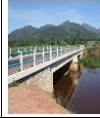
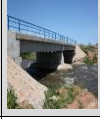
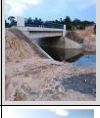
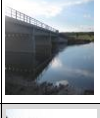
Worden, K., Manson, G., & Fieller, N. (2000). Damage detection using outlier analysis.
Journal of Sound and Vibration, 229, 647-667.

ANEXO

Caraterísticas das pontes angolanas

Caraterísticas das pontes angolanas										
Número	Designação	Data de construção	Soluções estruturais	Seções transversais	Localização	Comprimento total [m]	Largura [m]	Fundações	Observações	Foto
1	Ponte "Dr. Oliveira Salazar" sobre o rio Kwanza, em Cangandala	1954	Ponte em arco	Arcos	Malanje	308,00	10,20	Diretas	Reabilitação em 2008 e 2010	
2	Ponte Barra do Kwanza	1975	Ponte de tirantes	Mista aço betão	Luanda	400,00	11,30	Indiretas	-	
3	Ponte 17 de Setembro sobre o rio Kwanza, na Cabala	2010	Ponte vigada	Viga caixão/Vigas longitudinais	Bengo	1534,00	14,60	Indiretas	Ponte mais extensa em Angola	
4	Ponte da Barra do Dande	2006	Ponte vigada	Vigas longitudinais	Bengo	105,00	10,35	Indiretas	-	
5	Ponte 4 de Abril sobre o rio Catumbela	2009	Ponte de tirantes	Laje nervurada	Benguela	438,00	24,50/22,90	Indiretas	Obra premiada em 2011 pela Secil	
6	Ponte sobre o rio Queve		Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Kwanza-Sul	193,72	9,36	Diretas	Reabilitação em 2005 e 2006	
7	Ponte sobre o rio Cubango	2014	Ponte vigada	Vigas longitudinais	Cuando-Cubango	250,00	11,00	Diretas	-	
8	Ponte sobre o rio Jombo	2011	Ponte vigada	Vigas longitudinais	Malanje	130,00	11,00	Indiretas	-	
9	Ponte do Cubal de Hanha	2009	Ponte vigada	Vigas longitudinais	Benguela	130,00	11,00	Diretas	-	
10	Ponte sobre o rio Cassai	2010	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Lunda-Sul	132,05	11,00	Diretas	-	
11	Ponte sobre o rio Caimbambo	1971	Ponte vigada	Laje maciça	Benguela	110,00	9,20	Indiretas	Reabilitação em 2009	
12	Ponte sobre o rio Zambeze	2013	Ponte vigada	Vigas longitudinais	Moxico	160,00	11,00	Diretas e Indiretas	-	
13	Ponte sobre o rio Curoca	2014	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Namibe	801,00	11,00	Indiretas	Terceira ponte mais extensa em Angola	
14	Ponte sobre o rio Bentiaba	2014	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Malanje	220,00	11,00	Indiretas	-	

Número	Designação	Data de construção	Soluções estruturais	Seções transversais	Localização	Comprimento total [m]	Largura [m]	Fundações	Observações	Foto
15	Ponte sobre o rio Carujamba	2014	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Malanje	160,00	11,00	Indiretas	-	
16	Ponte sobre o rio Cuito	2016	Ponte vigada	Vigas longitudinais	Cuando-Cubango	190,00	11,00	Indiretas	-	
17	Ponte sobre o rio Calutanga	2014	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Namibe	180,00	11,00	Indiretas	-	
18	Ponte sobre o rio Cuiticuiti	2014	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Cuando-Cubango	100,00	11,00	Indiretas	-	-
19	Ponte sobre o rio Manono	2014	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Namibe	180,00	11,00	Indiretas	-	
20	Ponte sobre o rio Mauavar	2010	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Cuando-Cubango	100,00	11,00	Indiretas	-	-
21	Ponte sobre o rio Queve	2012	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Kwanza-Sul	200,00	11,30	Diretas	-	
22	Ponte sobre o rio Cunene	2009	Ponte vigada	Mista aço betão	Cunene	880,00	12,00	Indiretas	Obra foi premiada em 2010 pela SAICE e segunda ponte mais extensa em Angola	
23	Ponte sobre o rio Giraul	2016	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Namibe	600,00	11,00	Indiretas	Quarta ponte mais extensa em Angola	
24	Ponte sobre o rio Queve	-	Ponte vigada	-	Kwanza-Sul	252,00	-	-	Reabilitação em 2003	
25	Ponte sobre o rio Cavaco	2005	Ponte vigada	Mista aço betão	Benguela	172,00	18,00	Indiretas	-	
26	Ponte sobre o rio Mucoso	-	Ponte vigada	-	Kwanza-Norte	210,00	9,00	-	Reabilitação 2005	
27	Ponte sobre o rio M'Bridge	2015	Ponte vigada	Laje maciça	Zaire	400,00	15,00	Indiretas	-	
28	Ponte sobre o rio Coporolo	2011	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Benguela	300,00	11,30	Indiretas	-	
29	Ponte sobre o rio Coporolo	2012	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Benguela	600,00	11,30	Indiretas	-	

