

## Diferentes metodologias para a inspeção das armaduras existentes na Ponte Luiz Bandeira em Sejães

Francisco Fernandes

*Universidade Lusíada, Faculdade de Engenharia e Tecnologias, Vila Nova de Famalicão*

Jorge Gramaxo

*Departamento de Engenharia, Hilti Portugal*

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:** A Ponte Luiz Bandeira cuja construção data de 1907, é uma ponte em arco construída de acordo com o sistema patenteado Hennebique, caracterizado pela introdução de estribos nas vigas, ligando os varões traccionados à zona de betão comprimido. Esses estribos eram constituídos por chapas de aço de secção rectangular dobradas em forma de “U”. Cinquenta anos após a construção da ponte, esta sofreu obras de requalificação tendo os diversos elementos estruturais sido reforçados por encamisamento, com recurso a betão armado. O Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho tem vindo a caracterizar a ponte em termos da técnica de construção e materiais utilizados, bem como o seu desempenho estrutural. Face à complexidade de armaduras existentes na Ponte Luiz Bandeira, foram usadas diferentes metodologias não destrutivas para a sua inspeção, nomeadamente, detectores de armaduras e georadar. As duas técnicas identificaram as armaduras de reforço do encamisamento. Adicionalmente, o georadar permitiu identificar a armadura original da ponte, situada após a armadura de encamisamento, constituída por elementos de maior dimensão e identificar a espessura do encamisamento.

### 1 INTRODUÇÃO

A Ponte Luiz Bandeira, localizada na N333-3 sobre o Rio Vouga próxima da localidade de Sejães (Oliveira de Frades), é hoje considerada como a mais antiga ponte de betão armado em utilização no nosso país, e uma das mais velhas da Europa. Segundo relatos históricos, a ponte terá sido construída num tempo recorde de 3 meses pela empresa Moreira de Sá & Malevez, em 1907.

Esta ponte em arco, ilustrada na Figura 1, com um vão de cerca de 44 m, foi construída de acordo com o sistema patenteado Hennebique datado de 1892. O sistema Hennebique é caracterizado pela introdução de estribos nas vigas, ligando os varões traccionados à zona de betão comprimido [Mezzina]. Os estribos eram constituídos por chapas de aço de secção rectangular dobradas em forma de “U”. Cerca de 50 anos após a construção da ponte, esta sofreu obras de requalificação tendo os diversos elementos estruturais sido reforçados por encamisamento, i.e. adição de novas armaduras e aumento das secções de betão.



Figura 1. Aspecto da ponte Luiz Bandeira.

O Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho tem vindo a efetuar diversos estudos a esta ponte envolvendo diversas entidades públicas e privadas, de forma a caracterizar a técnica de construção utilizada, os materiais utilizados, e o desempenho estrutural da ponte.

Face à complexidade de armaduras existentes na Ponte Luiz Bandeira, foram usadas diferentes metodologias para a sua inspeção, nomeadamente detectores de armaduras, georadar e realização de roços. Assim, no âmbito do presente trabalho, é feita uma descrição das metodologias usadas na inspeção de armaduras, bem como uma análise comparativa dos resultados obtidos para cada uma delas apontando-se as principais vantagens e inconvenientes.

## 2 LOCAIS DE INSPEÇÃO E TÉCNICAS UTILIZADAS

Foram escolhidas algumas áreas onde o conhecimento da armadura seria muito relevante para a caracterização do sistema estrutural assim como para o seu registo (ver Figura 2). Nessas áreas foram, em seguida, utilizadas diversas técnicas não destrutivas para a avaliação desses elementos, nomeadamente: um detector de armaduras utilizando o princípio da indução magnética (Hilti PS 200 Ferroskan), assinaladas na figura a vermelho, e um sistema de georadar com uma antena de elevada frequência (RAMAC/GPR da Mala Geoscience com uma antena de frequência 1.6 GHz), assinaladas a azul.

