

## Caracterização do betão da Ponte Luiz Bandeira em Sejães

Rui M. Ferreira

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

José Sena-Cruz

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

Fernando Castro, Miguel Abreu, Leonor Carneiro, Francisco Castro

*CT2M, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Mecânica, Guimarães*

**RESUMO:** 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, com um vão de cerca de 44 m, foi construída de acordo com o sistema patenteado Hennebique datado do final do século XIX. 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. Apesar da idade e do reduzido número de intervenções, a ponte apresenta, de uma forma geral, um nível de danos relativamente reduzido.

Nos últimos tempos o Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho tem vindo a efectuar 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.

No âmbito do presente trabalho, é feita uma descrição das metodologias usadas, bem como os principais resultados obtidos na caracterização do betão existente na ponte. Esta caracterização foi realizada para os diferentes elementos estruturais que compõem a ponte e a diferentes níveis, nomeadamente: geométrica, mecânica e material.

Neste artigo é apresentado o contributo para a caracterização material do betão original empregue na ponte. Assim, é determinado a 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. Adicionalmente, foi caracterizado do ponto de vista químico o aço original.

Pretende-se, desta forma, contribuir para a actualização do estado do conhecimento sobre pontes em betão armado construídas no início do século passado.

### 1 INTRODUÇÃO

São muitos os edifícios e construções de betão armado que remontam ao início do século XX. Há dificuldade em reconhecer a importância do património histórico em betão armado, a fim de garantir a sua protecção e conservação e definir corretamente os critérios para a sua gestão. No que diz respeito ao restauro e reabilitação, a

atenção é geralmente centrada em construções antigas. Ainda não foi definido como é que o moderno poderá ser considerado um património ameaçado [Mezzina 2010].

Especialmente no caso de construções de infraestruturas ou industriais, a consciência da sua importância como património histórico e cultural ainda não é valorizado a nível político e administrativo. Em consequência, existe um risco grave de muitas construções, ricas em valor arquitetónico e técnico, de não sobreviverem. A Ponte Luiz Bandeira é um exemplo paradigmático, estando previsto a sua destruição com a construção de uma barragem próxima, resultando no desaparecimento de património insubstituível.

É deveras importante estudar em detalhe este estilo de construção histórica, e reconhecer suas características e detalhes construtivos, numa tentativa de manter a memória do passado e preservar o património para o futuro.

Assim, no âmbito do presente trabalho, é realizada uma análise ao betão original empregue na construção da ponte. São analisadas duas amostras de betão com o objectivo de determinar o traço (relação entre o teor de material inerte e de ligante), a composição química do ligante e do agregado, bem como a distribuição granulométrica e a mineralogia deste último. Mais informação sobre o desempenho mecânico do betão e da ponte poderá ser consultado em outras referências bibliográficas [Sena-Cruz *et al.* 2011; Ramos *et al.* 2011].

## 2 A PONTE

A Ponte Luiz Bandeira, construída de acordo com o sistema patenteado Hennebique datado de 1892, teve concepção e construção pela firma Moreira de Sá & Malevez, que foi a segunda concessionária da patente Hennebique. O projeto 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].



Figura 1. Vistas laterais da Ponte Luiz Bandeira (N333-3 sobre o Rio Vouga)

O processo de construção foi acidentado, tendo parte da cofragem para o arco da ponte ter sido arrastado devido a uma grande enchente que ocorreu em 1906. Após a conclusão, a ponte foi sujeito a um processo de verificação pela Comissão de Verificação das Pontes Metálicas. São quatro as etapas independentes do processo: 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 está localizada na estrada nacional N333-3 sobre o Rio Vouga próxima da localidade de Sejães (Oliveira de Frades). É considerada como a mais antiga ponte de betão armado em utilização no nosso país, e uma das mais velhas da Europa. A ponte é caracterizada pelo belo arco com um vão de cerca de 44 m ilustrada na Figura 1.

Segundo registos, sabe-se que o betão foi produzido com agregados graníticos extraídos nas imediações da ponte [Pereira 1998]. Da técnica construtiva Hennebique, sabe-se que para a produção de betão era sugerido a seguinte composição: 1 m<sup>3</sup> brita, 0.5 m<sup>3</sup> areia, 300 kg cimento Portland – resultando num volume aproximado de 1.3 m<sup>3</sup> [ROP 1897].