Número	Designação	Data de construção	Soluções estruturais	Seções transversais	Localização	Comprimento total [m]	Largura [m]	Fundações	Observações	Foto
30	Ponte molhada sobre o rio Cambamba	2015	Ponte vigada	Laje nervurada	Luanda	92,00	12,00	Indiretas	-	
31	Ponte Kalombotão II	2006	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Benguela	25,40	10,35	Diretas	-	
32	Ponte sobre o rio Caninda	-	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Kwanza-Sul	33,50	8,10	Diretas	Reabilitação entre 2006 e 2007	
33	Ponte sobre o rio Catofe	2007	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Kwanza-Sul	32,00	11,00	Diretas	-	
34	Ponte sobre o rio Nhia II	2008	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Kwanza-Sul	60,00	11,00	Diretas	-	
35	Ponte sobre o rio Luvige	2009	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Lunda-Sul	30,00	11,00	Indiretas	-	
36	Ponte sobre o rio Luxico	2009	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Lunda-Sul	40,00	11,00	Indiretas	-	
37	Ponte sobre o rio Luveto	2009	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Lunda-Sul	22,00	11,00	Diretas	-	
38	Ponte sobre o rio Lualo	2009	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Lunda-Sul	60,00	11,00	Indiretas	-	
39	Ponte sobre o rio Caionda	1974	Ponte vigada	Vigas longitudinais	Benguela	38,40	9,20	Indiretas	Reabilitação em 2009, principalmente nas fundações	
40	Ponte sobre o rio Capaco	2009	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Benguela	20,00	11,00	Indiretas	-	
41	Ponte sobre o rio Lombe	2012	Ponte vigada	Laje nervurada	Malanje	50,00	11,00	Diretas	-	
42	Ponte sobre o rio Cuije	2012	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Malanje	40,00	11,00	Diretas	-	
43	Ponte sobre o rio Mukungo	2014	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Namibe	60,00	11,00	Diretas	-	
44	Ponte sobre o rio Inamangando	2014	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Namibe	80,00	11,00	Indiretas	-	

Número	Designação	Data de construção	Soluções estruturais	Seções transversais	Localização	Comprimento total [m]	Largura [m]	Fundações	Observações	Foto
45	Ponte sobre o rio Massal	2014	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Lunda-Norte	20,00	11,50	Diretas	-	-
46	Ponte sobre o rio Cuilo	2014	Ponte vigada	Mista aço betão	Lunda-Norte	86,00	11,50	Indiretas	-	
47	Ponte sobre o rio Tchifua	2014	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Lunda-Norte	20,00	11,50	Indiretas	-	-
48	Ponte sobre o rio Caluango	2014	Ponte vigada	Mista aço betão	Lunda-Norte	65,00	11,50	Indiretas	-	-
49	Ponte sobre o rio Luange	2014	Ponte vigada	Mista aço betão	Lunda-Norte	86,00	11,50	Indiretas	-	-
50	Ponte sobre o rio Téua-Téua	2013	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Huambo	12,00	11,30	Diretas	-	-
51	Ponte sobre o rio Kusso	2013	Ponte vigada	Mista aço betão	Huambo	38,00	11,30	Indiretas	-	-
52	Ponte sobre o rio Queve	2013	Ponte vigada	Mista aço betão	Huambo	98,00	11,30	Indiretas	-	-
53	Ponte rio Buia	2014	Ponte vigada	Vigas vazadas e justapostas	Bengo	20,00	15,00	Indiretas	-	-
54	Ponte sobre o rio Lifune	2014	Ponte vigada	Vigas vazadas e justapostas	Bengo	60,00	15,00	Indiretas	-	
55	Ponte sobre o rio Viriúá	2014	Ponte vigada	Vigas vazadas e justapostas	Bengo	60,00	15,00	Indiretas	-	-
56	Ponte sobre o rio Onzo	2014	Ponte vigada	Vigas vazadas e justapostas	Bengo	80,00	15,00	Indiretas	-	
57	Ponte sobre o rio Uezo	2014	Ponte vigada	Vigas vazadas e justapostas	Bengo	40,00	15,00	Indiretas	-	-
58	Ponte sobre o rio Chinda	2014	Ponte vigada	Vigas vazadas e justapostas	Bengo	30,00	15,00	Indiretas	-	-
59	Ponte sobre o rio Chinda II	2014	Ponte vigada	Vigas vazadas e justapostas	Bengo	20,00	15,00	Indiretas	-	-