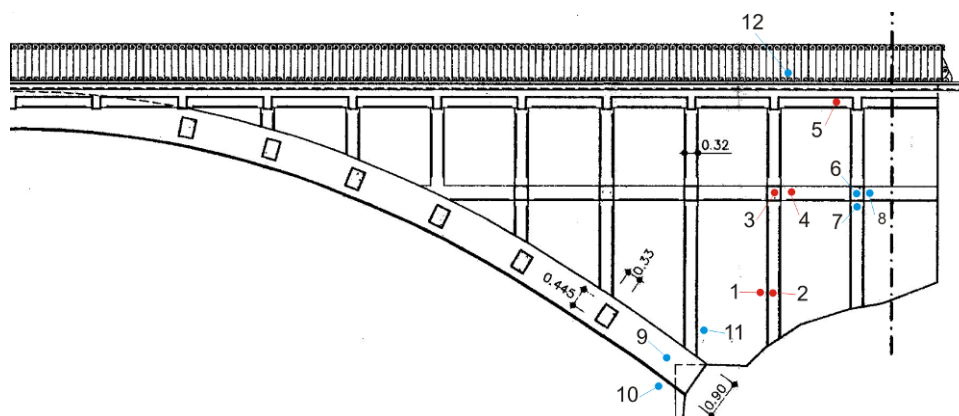


Figura 2. Localização das áreas ensaiadas e das técnicas aí realizadas.

As duas técnicas foram utilizadas de diversas maneiras de forma a otimizar os dados obtidos e tentar recolher o máximo de informação sobre determinado local. O detector de armaduras, ver [Gramaxo], funciona duma maneira relativamente simples e estandardizada, realizando um mapeamento em duas direções ortogonais utilizando uma malha predefinida (ver Figura 3), o que permite mapear situações relativamente complexas muito rapidamente. O programa automático apoia o operador na interpretação dos resultados. Esta metodologia foi aplicada em todos os pontos ensaiados.



Figura 3. Mapeamento dum pilar (lado transversal) e dum nó através do detector de armaduras.

O equipamento de georadar [Daniels], sendo menos estandardizado que o detetor de armaduras, permitiu que fosse aplicado noutros locais para além daqueles que foram realizados com o detetor de armaduras, tendo sido utilizado de diversas configurações, conforme a situação (ver Figura 4). No caso de elementos lineares, foram realizados perfis lineares, tendo sido recolhidos os necessários para a correta interpretação da situação. No caso do nó, foram recolhidos dados para a elaboração de um volume 3D numa tentativa de obter uma melhor visualização deste ponto significativamente mais complexo. Do mesmo modo que no caso do detector de armaduras, foi utilizada uma grelha predefinida para este ensaio. O georadar foi também utilizado no pavimento, numa tentativa de perceber como estão distribuídas as armaduras e a que profundidade elas se encontram.



Figura 4. Perfil georadar linear no nó da estrutura e mapeamento tridimensional no pavimento.

### 3 RESULTADOS DAS INSPECÇÕES E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nesta campanha de inspeções serão apresentados em relação ao método utilizado, já que não foram sempre utilizados os mesmos pontos por ambas as metodologias de ensaio. Assim sendo, uma comparação direta não será possível, sendo realizada uma discussão aprofundada dos resultados a seguir.

### 3.1 Detector de armaduras

O detector de armaduras foi utilizado de maneira idêntica em todos os pontos onde foi executado. Os resultados obtidos em duas posições adjacentes do mesmo pilar e numa viga estão ilustrados na Figura 5, onde é apresentada uma reconstituição das armaduras detetadas, nomeadamente: a localização dos varões e uma estimativa do seu recobrimento e do seu diâmetro. Relativamente a estes dois elementos, foram encontrados os resultados apresentados no Quadro 1. Os resultados obtidos na leitura sob o tabuleiro estão apresentados na Figura 6 assim como no Quadro 1.