### 3 AMOSTRAGEM E ENSAIOS

De forma a analisar o betão original empregue na construção da ponte, foram extraídos duas carotes, com referências C7 (viga) e C11 (tabuleiro da ponte), ilustradas na Figura 2. O número de provetes recolhidos foi limitado pelo facto da ponte ainda se encontrar em funcionamento. De referir que a carote C7 continha parte de uma armadura em chapa de aço característico da técnica de construção Hennebique – ver Figura 2(a) [Mezzina 2003].

As amostras recolhidas de betão foram analisadas com o objectivo de determinar o traço (relação entre o teor de material inerte e de ligante), a composição química do ligante e do agregado, bem como a distribuição granulométrica e a mineralogia deste último. Da análise, foram excluídos os agregados grossos (godo).



Figura 2. Carotes de betão recolhidas da ponte. (a) C7 – viga, (b) C11 – tabuleiro da ponte.

Para a caracterização quantitativa e qualitativa do agregado seguiu-se a metodologia que em seguida se descreve.

Inicialmente procedeu-se à dissolução de cerca de 500 g de cada uma das amostras (C7 e C11) em solução de ácido clorídrico diluído na concentração de 170 g/L, à temperatura de 60 °C. Nestas condições, a componente cimentícia e calcárea dos betões é dissolvida, permanecendo o material inerte (agregado) no resíduo insolúvel. Após lavagem do mesmo, com água corrente, e secagem, estimou-se, por gravimetria, a percentagem de material inerte. A passagem por peneiros permite a sua caracterização granulométrica.

De seguida efectuou-se a análise química de cada uma das fracções granulométricas obtidas por espectrometria de fluorescência de raios X (XRF).

Foi usado microscópio electrónico de varrimento (SEM), dotado de possibilidade de micro-análise por dispersão de energias (EDS).

De modo a estimar-se a composição química do ligante, procedeu-se à

neutralização da solução clorídrica obtida após a dissolução do mesmo. Para tal, adicionou-se à solução clorídrica uma solução aquosa de amónia a 150 g/L, até se obter um pH superior a 6.5. De seguida, a solução obtida, juntamente com precipitados que tenham ocorrido por hidrólise, foi evaporada e totalmente desidratada. A mistura de precipitados e cristais foi então homogeneizada, por forma a proceder-se à sua análise química. A análise foi efectuada por espectrometria de fluorescência de raios X, retirando-se do resultado o teor de cloro (que deriva do ácido clorídrico usado na dissolução da amostra) e normalizando-se para 100 % em peso.

O aço presente na amostra C7 foi sujeito a uma análise química por espectrometria de fluorescência de raios X e uma análise elementar de teor de carbono.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISE

### 4.1 Agregados

Foi determinado para as duas amostras a quantidade de agregado das argamassas de betão. Verificou-se que para a amostra C7 correspondia a 86.4% da amostra total, e para a amostra C11 correspondia a 87.1% da amostra total. Conclui-se que ambas as amostras apresentam um traço em peso muito similar, de aproximadamente 1:6.5.

No Quadro 1 apresenta-se os resultados da análise granulométrica para as duas amostras. Os resultados da análise química de cada uma das fracções granulométricas obtidas, por XRF são apresentados nos Quadros 2 e 3, para as amostras C7 e C11, respectivamente.

Quadro 1. Distribuição granulométrica do agregado

Fracção	C7	C11
> 1,4 mm	82,4	81,0
> 1,0 mm	5,2	5,9
> 0,5 mm	6,3	6,9
> 0,35 mm	1,6	1,8
> 0,18 mm	2,3	2,4
> 0,075 mm	1,2	1,0
< 0,075 mm	1,0	1,1

Quadro 2. Composição química das fracções granulométricas obtidas na amostra C7 (em % ponderal)

Fracção	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
> 1,4 mm	85,7	5,7	3,7	1,14	0,22	0,54
> 1,0 mm	82,5	8,1	5,8	1,08	0,51	0,24
> 0,5 mm	82,7	8,5	5,7	0,76	0,31	0,40
> 0,35 mm	81,2	9,1	5,8	0,79	0,47	0,44
> 0,18 mm	88,1	5,1	2,7	0,97	0,23	0,62
> 0,075 mm	87,1	5,7	3,3	0,76	0,23	0,57
< 0,075 mm	84,5	7,1	4,3	0,83	0,65	0,63