Número	Designação	Data de construção	Soluções estruturais	Seções transversais	Localização	Comprimento total [m]	Largura [m]	Fundações	Observações	Foto
60	Ponte sobre o rio Fotova	2014	Ponte vigada	Vigas vazadas e justapostas	Zaire	40,00	15,00	Indiretas	-	
61	Ponte sobre o rio Loge	2014	Ponte vigada	Vigas vazadas e justapostas	Zaire	180,00	15,00	Indiretas	-	
62	Ponte sobre o rio Bonde	2014	Ponte vigada	Vigas vazadas e justapostas	Zaire	20,00	15,00	Indiretas	-	
63	Ponte sobre o rio Sembo	2014	Ponte vigada	Vigas vazadas e justapostas	Zaire	80,00	15,00	Indiretas	-	
64	Ponte sobre o rio Xinge	2014	Ponte vigada	Vigas vazadas e justapostas	Zaire	40,00	15,00	Indiretas	-	
65	Ponte sobre o rio Cungulo	2014	Ponte vigada	Vigas vazadas e justapostas	Zaire	40,00	15,00	Indiretas	-	
66	Ponte sobre o rio Lufefena		Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Huambo	30,00	11,00	Indiretas	-	
67	Ponte sobre o rio Cuelei	2012	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Cuando-Cubango	90,00	11,00	-	-	-
68	Ponte sobre o rio Luassenha	2012	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Cuando-Cubango	56,00	11,00	-	-	-
69	Ponte sobre o rio Cuchi	2013	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Cuando-Cubango	135,00	11,00	-	-	-
70	Ponte sobre o rio Cuato	2013	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Cuando-Cubango	320,00	11,00	-	-	-
71	Ponte sobre o rio Kwanza I	2013	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Bié	180,00	11,00	-	-	-
72	Ponte Kuiva	2013	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Bié	100,00	11,00	-	-	-
73	Ponte sobre o rio Kwanza II	2013	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Bié	40,00	11,00	-	-	-
74	Ponte Bamba	2013	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Bié	40,00	11,00	-	-	-

Número	Designação	Data de construção	Soluções estruturais	Seções transversais	Localização	Comprimento total [m]	Largura [m]	Fundações	Observações	Foto
75	Ponte Colui	2013	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Bié	40,00	11,00	-	-	-
76	Ponte Lialoa	2013	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Bié	40,00	11,00	-	-	-
77	Ponte Livilasse	2013	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Bié	40,00	11,00	-	-	-
78	Ponte sobre o rio Lussue	2012	Ponte vigada	Mista aço betão	Kwanza-Norte	27,00	9,40	-	Encontros assentados em rochas	
79	Ponte sobre o rio Bengo	Entre 1960 e 1970	Ponte vigada	Vigas longitudinais	Bengo	50,00	-	-	-	
80	Ponte sobre a lagoa do Panguila	-	Ponte em arco	-	Bengo	60,00	-	-	-	
81	Ponte sobre o rio Dande	2009	Ponte vigada	Vigas vazadas e justapostas	Bengo	100,00	-	Indiretas	-	
82	Ponte sobre a ribeira da Xixe	-	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Kwanza-Norte	17,00	9,60	Diretas	-	
83	Ponte sobre o C.F.L	-	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Kwanza-Norte	50,50	-	-	-	
84	Ponte sobre o rio Muria	-	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Kwanza-Norte	19,70	9,60	Diretas	-	
85	Ponte sobre a ribeira do Lussue de baixo	-	Ponte vigada	Mista aço betão	Kwanza-Norte	27,00	-	-	-	
86	Ponte sobre o rio Canbongo	1977	Ponte vigada	-	Kwanza-Sul	92,70	9,20	-	-	
87	Ponte sobre o rio Cubal, no Quicombo	1977	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Kwanza-Sul	116,00	9,10	Indiretas	-	
88	Ponte sobre o rio Uaque na Jamba Calunga	1959	Ponte vigada	-	Kwanza-Sul	24,40	7,50	-	-	
89	Ponte sobre o rio Evale	1979	Ponte vigada	-	Kwanza-Sul	32,80	10,00	-	-	