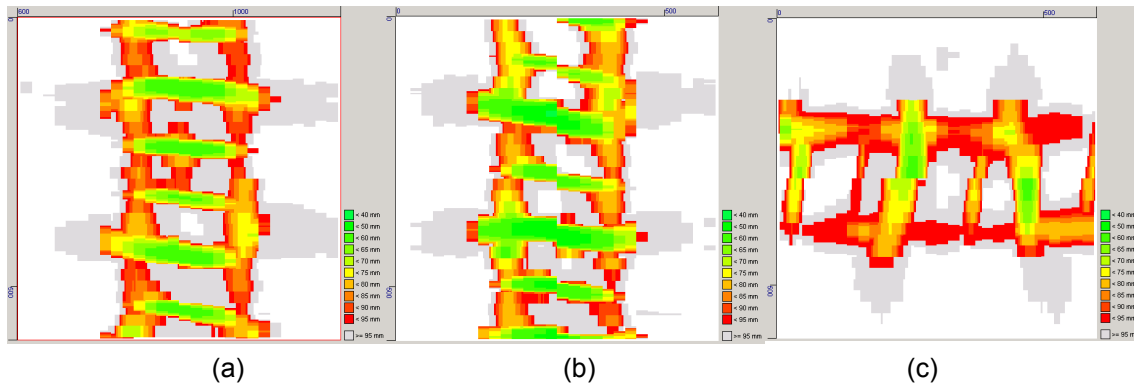


Figura 5. Resultados do detector de armaduras: pilar (a) posição 1 e (b) posição 2 e (c) viga posição 4.

Quadro 1. Resultados da detecção dos diâmetros [mm] médios da armadura no pilar e na viga, acompanhados do correspondente coeficiente de variação (COV).

		Medidos [COV]		Estimados	
		Principal	Cintas/Estribos	Principal	Cintas/Estribos
Pilar	Longitudinal	18.40 [36 %]	8.63 [29 %]	20	10
	Transversal	19.20 [48 %]	11.37 [41 %]	20	10
Viga	Longitudinal	15.67 [49 %]	10.36 [28 %]	16	8
Laje	Longitudinal	10.67 [62 %]		8	
	Transversal	8.24 [34 %]		8	

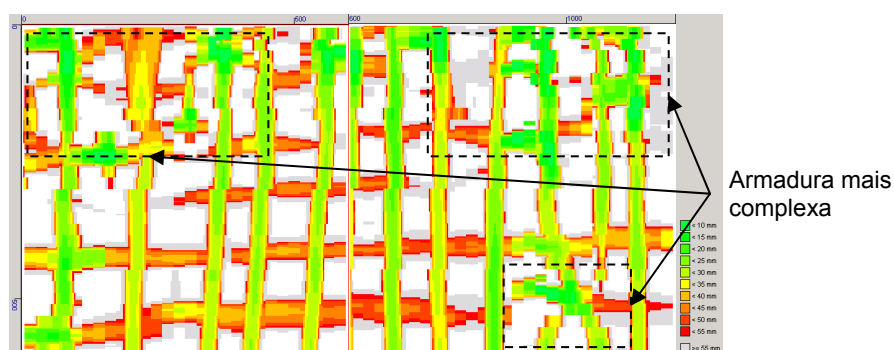


Figura 6. Resultados do detector de armadura por baixo da laje de tabuleiro (posição 5).

Em geral, este método permitiu obter uma imagem da distribuição da armadura presente, sem grande necessidade de intervenção do operador. No entanto, devido ao tipo de tecnologia empregue, só se conseguem detetar os primeiros varões interceptados, não tendo sido obtido nenhum tipo de informações sobre armadura para além da detetada. Adicionalmente, a reconstituição da armadura é calculada sem qualquer tipo de interação com o operador, o que pode introduzir erros devido à complexidade da situação em estudo e devido à idade da estrutura, tendo em conta

que o detetor de armaduras está configurado para trabalhar com estruturas de betão armado recentes.

Adicionalmente verifica-se que a determinação dos diâmetros pelo detetor de armaduras exhibe um elevado grau de incerteza, como se pode verificar pelos elevados coeficientes de variação obtidos. Atendendo à idade da estrutura, a corrosão estará já desenvolvida e de forma não necessariamente uniforme, pelo que é um aspeto que leva aos coeficientes de variação tão dilatados.

Já a variação do valor dos recobrimentos obteve variações inferiores, situando-se, em alguns casos, abaixo dos 20%. A estimativa realizada pelo equipamento, atribuindo um diâmetro e ajustando os recobrimentos também peca por dois pontos: primeiro, aumenta significativamente os valores dos recobrimentos e atribui valores de diâmetros comerciais modernos, o que pode não coincidir com os valores dos diâmetros comerciais existentes no início do século.

