

Estudos da Ponte Luiz Bandeira em Sejães

José Sena-Cruz

ISISE, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães

Rui M. Ferreira

C-TAC, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães

RESUMO: O presente artigo resume os trabalhos desenvolvidos pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho na Ponte Luiz Bandeira, localizada na N333-3 sobre o rio Vouga próxima da localidade de Sejães (Oliveira de Frades). Estes incluíram diversas vertentes, nomeadamente a caracterização geométrica da ponte, a caracterização física e química dos materiais estruturais existentes, o levantamento da quantidade, estado e disposição das armaduras, o levantamento das principais patologias existentes e a caracterização dinâmica.

1 INTRODUÇÃO

A Ponte Luiz Bandeira, em Sejães, na EN333-3 localiza-se no vale do rio Vouga, a nordeste do lugar desta freguesia, no concelho de Oliveira de Frades, distrito de Viseu. É considerada como sendo a mais antiga ponte de betão armado em utilização no nosso país, e uma das mais velhas da Europa.

Esta ponte em “formigão de cimento armado” foi projectada pelo engenheiro Moreira de Sá e construída pela empresa dos engenheiros construtores Moreira de Sá & Malevez, concessionários em Portugal do sistema patenteado Hennebique de 1882. O projecto da Ponte Luiz Bandeira mostrou-se problemático, havendo conflitos e falhas de comunicação entre Moreira de Sá & Malevez, o Governo Português, e os engenheiros da Hennebique em Paris [Tavares 2008].

As motivações que levaram à selecção do local para a implantação da ponte não são claras. Razões políticas, condições geológicas e geotécnicas favoráveis, bem como necessidades de ligação entre povoações e fundamentalmente desenvolver um elo de ligação entre o Porto e Viseu, são apontadas como sendo as principais razões que terão estado na génese da selecção deste local [Pereira 1998].

Existem muitas incertezas quanto ao início da obra, contudo, este terá ocorrido em 1906. A conclusão da obra foi no dia 14 de Setembro de 1907. O processo de construção foi acidentado, tendo parte da cofragem para a construção do arco da ponte sido arrastado devido a uma grande enchente que ocorreu em 1906 [Tavares 2008].

A estrutura inicialmente tinha 44 m de comprimento, 4.5 m de largura, dos quais 0.75 m para cada um dos dois passeios, com uma única faixa de rodagem com 3 m de largura. Constituída por dois arcos paralelos entre si com 32 m de abertura e uma flecha de 6.4 m. Estes arcos encontram-se unidos entre si por um conjunto de vigas transversais. O tabuleiro assenta em duas vigas longitudinais apoiadas nas extremidades em dois contrafortes de betão (revestidos a betão), a meio pelo arco e entre estes por um conjunto de pilares travados por vigas longitudinais e transversais. A espessura da laje do passeio era de 0.10 m, e a do pavimento era de 0.12 m. Para a construção da obra foram empregues 16 toneladas de aço Bessemer e 60 m³ de betão

("formigão"); o peso total do tabuleiro era cerca de 167 tonf e a sobrecarga considerada para o cálculo da estrutura foi de 78 tonf, no qual corresponde a uma carga uniformemente distribuída de 3.9 kN/m^2 sobre a laje [ROP 1908].

Esta ponte foi construída por trabalhadores maioritariamente residentes nas proximidades da obra, principalmente mulheres e ajudantes, como se observa na Figura 1(a). Os mais especializados, carpinteiros e pedreiros seriam da região, embora alguns pertencessem à empresa construtora Moreira de Sá & Malevez. Por outro lado na Figura 1(b) ilustra-se o tipo de cofragem utilizada durante a fase construção.



(a)



(b)

Figura 1. (a) As operárias da construção; (b) Aspecto da ponte durante a sua construção.