Número	Designação	Data de construção	Soluções estruturais	Seções transversais	Localização	Comprimento total [m]	Largura [m]	Fundações	Observações	Foto
90	Ponte sobre o rio Balombo, na Canjala	2007	Ponte vigada	-	Benguela	32,00	8,70	-	-	
91	Ponte sobre o rio Cubal de Hanha, no Colango	2007	Ponte vigada	-	Benguela	70,00	8,70	-	-	
92	Ponte sobre o rio Vevel	1966	Ponte vigada	-	Benguela	15,50	9,60	-	-	
93	Ponte sobre o rio Cabumbulo	1966	Ponte vigada	-	Benguela	14,00	7,50	-	-	
94	Ponte sobre o rio Cuhula	1966	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Kwanza-Sul	38,70	9,60	Diretas		
95	Ponte sobre o rio Cuombo	1967	Ponte vigada	-	-	13,50	8,00	-	-	
96	Ponte sobre o rio Cuvelo	1966	Ponte vigada	Mista aço betão	-	36,60	-	-	-	
97	Ponte sobre o rio Longa	1966	Ponte em arco	-	Bengo	394,00	9,60	-	-	
98	Ponte Garganta II	2014	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Namibe	40,00	11,30	Diretas	-	-
99	Ponte ao pk 0+950	2011	Ponte vigada	Laje maciça+ vigas pré-fabricadas	Benguela	72,00	11,30	Indiretas	Alargamento da ponte existente	-
100	Ponte ao pk 9+806	2011	Ponte vigada	Laje maciça+ vigas pré-fabricadas	Benguela	58,00	11,30	Indiretas	Alargamento da ponte existente	
101	Ponte ao pk 18+415	2011	Ponte vigada	Laje maciça+ vigas pré-fabricadas	Benguela	67,00	11,30	Indiretas	Alargamento da ponte existente	-
102	Ponte ao pk 21+290	2011	Ponte vigada	Laje maciça+ vigas pré-fabricadas	Benguela	35,00	11,30	Indiretas	Alargamento da ponte existente	-
103	Ponte ao pk 33+800	2011	Ponte vigada	Laje maciça+ vigas pré-fabricadas	Benguela	42,00	11,30	Indiretas	Alargamento da ponte existente	-
104	Ponte ao pk 35+245	2011	Ponte vigada	Laje maciça+ vigas pré-fabricadas	Benguela	28,00	11,30	Indiretas	Alargamento da ponte existente	-

Número	Designação	Data de construção	Soluções estruturais	Seções transversais	Localização	Comprimento total [m]	Largura [m]	Fundações	Observações	Foto
105	Ponte ao pk 37+700	2011	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Kwanza-Sul	13,80	11,30	Diretas	-	-
106	Ponte ao pk 89+390	2012	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Kwanza-Sul	28,00	11,30	Diretas	-	-
107	Ponte ao pk 94+590	2011	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Kwanza-Sul	13,60	11,30	Diretas	-	-
108	Ponte ao pk 103+950	2012	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Kwanza-Sul	20,00	11,30	Diretas	-	-
109	Ponte ao pk 117+350	2012	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Kwanza-Sul	42,00	11,30	Diretas	-	-
110	Ponte ao pk 123+160	2012	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Kwanza-Sul	42,00	11,30	Diretas	-	-
111	Ponte ao pk 137+760	2012	Ponte vigada	Vigas pré-fabricadas	Kwanza-Sul	20,00	11,30	Diretas	-	-