Na Figura 6, onde está ilustrada a reconstituição da armadura inferior da laje, observa-se uma maior deficiência na interpretação dos resultados nos cantos e nos bordos devido ao aumento da complexidade que as armaduras apresentam nesses locais. No entanto, observa-se uma certa regularidade no que diz respeito ao espaçamento dos varões. Finalmente, a sondagem realizada no nó da posição 3 (ver Figura 2) está ilustrada na Figura 7. Os resultados mostraram que não parece ter sido colocada armadura adicional nesse local.

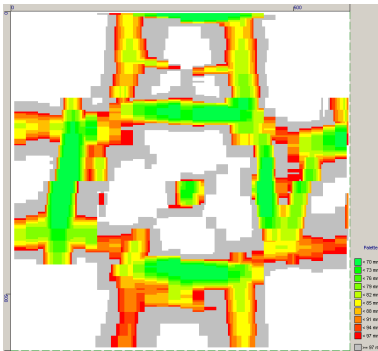


Figura 7. Resultados do detector de armadura num nó entre pilares e vigas (posição 3).

### 3.2 Georadar

Foi realizado um perfil simples com o georadar num pilar e numa das vigas transversais. Em geral, foram efetuadas duas leituras, em lados adjacentes, de maneira a obter informação sobre a armadura em dois dos lados, pressupondo a distribuição simétrica da armadura no pilar, e as faces da viga onde os ensaios eram exequíveis. Os resultados estão apresentados nas Figura 8 e Figura 9.

Relativamente ao perfil realizado no pilar da posição 11 (ver Figura 8 e Figura 2), pode observar-se que a armadura mais à superfície é constituída por varões com um recobrimento relativamente regular, com cerca de 25 a 30 mm, e um espaçamento de 10 cm. O radargrama do lado adjacente mostra uma faixa onde o recobrimento é inferior. O lado oposto foi detectado a cerca de 6 ns, o que resulta numa velocidade média de cerca de 12 cm/ns. Nos radargramas é possível ver uma segunda linha de armadura a cerca de 1.5 ns de profundidade, e que parece corresponder à armadura original do pilar. Tal facto permite apontar para o encamisamento uma espessura superior a 5 cm, confirmada através da medição dessa espessura em carotes. Finalmente, algumas hipérbolas de ampla abertura aparecem em torno dos 4 ns, o que, em termos de profundidade, a localização corresponde à armadura original. Estas hipérbolas num material onde os varões ordinários exibem hipérbolas mais apertadas fazem com que estejamos na presença de elementos mais largos. O que faz apontar para a presença das chapas características do sistema Hennebique.

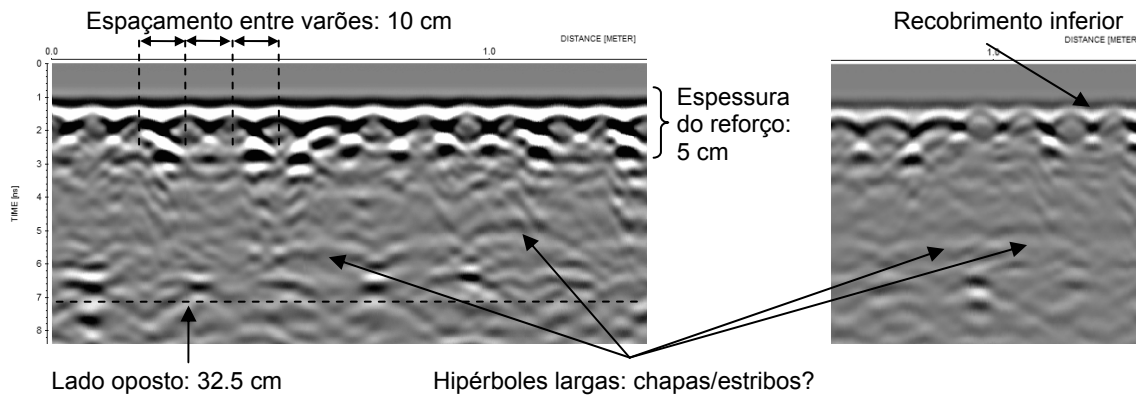


Figura 8. Resultados do georadar no pilar (posição 11).