O dia da inauguração da ponte coincidiu com a realização dos ensaios de carga na ponte, talvez para demonstrar aos presentes, alguns ligados à política e à administração local ou regional, as qualidades e aptidões do betão armado. A realização destes ensaios de carga foi da competência da Comissão de Verificação das Pontes Metálicas, o que mais uma vez confirma a inovação e a vanguarda desta ponte. Os ensaios de carga realizados incluíram quatro etapas independentes: colocação de uma sobrecarga uniforme com sacos de areia; preenchimento da ponte com carroças; medição das deformações em pontos opostos durante a passagem de um só carro; e, para concluir, uma sessão de ginástica com 50 homens para verificar as vibrações [Tavares 2008].

A ponte foi notícia de destaque no número 143 da revista "Le Betón Armé" de Abril de 1910 que, para além de uma breve descrição da obra, foram também incluídas as fotos ilustradas nas Figuras 1(a) e 2(a). [Moreira de Sá *et al.* 1910]. Foram colocadas três placas comemorativas, nas extremidades dos arcos a jusante, com o nome da ponte (uma) e com o nome do construtor (duas), como se pode observar na Figura 2(b) [Pereira 1998].



(a)



(b)

Figura 2. (a) Foto da ponte após sua conclusão; (b) Placa comemorativa da construção.

O nome da ponte deve-se ao General Luiz de Mello Bandeira, ilustre figura pública local que, apesar de viver grande parte da sua vida em Lisboa, nunca esqueceu a sua origem tendo, provavelmente, contribuído de forma decisiva para a construção da ponte [Pereira 1998].

Com o passar dos anos, os meios de transportes evoluíram desde os veículos de tracção animal até aos veículos motorizados pesados, resultando num aumento significativo das cargas que conduziram a uma degradação acelerada da estrutura. Assim, a ponte sofreu obras de requalificação que decorreram durante o ano de 1951 e prolongaram-se por mais de meio ano. Recorrendo à técnica de encamisamento (adição de armaduras e uma camada de betão) foram reforçadas vigas, pilares e arco. Para manter a forma original da ponte, os acabamentos das arestas dos pilares e das vigas foram feitos de forma cuidada [Pereira 1998].

Desde essa intervenção a ponte não sofreu obras dignas de registo. Assim, as fotos incluídas na Figura 3 procuram ilustrar o seu estado actual.



Figura 3. Aspecto actual da Ponte Luiz Bandeira.

Existe grande dificuldade em reconhecer a importância do património histórico em betão armado, a fim de garantir a sua protecção e conservação e definir correctamente os critérios para a sua gestão [Mezzina *et al.* 2010]. Em consequência disto, existe um risco grave de muitas construções, ricas em valor arquitectónico e técnico, de não sobreviverem. A Ponte Luiz Bandeira é um exemplo paradigmático pois, com a realização do aproveitamento hidroeléctrico de Ribeiradio – Ermida no rio Vouga, que inclui a construção de uma barragem, prevê-se que a cota da respectiva albufeira conduzirá ao seu desaparecimento da ponte [Cunha *et al.* 2008].

É neste contexto que alguns especialistas maioritariamente do Departamento de Engenharia Civil de Universidade do Minho decidem encetar um estudo da Ponte Luiz Bandeira nas mais variadas vertentes, numa tentativa de manter a memória do passado e preservar o património para o futuro. Estes estudos incluem a caracterização geométrica, a caracterização física e química dos materiais estruturais existentes, o levantamento da quantidade, estado e disposição das armaduras, o levantamento das principais patologias existentes e a caracterização dinâmica através da determinação das frequências principais e modos de vibração.

Assim, nas secções que se seguem resumem-se os principais resultados dos estudos efectuados.

2 CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E MATERIAL

2.1 Levantamento geométrico

Foi efectuado um levantamento geométrico rigoroso da ponte com recurso a equipamentos de precisão. Posteriormente este foi comparado com o facultado pelas *Estradas de Portugal, S.A.*, tendo-se obtido uma concordância praticamente total. Assim, na Figura 6 apresenta-se a geometria actual da ponte.

2.2 Caracterização do betão

Com vista à caracterização do betão existente foram extraídos diversos carotes. Para tal foram seleccionados 20 locais, criteriosamente definidos (ver Figura 4).

