

MONITORIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE UMA PONTE NOVA EM ARCOS DE ALVENARIA DE PEDRA

Arêde, A.¹; Costa, A.²; Costa, C.,³; Barbosa, C.⁴; Costa, P.⁵

¹Prof. Auxiliar, ²Prof. Associado com Agregação
Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

³Assistente,
Departamento de Engenharia Civil
Escola Superior de Tecnologia, Instituto Politécnico de Tomar

⁴Eng^a Civil,
FiberSensing – Sistemas Avançados de Monitorização, S.A

⁵Eng^o Civil,
Aluno de Mestrado de Estruturas em Engenharia Civil



RESUMO

Apresenta-se o caso de uma nova ponte em alvenaria de pedra, construída de raiz, que está a ser instrumentada para monitorização do seu comportamento estrutural sob a acção de cargas de serviço. Abordam-se os objectivos da monitorização da ponte e descreve-se a instrumentação efectivamente adoptada nesta obra nova de características singulares. Refere-se os aspectos básicos do sistema de aquisição de dados. Não são apresentados resultados de registos, por não estar ainda concluída a instalação de todos os sensores.

1- INTRODUÇÃO

Tal como em muitos outros países europeus, existe em Portugal um grande número de pontes em arco de alvenaria de pedra, a maioria delas sujeitas a elevadas cargas de tráfego para as quais não foram projectadas. Algumas dessas construções exibem sinais claros de degradação e falta de manutenção que, por vezes, suscitam sérias dúvidas sobre o nível de segurança que podem garantir sob condições de serviço.

Neste contexto a possibilidade de monitorizar e analisar o comportamento estrutural real de uma ponte em arco de alvenaria de pedra, constitui uma

importante mais-valia para o conhecimento sobre este tipo de estruturas.

O trabalho que se apresenta enquadra-se numa iniciativa da Câmara Municipal de Felgueiras de construir uma ponte de alvenaria de pedra sobre o Rio Vizela, em Vila Fria, em substituição de uma antiga passagem (figura 1) com graves condições de segurança estrutural.

A FEUP e o Instituto da Construção (IC) apoiaram esta iniciativa aproveitando-a para fins científicos por se enquadrar numa linha de investigação sobre estruturas antigas iniciada há vários anos no Departamento de Engenharia Civil.



Fig 1- Vista geral da antiga passagem existente

O trabalho relativo ao projecto, construção e estudo do comportamento da ponte assume carácter pluridisciplinar, abarcando diversas componentes, tais como: modelação e análise estrutural; experimentação local e em laboratório para calibração de modelos numéricos; instrumentação e medição de parâmetros estruturais e dos materiais; aquisição remota de dados e monitorização de comportamento à distância.

Não estando ainda finalizada a instalação de todos os sensores, pretende-se com o presente artigo apenas descrever a instrumentação usada para registar a resposta estrutural da ponte, com referência ao sistema de aquisição de dados adoptado. Pelas dificuldades e particularidades da obra, as fases essenciais da instalação dos sensores são também abordadas sumariamente.

Por motivos alheios e contrários à vontade dos autores (dos quais os três primeiros são também responsáveis pelo projecto) a obra entrou já em serviço sem que tivesse sido ainda realizado o ensaio de carga, razão pela qual não existem ainda registos integrados do conjunto de todos os sensores. Não obstante, o referido ensaio de carga está previsto para ser realizado até ao fim de 2005, quando toda a instrumentação estiver colocada, verificada e calibrada (em particular face à temperatura) nas reais condições de obra.

2- A NOVA PONTE DE VILA FRIA

Em face de requisitos arquitectónicos específicos, foi proposto o projecto que se ilustra na figura 2 [Costa, Arede e Costa (2002)], onde se pode observar que se trata de uma ponte materializada por cinco arcos, com vãos de 4.8 a 6.0 m, apoiados

em quatro pilares e dois encontros, dando apoio a um tabuleiro com um vão total de 60 m e 6 m de largura.