Quadro 3. Composição química das fracções granulométricas obtidas na amostra C11 (em % ponderal)

Fracção	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
> 1,4 mm	87,1	6,4	3,9	0,49	0,34	0,30
> 1,0 mm	86,0	6,7	5,1	0,37	0,38	0,11
> 0,5 mm	84,7	7,3	5,8	0,57	0,24	0,33
> 0,35 mm	85,1	6,8	4,4	1,09	0,29	0,58
> 0,18 mm	89,1	4,7	2,5	0,86	0,18	0,63
> 0,075 mm	86,4	6,0	3,5	0,72	0,38	0,62
< 0,075 mm	81,8	8,7	4,8	0,84	0,93	0,87

Procedeu-se ainda à observação das fracções mais grosseiras (>1,4 mm) e mais finas (<0,075 mm) recorrendo a SEM, dotado de possibilidade de micro-análise por EDS.

Na Figura 3 ilustram-se as observações efectuadas, indicando-se os constituintes mineralógicos que foram identificados a partir dos resultados da micro-análise. Nas Figuras 3(a) e 4(a) identificam-se grãos de quartzo e grãos mistos de feldspato potássico e de feldspato sódico.

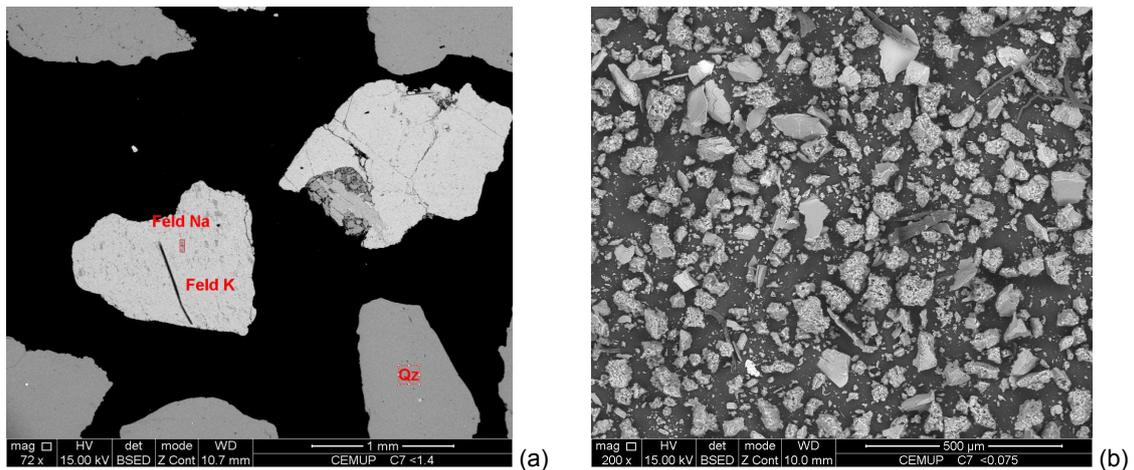


Figura 3. Observação da amostra C7 com SEM, (a) fracção > 1,4 mm, (b) fracção < 0,075 mm