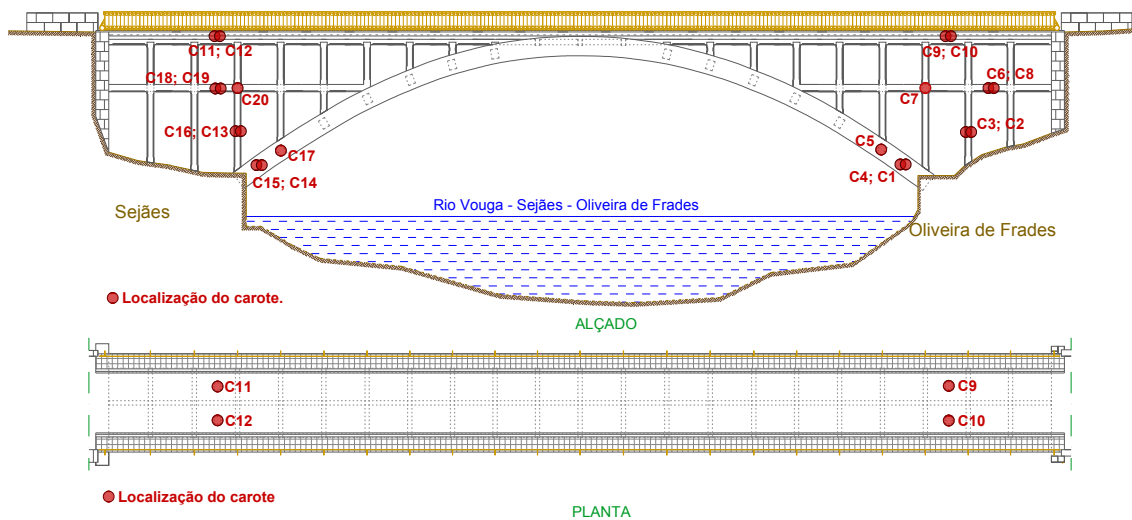


Figura 4. Vista em alçado e em planta da localização dos diversos carotes.

A partir dos provetes extraídos efectuaram-se diversas análises (ver Figura 5), nomeadamente determinação de profundidades de carbonatação, porosidade e densidade, espessura do betão “novo” (resultante da intervenção na década de 50), módulo de elasticidade e resistência à compressão, em conformidade com as recomendações/normas LNEC E391:1993, EN 12390:3, LNEC E397:1993 e NP EN 12390-3:2003, respectivamente. Adicionalmente foram ainda realizadas estudos relativos à composição física do traço (relação entre o teor de material inerte e de ligante), composição química do ligante e do agregado, bem como a distribuição granulométrica e a mineralogia deste último.

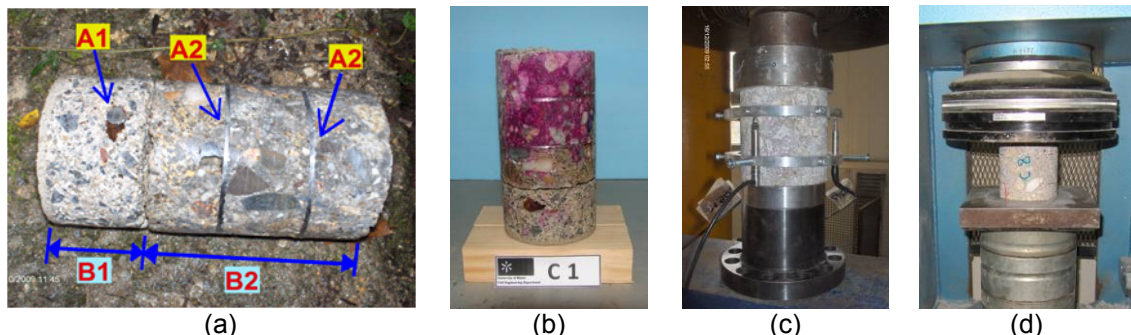


Figura 5. (a) Aspecto do carote após sua extração; (b) Determinação da profundidade de carbonatação; (c) Módulo de elasticidade; (d) Resistência à compressão.