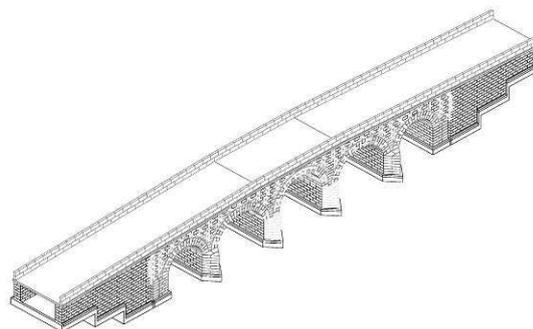


Fig 2- Perspectiva do projecto da nova ponte

A estrutura foi fundada em grupos de micro-estacas encabeçadas por maciços de betão armado em que assentam os pilares.

Tal como os arcos e os muros-tímpano, os pilares foram realizados em alvenaria de pedra aparelhada de granito, assente com uma fina camada de argamassa de cal especificamente estudada e produzida para o efeito [Secil (2002)].

Sobre o extradorso dos arcos e entre muros-tímpano, foi colocado enchimento de *tout-venant* que, na zona mais superficial, incluiu também uma pequena percentagem de cimento Portland. Após o enchimento foi realizada uma camada de regularização destinada a receber o revestimento de telas asfálticas de impermeabilização, sobre o qual foi colocada uma camada de traço-seco (areia e cimento em reduzida percentagem, sem adição de água) destinada ao assentamento do pavimento final em lajeado de granito.

A construção da ponte começou no início de 2002 e terminou em Abril de 2005, com o aspecto ilustrado na figura 3.



Fig 3- Aspecto final geral da nova ponte (montante)

3–OBJECTIVOS DA MONITORIZAÇÃO

A monitorização desta obra surge na sequência de um anterior trabalho de modelação e análise estrutural de um caso similar [Costa (2002)], durante o qual foram sentidas grandes dificuldades na calibração de parâmetros materiais e estruturais, assim como na confirmação dos resultados numéricos obtidos; nesse trabalho foram ainda identificados alguns aspectos carecendo de melhor estudo, nomeadamente a influência da rigidez do enchimento e dos muros-tímpano nos esforços dos arcos.

A possibilidade de acompanhar e monitorizar uma obra deste tipo desde a sua construção, constituiu assim uma excelente oportunidade para estabelecer e calibrar técnicas de modelação analítica adequadas para a simulação numérica de outras construções semelhantes existentes. A monitorização em contínuo da ponte por um largo período de tempo materializa um laboratório vivo que permite avaliar e sistematizar os principais aspectos do comportamento estrutural deste tipo de pontes e sua relação com as patologias estruturais frequentemente observadas.

Neste contexto procurou-se dotar a nova ponte de uma instrumentação capaz de fornecer medições relativas a:

- i.* deslocamentos globais da estrutura, em especial no coroamento dos arcos;
- ii.* deslocamentos relativos das juntas entre blocos de pedra, nomeadamente abertura/fecho e escorregamento;
- iii.* deslocamentos relativos entre muros-tímpano opostos;
- iv.* deformações e tensões em alguns blocos dos arcos;
- v.* pressões verticais no material de enchimento;
- vi.* temperatura.

Através de registos resultantes da referida instrumentação, pretende-se aferir a deformada da estrutura (global e local, nas juntas) obtida de simulações numéricas

por comparação com a observada sob a acção de cargas reais controladas.

As medidas de deformações e tensões elásticas que lhe estão associadas nos blocos de pedra, bem como as pressões no enchimento, deverão permitir esclarecer o encaminhamento e distribuição de tensões entre arcos, enchimento e pilares, e aferir os correspondentes resultados numéricos.

Por fim, a medição de temperatura em diversos locais da ponte, em particular próximo de alguns sensores, destina-se essencialmente a permitir fazer correcções aos registos por forma a entrar em linha de conta com os efeitos da temperatura.