Na Figura 9, os radargramas ilustram um perfil realizado em cima onde é possível ver a armadura colocada por encamisamento (espaçamento de 10 cm), assim como os sinais da armadura original. No radargrama da direita, observam-se sinais fortes adicionais no meio do radargrama. Parece que é detectada armadura no centro da viga, como se se tratasse dum 3º estribo. No entanto, o espaçamento entre armaduras só deixa “ver” alguns pontos, pelo que não é possível adiantar mais nada.

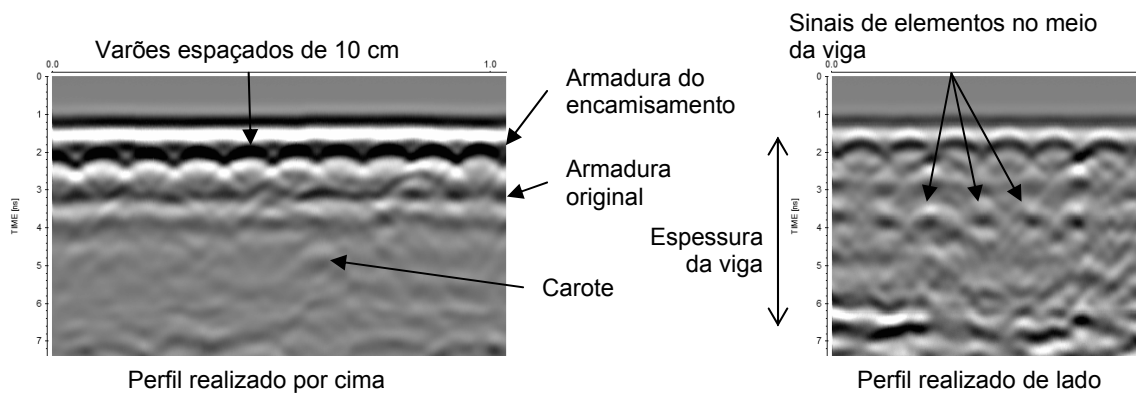


Figura 9. Resultados do georadar numa das vigas transversais (posições 7 e 8).

Nas figuras seguintes estão ilustrados os radargramas obtidos pela execução de leituras no arranque do arco. Na Figura 10 pode-se ver o resultado da leitura realizada sobre a superfície superior, onde se pode unicamente verificar a armadura de encamisamento constituída por varões espaçados de 10 cm e, aparentemente, com recobrimento regular. Logo por baixo vê-se um forte sinal, bastante irregular mas relativamente paralelo à armadura de reforço, que parece corresponder à armadura original.

Foram feitas então leituras laterais, uma segundo a curvatura do arco e outra na horizontal. Os radargramas resultantes estão na Figura 11. Em ambos os radargramas são evidentes os sinais oriundos da armadura original da ponte. Sinais esses claramente diferentes dos produzidos pelos varões de armadura de encamisamento, apresentando um sinal mais plano e mais longo, apontando para um elemento metálico mais largo que um varão ordinário. No entanto, estes parecem mais afastados do que no pilar e viga analisados anteriormente. Nota-se nitidamente que esses sinais estão espaçados de maneira distinta nos dois radargramas. Enquanto no da esquerda parece um sinal contínuo, no da direita os sinais parecem mais separados. Esta diferença parece estar relacionada com a orientação das chapas dos estribos. Adicionalmente, neste último radargrama, é possível observar uma terceira “camada” de sinais que poderá estar associado à armadura original do lado oposto. Os

sinais potencialmente oriundos da armadura original estão espaçados de 12 cm, aproximadamente, o que faz com que o arco tivesse, originalmente, uma espessura de recobrimento bastante elevada, isto é,  $\frac{1}{4}$  da espessura do arco original.