Da análise das profundidades de carbonatação, verificou-se que esta é muito elevada nos provetes de betão retirados do tabuleiro da ponte, variando entre 110 mm a 130 mm. Por outro lado não se observou carbonatação no betão original da ponte, para as vigas, pilares e arco. Os valores da profundidade de carbonatação obtidos para as camadas de argamassa e do betão adicionado durante a intervenção estrutural variam entre 2 mm a 30 mm.

De uma forma geral verificou-se que a porosidade varia de forma significativa com o tipo de elemento estrutural, a qual correspondem densidades do betão relativamente baixas. A elevada porosidade foi obtida sobretudo para os betões usados durante a construção da ponte, devido à provável falta de trabalhabilidade do betão fresco e às condições de compactação usadas na época. Assim, foi possível determinar que a laje é o elemento estrutural com o maior índice de porosidade (11%) e, conseqüentemente, com uma das menores massas específicas (2287 kg/m³). Por sua vez, os pilares têm o menor índice de porosidade (7%) e, conseqüentemente, uma maior massa específica (2326 kg/m³).

Na Tabela 1 resumem-se os resultados obtidos da caracterização mecânica efectuada ao betão “antigo” usado na construção da ponte. As pequenas espessuras do betão mais recente (aquando da requalificação da ponte) impossibilitaram a sua caracterização. De uma forma geral observa-se que o tabuleiro é o elemento estrutural com as propriedades mecânicas mais reduzidas. Em termos médios obteve-se um valor do módulo de elasticidade próximo dos 30 GPa e um betão da classe de resistência C16/20, classificação de acordo com NP EN 13791:2008.

Tabela 1. Espessura de betão e caracterização mecânica do betão “antigo”.

Elemento estrutural	Espessura da camada “nova” (mm)	E_{cm} (GPa)	f_{cm} (MPa)	Classe de resistência
Arco	55	37.1 (n/a)	59.7 (16%)	C35/45
Pilares	35	30.4 (21.3%)	51.2 (34%)	C35/45
Laje do tabuleiro	90	12.8 (12.8%)	22.7 (15%)	C16/20
Vigas transv. e long.	40	28.6 (23.0%)	43.6 (24%)	C30/37
Vigas no int. do arco	40	n/a	24.1 (n/a)	C30/37

Notas: provetes com uma relação altura/diâmetro unitária; a classe de resistência foi determinada de acordo com a NP EN 13791:2008; os valores entre parênteses são os correspondentes coeficientes de variação.

Do estudo da composição física do traço, composição química do ligante e do agregado, bem como a distribuição granulométrica e a mineralogia deste último foi possível concluir que [Ferreira *et al.* 2011]:

- As amostras analisadas têm como ligante um cimento tipo Portland, com traço aproximado de 6.5 partes de agregado para 1 parte de ligante;
- O agregado é uma areia quartzítica/feldspática;
- Em termos de ligante, verifica-se a presença de duas fases, o silicato tri-cálcico e o silicato di-cálcico.

2.3 Caracterização das armaduras

Foram realizados ensaios não destrutivos na estrutura com o objectivo de quantificar a armadura presente em cada elemento estrutural, bem como a determinação da sua disposição. Determinaram-se os espaçamentos e diâmetros dos estribos e das armaduras longitudinais, assim como o número de varões longitudinais. Esta armadura foi obtida através de uma correlação entre os resultados obtidos nos ensaios não destrutivos e a observação dos provetes extraídos da ponte que continham armaduras [Fernandes *et al.* 2011].

Para a detecção da armadura presente na estrutura, foram utilizados dois aparelhos

de detecção de armadura: *Hilti PS200 Ferroskan* e o *Profoscope - PROCEQ*.