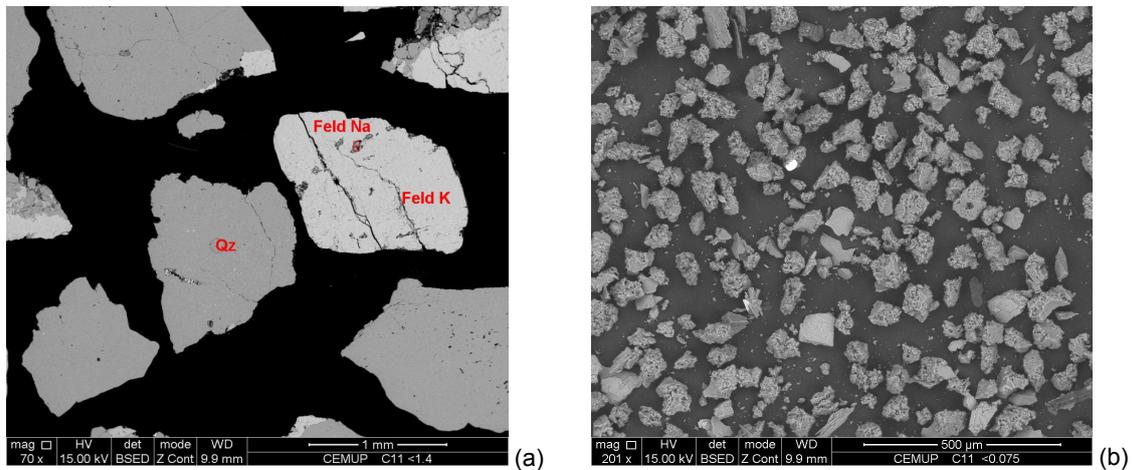


Figura 4. Observação da amostra C11 com SEM, (a) fracção > 1,4 mm, (b) fracção < 0,075 mm

Nas fracções mais finas de ambas as amostras, para além da presença de abundante de quartzo e, em menor grau, de feldspato potássico, encontraram-se também partículas de óxido de ferro e de alumino-silico-titanatos de ferro, como evidencia o espectro da Figura 5.

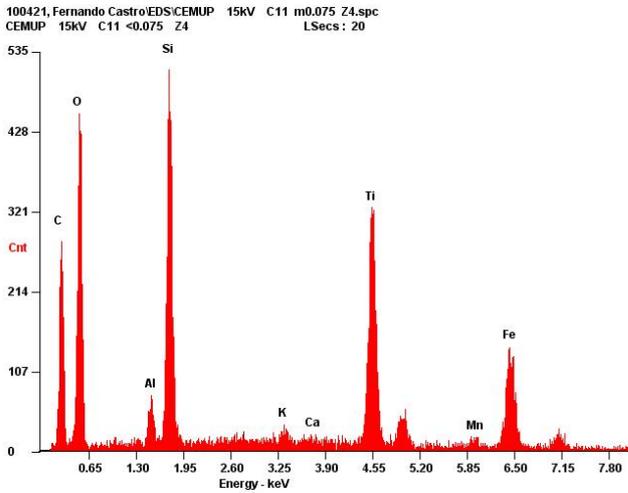


Figura 5. Espectro EDS de uma partícula na amostra C11 (fracção < 0,075 mm)

#### 4.2 Ligante

Os resultados da análise química realizado por XRF para cada uma das amostras são apresentados no Quadros 4. Com estes resultados, constata-se que o ligante se trata de um cimento tipo Portland. No Quadro 5 apresenta-se a estimativa das principais fases cristalinas do cimento Portland, com base nas equações de Bogue [1947].

Quadro 4. Composição química estimada dos ligantes (distribuição percentual)

Óxido	C7	C11
CaO	59,2	58,4
SiO <sub>2</sub>	22,6	21,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,5	6,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,1	6,9
MgO	1,0	1,1
K <sub>2</sub> O	1,2	0,9
Na <sub>2</sub> O	0,55	0,62
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,1	1,0
SO <sub>3</sub>	1,1	1,4
TiO <sub>2</sub>	1,1	1,8
MnO	0,19	0,13
SrO	0,22	0,23

Quadro 5. Teor de constituintes estimado no ligante (distribuição percentual)

Óxido	C7	C11
C <sub>3</sub> S - alite	20	18
C <sub>2</sub> S - belite	49	47
C <sub>3</sub> A – celite	4	7
C <sub>4</sub> AF – ferrite	19	19
Gesso	2,4	3,0

Constatando-se a grande similitude, em termos de composição química, entre as duas amostras, procedeu-se à observação das mesmas em microscopia electrónica de varrimento. A estrutura evidenciou a presença de um ligante constituído por duas fases, conforme ilustra a Figura 6. Verifica-se a presença de duas fases no ligante, silicato tri-cálcico (Z1) e silicato di-cálcico (Z2).

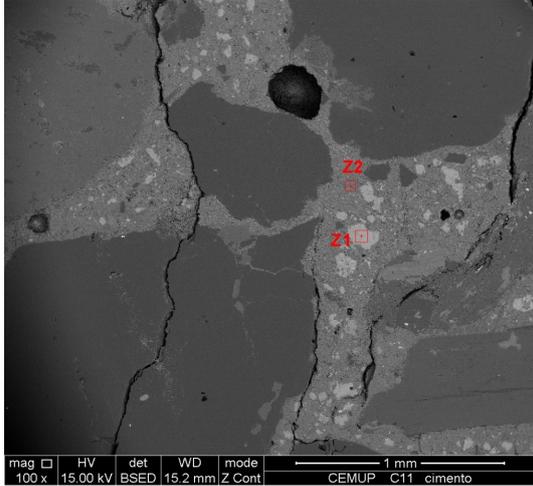


Figura 6. Micro-estrutura da argamassa, observada em SEM, em modo de contraste de número atómico. Verifica-se a presença de duas fases no ligante, silicato tri-cálcico (Z1) e silicato di-cálcico (Z2).