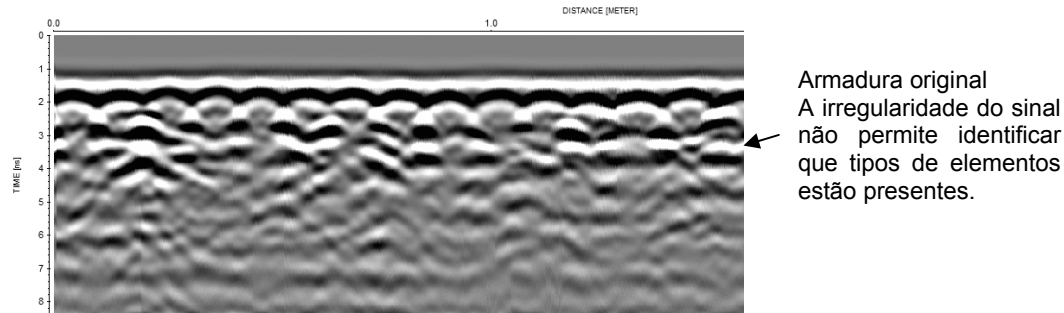


Figura 10. Resultados do georadar no arranque do arco (posição 9 – por cima do arco).

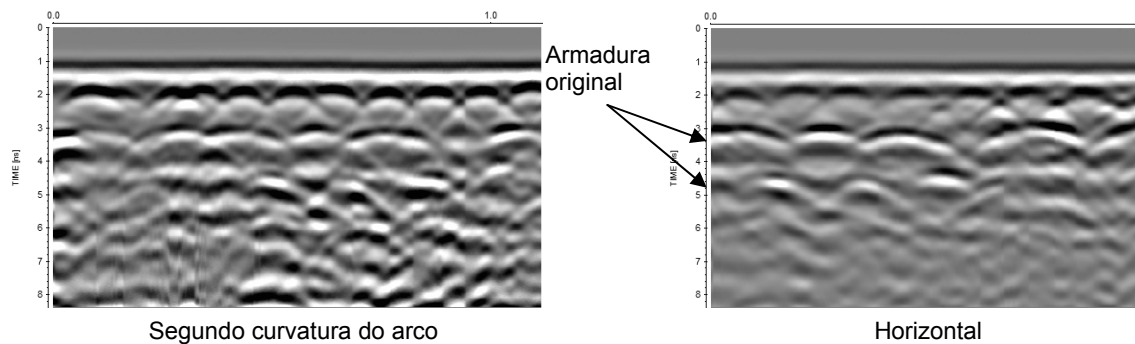


Figura 11. Resultados do georadar no arranque do arco (posição 9 – de lado).

Finalmente, tendo em conta os resultados anteriores, foram efectuadas leituras adicionais para verificar qual a orientação real dos estribos. Na Figura 12 pode ver-se o resultado de dois radargramas realizados verticalmente, numa direcção perpendicular à curvatura do arco. O resultado é um sinal horizontal a cerca de 16 cm da superfície que representa esse estribo.

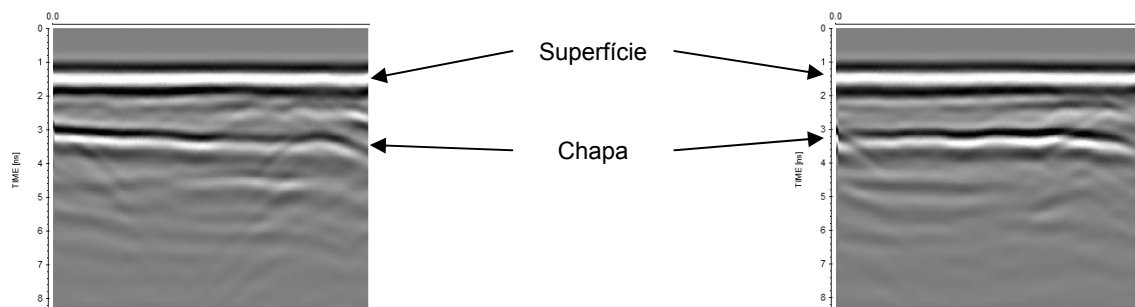


Figura 12. Resultados do georadar no arranque do arco (posição 9 – de lado).