Desta análise concluiu-se que na reabilitação estrutural foi adicionada a mesma quantidade de armadura nos pilares, arco e vigas inferiores, sendo constituída por 8 varões longitudinais com um diâmetro de 10 mm, e adicionados estribos (ou cintas – no caso de pilares) com um diâmetro de 10 mm espaçados de 100 mm. Quanto à armadura relativa à construção da ponte, verificou-se que a mesma respeitava os procedimentos indicados nas patentes Hennebique para a construção de edifícios. A título apresentam-se na Figura 7, de forma esquemática, as prováveis configurações de armaduras [Pereira 2010].

Das inspeções visuais efectuadas, geralmente observou-se apenas pequenos focos de corrosão das armaduras mais recentes.

Da análise química efectuada a uma chapa de aço extraída da ponte concluí-se que o teor de carbono revela que é um aço macio. A micro-estrutura é típica de um aço macio, contendo uma quantidade apreciável de inclusões de sulfureto de manganês, conforme se pôde observar através da análise micrográfica realizada [Ferreira *et al.* 2011].

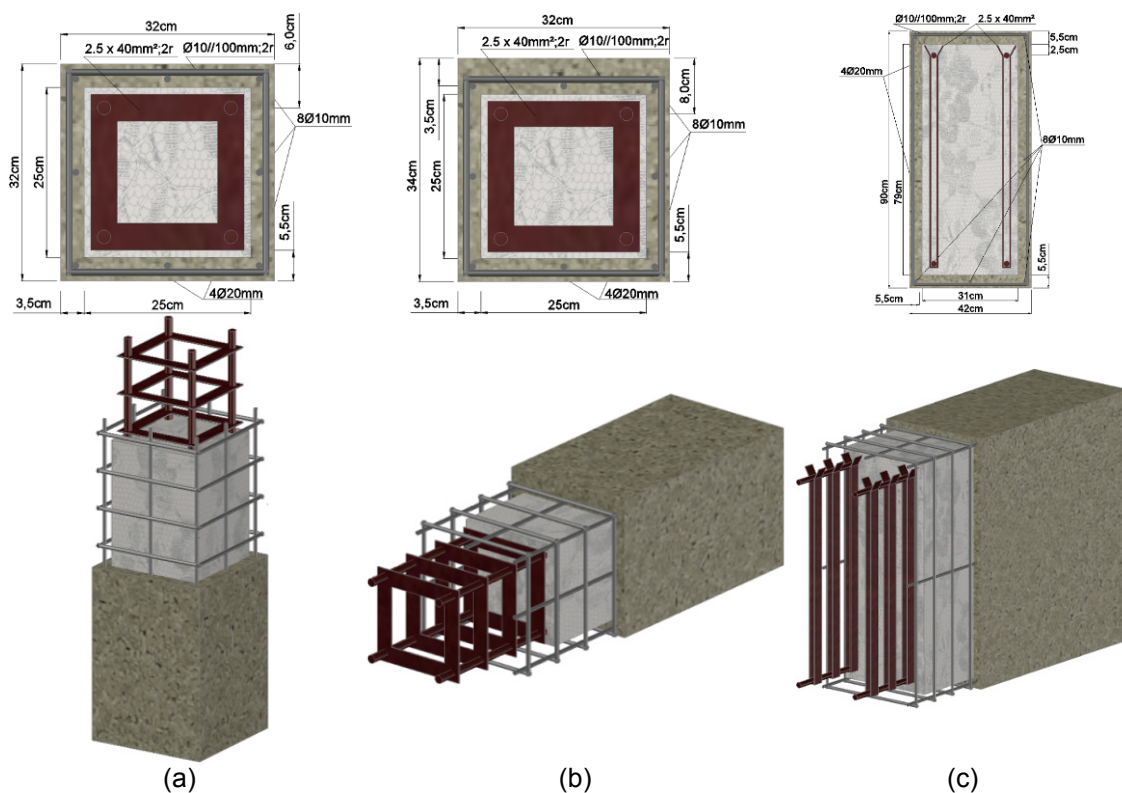


Figura 7. Pormenorização das armaduras com base no levantamento efectuado: (a) pilar tipo; (b) viga entre pilares; (c) arco.