#### 4.3 Aço

Os resultados da análise química realizado por XFR e análise elementar de carbono à chapa de aço incorporado como reforço na amostra C7 são apresentados no Quadro 6. O teor de carbono revela que é um aço macio. A amostra foi então polida e observada em SEM. A micro-estrutura é típica de um aço macio, contendo uma quantidade apreciável de inclusões de sulfureto de manganês, conforme se ilustra na micrografia obtida (Figura 6).

Quadro 6. Composição química do aço (distribuição percentual)

Elemento	Aço
C	0,03
Mn	0,48
Si	0,04
P	0,067
S	0,050

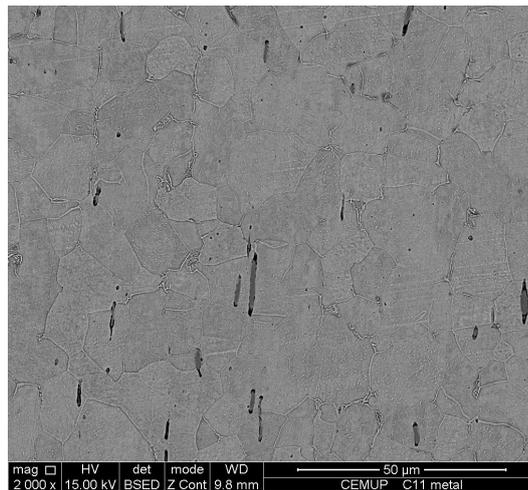


Figura 7. Micrografia da amostra de aço presente na argamassa C7

## 5 CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado um contributo para a caracterização material do betão original empregue na ponte Luiz Bandeira cuja data de construção desta é 1907. Foi determinado a composição física do traço, composição química do ligante e do agregado, bem como a distribuição granulométrica e a mineralogia deste último. Adicionalmente, foi caracterizado do ponto de vista químico o aço original.

O trabalho experimental apresentado foi baseado num número limitado de amostras que poderá não ser totalmente representativo da ponte em estudo. Contudo, e tendo por base os resultados obtidos dos ensaios efetuados, pode concluir-se que:

- 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;
- As duas amostras analisadas são muito similares, em termos químicos e estruturais;
- O aço usado como reforço é um aço macio com muito baixo teor em carbono.

## AGRADECIMENTOS

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.

## 6 REFERÊNCIAS

- Bogue, R.H. 1947. Chemistry of portland cement. Reinhold Publishing Corporation. New York. 61-67.
- Mezzina, M., Palmisano, F., Uva, G. 2010 Reinforced Concrete Constructions at the Beginning of the 20th Century: Historical Review and Structural Assessment. In Dan, M.B. et al. (eds.), 2010 Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures. DOI 10.1007/978-90-481-2684-2\_16
- Mezzina, M., Uva, G., Mastrodonato, M. 2003. Historical examples of early reinforced concrete structures. The Viaduct of Corso Italia in Bari: a Hypothesis for the Reuse. in Proc. 1st International Congress on Construction History, Madrid. Huerta, S. et al. (ed.)
- Pereira, S.M., 1998. Ponte Luiz Bandeira. Relatório de investigação não publicado. Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra.
- Ramos, J.L., Sena-Cruz, J., Ferreira, R.M., 2011. Caracterização Dinâmica da Ponte Luiz Bandeira em Sejães. Artigo submetido ao ASCP 2011.
- Revista de Obras Publicas, 1897. Las construcciones de cemento armado, sistema Hennebique. Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid. 44, tomo I (1116): 122-124.
- Sena-Cruz, J., Ferreira, R.M., 2011. Estudos da Ponte Luiz Bandeira em Sejães. Artigo submetido ao ASCP 2011.
- Tavares, A.C., 2008. O Tráfico do moderno. Tese de Doutoramento. Faculdade de Arquitectura da Universidad do Porto. 212 pp.