Foram igualmente realizados ensaios no tabuleiro. Contrariamente ao detetor de armaduras, cuja profundidade de leitura é bastante limitada, os ensaios com o georadar puderam ser feitos a partir da superfície superior, o que constitui uma situação mais cómoda para o operador. Os resultados dum perfil transversal e dois perfis longitudinais, um no pavimento e outro no passeio, estão ilustrados nas Figura 13, Figura 14 e Figura 15. A primeira mostra a armadura longitudinal das bermas e no tabuleiro. Enquanto os varões da berma apresentam um espaçamento de cerca de 10 cm e 6-7 cm de recobrimento, verifica-se que no tabuleiro só parece haver armadura na parte inferior. Neste radargrama também é

possível observar um sinal oblíquo, que coincide com o sinal horizontal que pode ser observado na Figura 14.

Finalmente, o último radargrama ilustra a armadura transversal na berma, que coincide com uma armadura regularmente espaçada (10 cm), o que, tendo em conta a armadura longitudinal, verifica-se que, tanto no tabuleiro como nas bermas, a armadura era distribuída sob a forma de grelha de espaçamento uniforme.

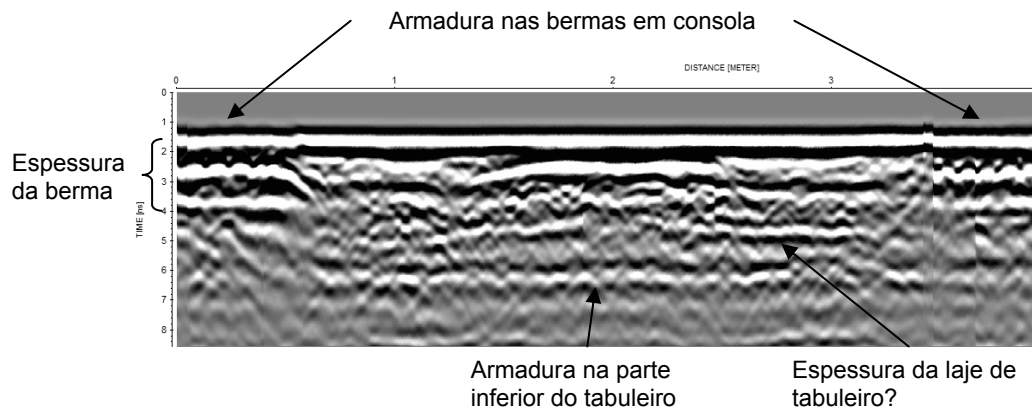


Figura 13. Resultados do georadar no tabuleiro: leitura transversal de berma a berma.

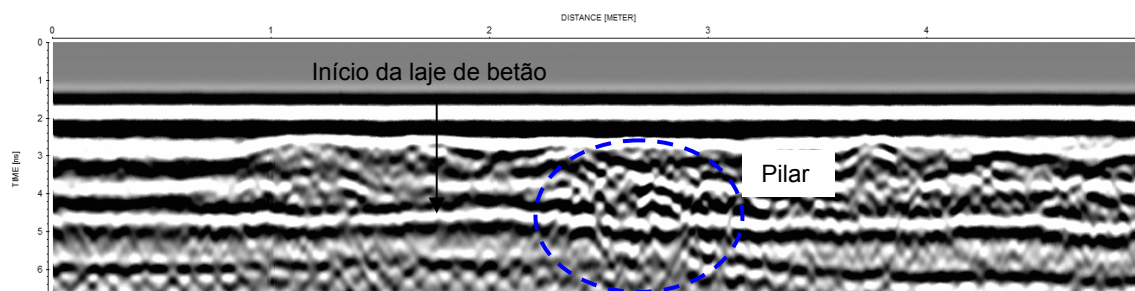


Figura 14. Resultados do georadar no tabuleiro: leitura longitudinal, ao longo do pavimento.