3 CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA

A caracterização dinâmica, realizada através de ensaios de vibração ambiente e de vibração livre, pretendeu determinar frequências e os correspondentes modos de vibração da estrutura via experimental, bem como os coeficientes de amortecimento. Foram criteriosamente seleccionados diversos pontos da estrutura, assinalados na Figura 8, para a colocação dos acelerómetros em cada um dos passeios, junto à faixa de rodagem, de modo a efectuar o estudo dinâmico [Ramos *et al.* 2011].

Com recurso ao software de análise ARTeMIS, na Tabela 2 apresentam-se as 6 primeiras formas modais, frequências (f) e os respectivos coeficientes de

amortecimento (ξ) da estrutura, através da utilização do método *Enhanced Frequency Domain Decomposition* (EFDD) e *Stochastic Subspace Identification* (SSI). A partir dos resultados obtidos observa-se uma boa concordância entre os métodos usados [Ramos *et al.* 2011].

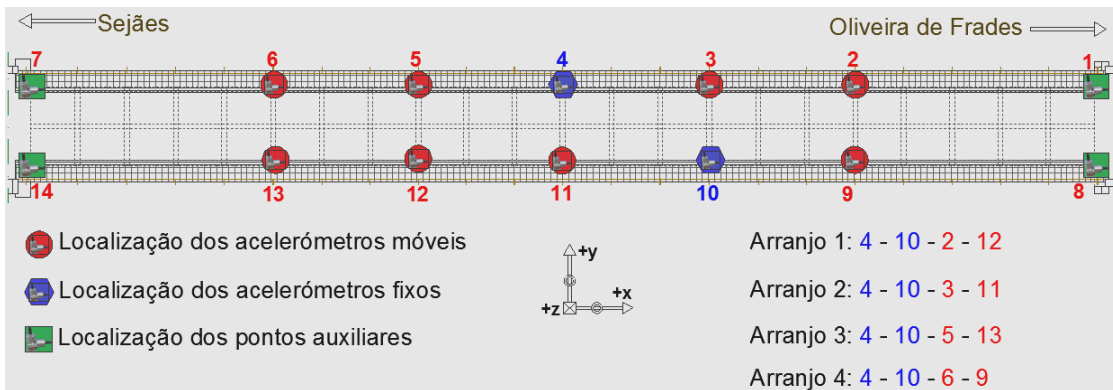


Figura 8. Configuração adoptada nos ensaios dinâmicos.

Tabela 2. Modos de vibração, frequências modais e coeficientes de amortecimento.

Modo	Representação gráfica	Descrição	Método EFDD		Método SSI	
			f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)	ξ (%)
1		Modo Transversal	3.47	1.98	3.52	2.75
2		Modo Vertical - Anti-simétrico	8.07	3.62	8.16	2.60
3		Modo Transversal - Anti-simétrico	8.95	1.74	9.03	2.51
4		Modo Vertical - Simétrico	11.49	2.25	11.49	1.32
5		Modo Vertical - Simétrico	13.91	1.58	12.91	2.24
6		Modo Vertical - Anti-simétrico	18.89	1.47	16.78	2.53

O ensaio de vibração livre permitiu medir a resposta da ponte quando esta é sujeita a uma acção dinâmica de impacto sobre o tabuleiro. A acção de impacto vertical foi criada pela passagem de um veículo sobre um ressalto de madeira colocado

transversalmente à ponte sobre o tabuleiro para várias velocidades de passagem do veículo, no intervalo de 20 km/h a 50 km/h. Neste ensaio foram determinados os valores do coeficiente de amortecimento (ξ), através do ensaio realizado para a velocidade de 50 km/h. Para cada uma das direcções horizontal (Y) e vertical (Z), obtiveram-se através valores médios do coeficiente de amortecimento médio de 2.14% e 1.51%, respectivamente, encontrando-se mais detalhes em [Ramos *et al.* 2011].