4–INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação adoptada para a monitorização consiste num vasto número de sensores do tipo a seguir descritos, conforme o género e medida em causa.

4.1 - Deslocamentos globais

A dimensão da obra e a inexistência de pontos ou estruturas físicas de referência permanentes, limitou a escolha de sensores apropriados para medir deslocamentos globais ao longo da ponte. Porém, durante certas fases da obra, como por exemplo as operações de descimbre dos arcos, foi possível instalar transdutores de deslocamento clássicos (LVDT's) e comparadores digitais, sobre um pórtico de referência exterior à ponte, e assim acompanhar os seus movimentos principais (figuras 4a e 4b).

No entanto, em permanência torna-se impossível dispôr dessa estrutura de referência, pelo que se optou por instalar uma rede de sensores de pressão piezoresistivos de grande sensibilidade que medem a variação de pressão de um fluído existente num tubo com uma das extremidades ligada à pressão atmosférica e outra ligada a uma porta do sensor (figura 5). A variação de posição altimétrica da extremidade livre ou do sensor, ambas ligadas rigidamente aos pontos cuja variação de nível se pretende medir, origina uma alteração de pressão

que é captada pelo sensor e transformada num sinal eléctrico proporcional à variação de nível ocorrida. Pelo facto de serem usados para medir variações de nível, são designados por sensores de nível.



Fig 4a- Descimbre de um arco. Pórtico de referência para comparadores e LVDT's.



Fig 4b- Descimbre de um arco. Comparador digital e LVDT no coroamento do arco.



Fig 5- Sensor de pressão, respectivo tubo e reservatório para medição de desníveis.

Foram então adoptados sensores da gama 160PC da marca Honeywell [Honeywell], adequados para um intervalo de pressões entre 0 m.c.a. e 0.254 m.c.a.. Com o sistema de leitura a utilizar,

equipado com placas de 12 bits, este intervalo proporciona uma resolução inferior a 0.1mm, que é suficiente para os deslocamentos previstos.

Os sensores baseiam-se no funcionamento de uma ponte de Wheatstone e fornecem um sinal eléctrico amplificado entre 1.5V e 9V, aproximadamente, para uma tensão de alimentação de 12V.

Não tendo sido possível dispôr de um ponto fixo na margem que servisse de referência para deslocamentos verticais, e dado que, os esforços mais significativos na estrutura deverão ocorrer por movimentos diferenciais entre o vão dos arcos e os seus pilares de apoio, optou-se então por colocar uma série de sensores que permitissem obter aqueles deslocamentos verticais relativos ao longo da ponte.

Para tal, foram adoptados quinze sensores que serão colocados no interior da ponte e sobre os pilares (figuras 6a e 6b), mais propriamente sobre colunas rígidas circulares de betão encastradas na face superior dos pilares junto à nascença dos arcos e no lado interior jusante dos muros-tímpano.

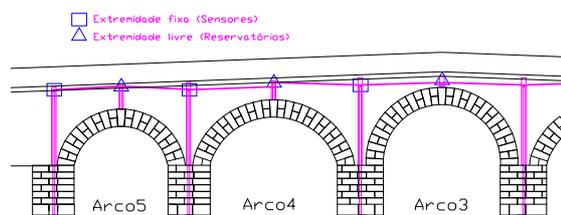


Fig 6a- Posicionamento dos sensores de pressão (corte longitudinal parcial de meia-ponte).

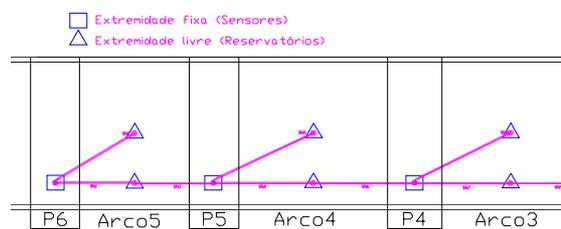


Fig 6b- Posicionamento dos sensores de pressão (planta parcial de meia-ponte).