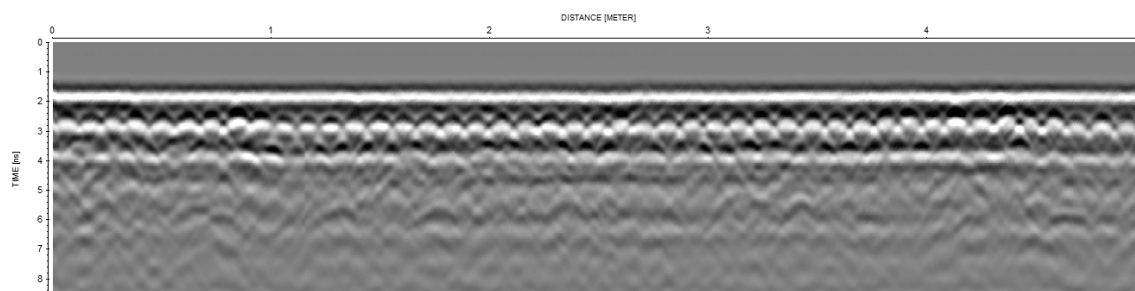


Figura 15. Resultados do georadar no tabuleiro: leitura longitudinal, ao longo da berma.

#### 4 CONCLUSÕES

Foram aplicadas diferentes metodologias para a avaliação da armadura na Ponte Luiz Bandeira, em Sejães, com recurso a duas técnicas não destrutivas: um detetor de armaduras e o georadar. Ambas as metodologias eram de utilização similar e de rápida execução. O primeiro caracterizou-se por uma metodologia sistemática e por uma quase total automatização dos resultados, enquanto no caso do georadar, houve uma maior liberdade em termos de execução e localização das leituras. Adicionalmente, o facto de não haver nenhuma rotina automática permitiu a interpretação mais aprofundada e individualizada de cada radargrama.



Ambas as metodologias permitiram obter a localização e a distribuição dos varões da armadura de encamisamento. No caso do detetor de armaduras, este foi capaz de estimar um valor para o diâmetro e para o recobrimento. No entanto, apresentam ambos elevados coeficientes de variação. Adicionalmente, a informação obtida limitou-se à armadura de reforço. No caso do georadar, não foi possível obter nenhuma informação sobre o diâmetro dos varões. Contudo, os resultados permitem complementar os resultados obtidos através das outras metodologias mostrando onde o recobrimento varia e informação no interior dos elementos estudados. Através dos resultados obtidos com o georadar foi possível estimar a espessura de recobrimento e o espaçamento dos varões de encamisamento, assim como verificar qual foi a espessura do betão de encamisamento nos diferentes elementos. Foi também possível verificar que a orientação aproximada dos estribos no arco da ponte é perpendicular à curva do arco.

## AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à Eng.<sup>a</sup> Luísa Faria o apoio prestado na execução dos ensaios de campo, na interpretação e discussão dos resultados. O segundo autor agradece o pedido do Prof. Sena-Cruz à Hilti para colaborar neste estudo.

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

- Às Estradas de Portugal (EP) e em particular à Eng.<sup>a</sup> 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 efetuados, e pelos elementos facultados relacionados com o aproveitamento hidroeléctrico de Ribeiradio – Ermida;
- Aos bombeiros de Oliveira de Frades por terem facultado elementos de acesso à ponte;
- Ao Dr. Filipe Soares pelo fornecimento de documentos relacionados com a ponte.

## 5 REFERÊNCIAS

- Daniels, D.J. 2004. Ground Penetrating Radar – 2nd Edition. Radar, sonar, navigation and avionics series 15, IEE, London, UK, ISBN 0-86341-360-9, 726p.
- Gramaxo, J. 2010. Detecção e identificação de armaduras em elementos de betão armado. *BE2010 – Encontro Nacional Betão Estrutural*, Lisboa, 10, 11 e 12 de Novembro de 2010.
- Mezzina, M., Palmisano, F & Uva, G. 2010. Ancient clay bricks: Reinforced concrete constructions at the beginning of the 20<sup>th</sup> century: historical review and structural assessment and properties. Em: Bostenaru Dan, Maria, Prikryl, Richard, Török, Akos *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures*. London: Springer. 371. ISBN: 978-90-481-2683-5.