4 ESTADO DE CONSERVAÇÃO

Foi realizado um levantamento do estado de conservação da ponte. Este incidiu fundamentalmente na inspecção *in situ* cujos danos se encontram sintetizados na Figura 9.

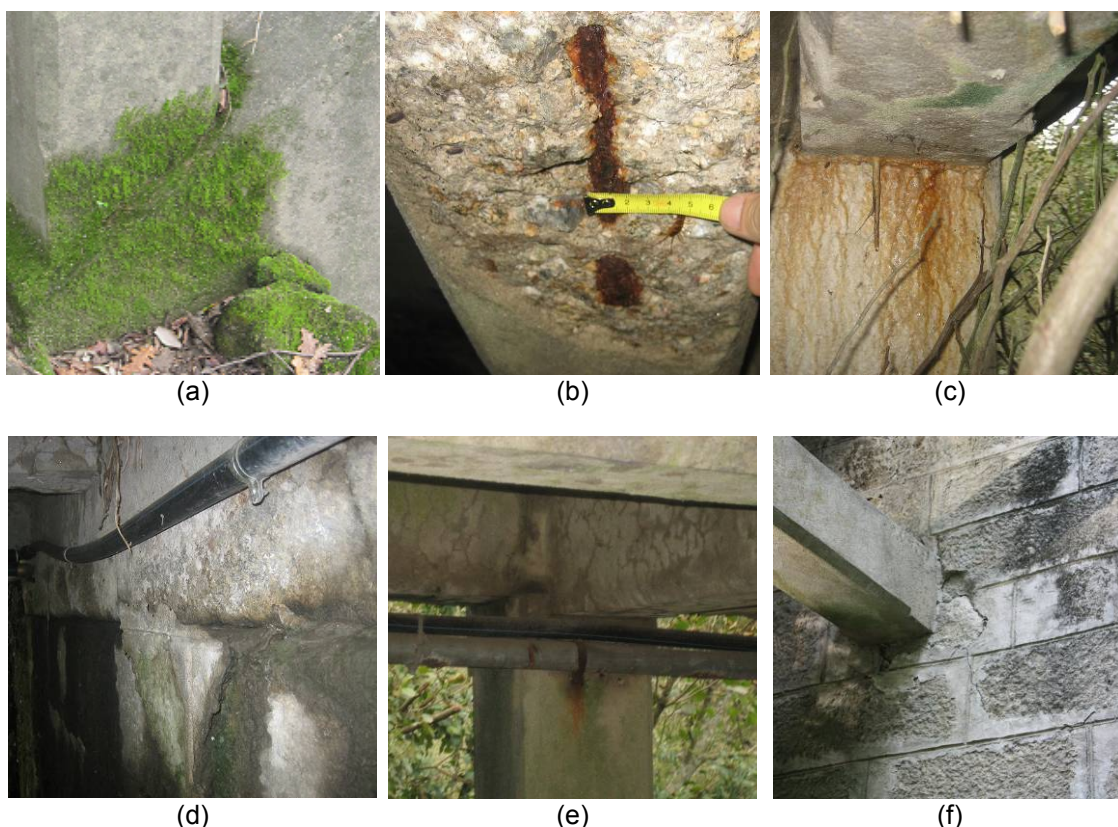


Figura 9. Danos observados na ponte: (a) crescimento de vegetação; (b) corrosão das armaduras e consequente destacamento do betão de recobrimento; (c) lixiviação; (d) humidade nos contrafortes; (e) tubagem suspensa com corrosão; (f) fendilhação ao nível dos contrafortes.