Pretendeu-se assim criar plataformas para a colocação dos sensores a cotas compatíveis com o seu intervalo de medição e as cotas do coroamento dos arcos. Essas colunas estão no entanto

isoladas do enchimento da ponte através de tubos de maior diâmetro (figuras 7a e 7b) a fim de evitar movimentos daquelas devido às cargas actuantes na estrutura.



Fig 7a- Colunas de apoio aos sensores de pressão (vista superior).



Fig 7b- Colunas de apoio aos sensores de pressão (vista geral na fase de construção).

As extremidades livres dos tubos de fluido associados a cada sensor encontram-se no meio-vão dos arcos (figuras 6b), quer junto aos tímpanos da face jusante, quer ao longo do eixo longitudinal da ponte, a fim de se avaliar a diferença de deformações dos arcos na direcção transversal que resulta da influência da rigidez dos muros-tímpano.

Quanto ao fluido utilizado optou-se por óleo de silicone Baysilone M100 [GE Bayer Silicones (2002)], for forma a evitar problemas de congelação e de evaporação (muito prováveis no caso de utilização de água) que comprometeriam a validade dos registos ao longo do tempo. Além disso, a fim de minimizar os efeitos de variação de volume do fluido, e consequentemente do nível registado pelo sensor em resultado de variação de temperatura, as extremidades livres dos tubos estão dotadas de um reservatório de expansão realizado em material acrílico (figura 5). Pela mesma

razão houve particular cuidado na escolha do tipo de tubo por forma a minimizar os efeitos de dilatação/contractão térmica devida a variações de temperatura ambiente.

Não obstante este cuidado, torna-se imperativo proceder à correcção dos registos dos sensores para atender aos efeitos de temperatura. Apesar de se ter procurado fazer uma calibração prévia dos sensores para diferentes níveis de temperatura, em estufa e em câmara frigorífica, concluiu-se ser muito difícil reproduzir as condições da obra.

Optou-se então por fazer a referida correcção directamente na ponte já em serviço, com recurso a um sensor de referência. Este sensor é idêntico aos restantes e com comprimento de tubo da mesma ordem de grandeza, mas o respectivo reservatório de fluido fica colocado junto ao sensor e solidário com ele. Assim, não havendo variações relativas de nível entre o sensor e a superfície livre do fluido resultantes de deslocamentos diferenciais, as variações que ocorram serão apenas devidas à temperatura. Procedendo ao registo desta em simultâneo com o registo do sinal do sensor de nível de referência, obtém-se a curva de correcção pretendida.

Subjacente a este procedimento está a hipótese de idêntico funcionamento dos diversos sensores que se verifica ser aceitável em face das calibrações e verificações em laboratório. Estas foram realizadas ligando todos os sensores a um mesmo reservatório cujo desnível foi sendo alterado progressivamente e registando o sinal de cada sensor com o seu *off-set* devidamente anulado. A comparação dos resultados de cada sensor evidencia sinais estáveis e iguais para todos os sensores.

Importa referir que os sensores de nível possuem auto-compensação de temperatura mas exclusivamente no que se refere ao próprio sensor. A correcção acima descrita refere-se no entanto a todo o sistema que engloba o sensor, o fluido, o tubo, o reservatório e todos os acessórios de ligação. Assim, foram também

instalados sensores de temperatura junto ao tubo do fluido na vizinhança do reservatório, cujos registos são essenciais para que aquela correcção possa ser efectuada. Salienta-se ainda que, a fim de minimizar as variações de temperatura, o tubo foi dotado de vários níveis de protecção, mecânica e térmica, materializadas por tubos exteriores de ferro fundido, de poliuretano expandido e de PVC. Todo o conjunto fica envolvido por *tout-venant*, sob o revestimento e o pavimento da ponte, o que contribui para atenuar as variações térmicas.