5 CONCLUSÕES

No presente documento detalharam-se os principais estudos sobre a Ponte Luiz Bandeira. Da caracterização mecânica dos materiais estruturais obteve-se um betão da classe C16/20 e o aço macio. Na construção da ponte foi adoptada a pormenorização de armaduras em conformidade com o sistema Hennebique. Da caracterização dinâmica resultou um primeiro modo de vibração transversal com 3.5 Hz. Por último, será de referir que da avaliação do estado de conservação da ponte esta se encontra relativamente bem, sem grandes níveis de dano, face às poucas intervenções de manutenção existentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores do presente trabalho agradecem às seguintes entidades e pessoas que tornaram este estudo possível, nomeadamente:

- Às Estradas de Portugal (EP) e em particular à Eng.^a Elisabete Lopes, por terem autorizado o estudo da ponte e pelos elementos facultados;
- À Câmara Municipal de Oliveira de Frades e em particular à Dra. Elisa Oliveira pela ajuda na reparação da ponte resultante dos ensaios destrutivos efectuados, e pelos elementos facultados relacionados com o aproveitamento hidroeléctrico de Ribeiradio – Ermida;
- Ao Dr. Filipe Soares pelo fornecimento de documentos relacionados com a ponte;
- Aos Bombeiros de Oliveira de Frades pelos elementos de acesso à ponte facultados;
- Aos colegas Professores Luís Ramos e Francisco Fernandes pela realização dos ensaios de caracterização dinâmica e de inspecção das armaduras, respectivamente;
- Ao Eng.º Jorge Gramaxo da Hilti Lda. pela ajuda na inspecção das armaduras;
- Aos alunos de Mestrado Clive Allen, Luana Boromeo, Mir Abdul Kuddus e Márcio Pereira pela activa colaboração nos estudos desenvolvidos.

4 REFERÊNCIAS

- Cunha, S., Morais, C. 2008. Aproveitamento Hidroeléctrico de Ribeiradio - Ermida. F - Estudo De Impacte Ambiental. Volume I - Relatório Síntese. Coba Consultores de Engenharia e Ambiente, Julho de 2008, 647 pp.
- Fernandes, F., Gramaxo, J., Sena-Cruz, J. & Ferreira, R.M., 2011. Diferentes metodologias para a inspecção das armaduras existentes na Ponte Luiz Bandeira em Sejães. *Artigo submetido ao ASCP2011*.
- Ferreira, R.M., Sena-Cruz, J., Castro, F., Abreu, M., Carneiro, L. & Castro, F. 2011. Caracterização do betão da Ponte Luiz Bandeira em Sejães. *Artigo submetido ao ASCP2011*.
- LNEC E397-1993. Betões – Determinação do módulo de elasticidade em compressão. *Especificação LNEC*.
- Mezzina, M., Palmisano, F., Uva, G. 2010. Reinforced Concrete Constructions at the Beginning of the 20th Century: Historical Review and Structural Assessment. In *2010 Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures*.
- Moreira de Sá, B., Malevez, X. 1910. Le béton armé en Portugal. *Le Béton Armé*. Paris. 143. p.56-59.
- NP EN 12390-3:2003. Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio. *CEN – Comité Europeu de Normalização*. Versão Portuguesa: Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 22 pp.
- NP EN 13791:2008. Avaliação da resistência à compressão do betão nas estruturas e produtos prefabricados. *CEN – Comité Europeu de Normalização*. Versão Portuguesa: Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 32 pp.
- Pereira, M.A.M. 2010. Estudo da Ponte Luiz Bandeira em Oliveira de Frades – Análise material e estrutural. *Dissertação de Mestrado*, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho. 130 pp.
- Pereira, S.M.S. 1998. Ponte Luiz Bandeira. *Trabalho de Investigação desenvolvido no âmbito do Seminário Pedagógico*, Escola Secundária de Mira, Coimbra, 33 pp.
- Ramos, L., Aguilar, R. Sena-Cruz, J., Ferreira, R.M. 2011. Caracterização Dinâmica da Ponte Luiz Bandeira em Sejães. *Artigo submetido ao ASCP2011*.
- Revista de Obras Publicas (ROP), 1908. Revista de Obras Públicas e Minas. Associação dos Engenheiros Cívicos Portugueses, Tomo XXXIX, Lisboa, Imprensa Nacional, pp. 25.
- Tavares, A.C., 2008. O Tráfico do moderno. *Tese de Doutoramento*. Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto. 212 pp.