Todos os sensores foram calibrados através de uma montagem em laboratório que permitiu aplicar deslocamentos verticais controlados na extremidade livre do tubo com fluido, mantendo fixa a posição do sensor. Procurou-se adoptar a mesma fonte de alimentação (12V) e um tubo com comprimento próximo do que em média se instalou na ponte, tendo-se obtido rectas de calibração próximas de $d(\text{mm})=35 \cdot V(\text{Volt})$.

Complementarmente à rede de sensores de nível, procurar-se-á captar o campo de deslocamentos das faces jusante e montante através do tratamento de fotografias digitais de elevada resolução, tiradas a partir de pontos fixos externos à ponte sobre maciços especialmente construídos para o efeito. Para o tratamento fotográfico serão adoptadas técnicas de correlação de imagens digitais [Chousal (2001)] entre estados deformacionais distintos, técnicas estas já aplicadas com sucesso em laboratório num ensaio de um arco de alvenaria de pedra.

4.2-Deslocamentos relativos das juntas

A fim de captar movimentos de abertura/fecho e escorregamento entre blocos de pedra em fase de serviço, uma das juntas adjacentes às pedras de fecho de cada arco foram instrumentadas com transdutores de deslocamento numa configuração em Z. Adicionalmente, foram também instrumentadas juntas aos quartos de vão, mas apenas no arco central e nos dois arcos de um dos lados da ponte. Na figura 8a ilustra-se a configuração de transdutores em Z numa junta enquanto

que a figura 8b evidencia o posicionamento geral dos transdutores num dos arcos.



Fig 8a- Instrumentação de juntas. Configuração em Z dos transdutores de deslocamento.



Fig 8b- Instrumentação de juntas. Posições dos transdutores de deslocamento num arco.

Na fase construtiva, nomeadamente para monitorização das operações de descimbre, foram usados transdutores lineares de deslocamento clássicos do tipo LVDT's de pequeno curso ($\pm 10\text{mm}$ e $\pm 12.5\text{mm}$), tal como os ilustrados na figura 8a

No entanto, para a fase definitiva de monitorização, e em alternativa aos LVDT's, foi adoptado outro tipo de transdutor baseado em redes de Bragg em fibra óptica, que se apresenta na figura 9, já devidamente posicionado numa das cavidades abertas na face jusante da ponte para albergar esses sensores. Este tipo de transdutor, projectado, produzido e comercializado pela FiberSensing [L. A. Ferreira (2004)], foi especificamente concebido para esta aplicação, justificando-se a opção essencialmente pela conhecida capacidade de

multiplexagem e pela imunidade ao ruído associadas às medições com base na tecnologia de sensores de fibra óptica.



Fig 9- Instrumentação de juntas. Transdutor de deslocamento de fibra óptica.

No total foram instalados 44 transdutores de deslocamentos deste tipo, distribuídos por juntas da face jusante e no intradorso de alguns arcos. Estes últimos destinam-se a medir eventuais movimentos de expansão transversal dos arcos e de abertura de juntas na direcção longitudinal nas proximidades do eixo da ponte onde a estrutura se apresenta mais flexível na direcção vertical. A figura 10 ilustra esquematicamente a posição de alguns desses sensores colocados no intradorso de um dos arcos.

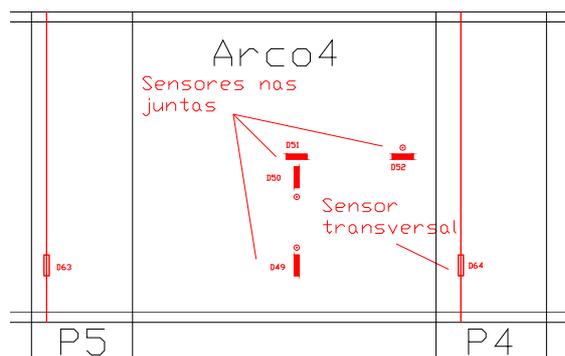


Fig 10- Posicionamento de transdutores de deslocamento de fibra óptica em juntas do intradorso de um dos arcos.

4.3-Deslocamentos relativos entre muros-tímpano opostos

Com vista à monitorização dos efeitos da pressão lateral do enchimento sobre os muros-tímpano, foram também instalados sensores de deslocamento transversal entre zonas opostas daqueles

muros: um sensor sobre um dos encontros e outros três sensores sobre pilares. Na figura 10 está também indicada a posição esquemática de um destes sensores sobre os pilares P4 e P5.

Tal como os transdutores de deslocamento adoptados, também estes sensores, aqui designados de transdutores longos, foram feitos com base em sensores de Bragg em fibra óptica pela FiberSensing [L. A. Ferreira (2004)]. Basicamente, o deslocamento é obtido através da medição da deformação num fio de invar amarrado a cada um dos muros-tímpano com uma dada tensão inicial.

Na figura 11 ilustra-se uma das zonas de fixação de um destes sensores junto ao muro-tímpano, onde se pode observar o elemento de fixação à pedra, o órgão de tensionamento, o fio de invar e a extremidade do tubo de aço-inox estanque de protecção de todo o conjunto. Externamente fica tudo envolvido por outro tubo de ferro fundido com diâmetro bastante superior ao primeiro para o proteger de assentamentos do enchimento.



Fig 11- Sensores longos transversais. Zona de amarração no muro-tímpano.

Estes sensores longos medem a extensão linear do fio de invar a que estão colados, que, multiplicada pelo seu comprimento, dá o afastamento relativo dos muros-tímpano.

4.4-Deformações em blocos dos arcos

As extensões lineares em alguns blocos dos arcos são obtidas através de extensómetros colados em faces dos blocos no intradorso e no extradorso de dois arcos.

Conhecendo previamente o módulo de deformabilidade e o coeficiente de Poisson da pedra usada, e dado que neste tipo de construções as tensões são muito baixas e em regime linear elástico do material, é possível obter as tensões instaladas a partir das extensões registadas. A medição de deformações no extradorso e no intradorso dos arcos destina-se assim a avaliar a distribuição de extensões e tensões na espessura do mesmo.

Foram então colocados pares de extensómetros nas direcções longitudinal e transversal da ponte, em blocos de pedra de dois meios-arcos (A3 e A4) adjacentes ao pilar P4 (ver figura 12a), em dois alinhamentos longitudinais (um central segundo o eixo da ponte – figura 12b - e outro junto à face jusante – figura 12c) e segundo três secções transversais dos arcos (uma central passando pelo coroamento, outra num meridiano a cerca de 45° e outra ainda junto à nascença dos arcos A3 e A4)

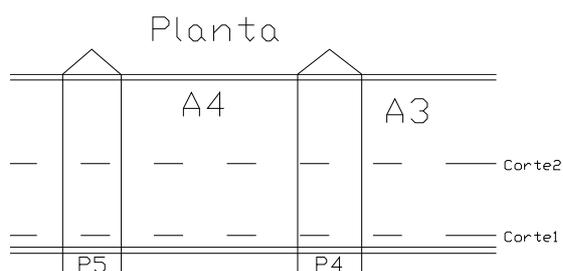


Fig 12a- Posicionamento de extensómetros. Planta parcial.

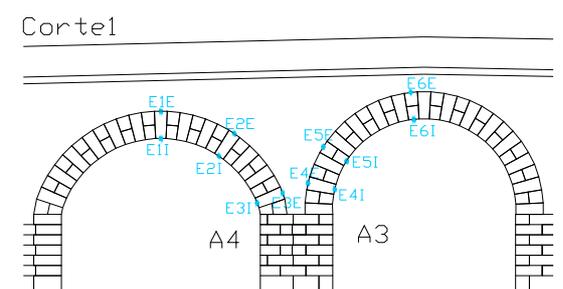


Fig 12b- Posicionamento de extensómetros. Alinhamento central.

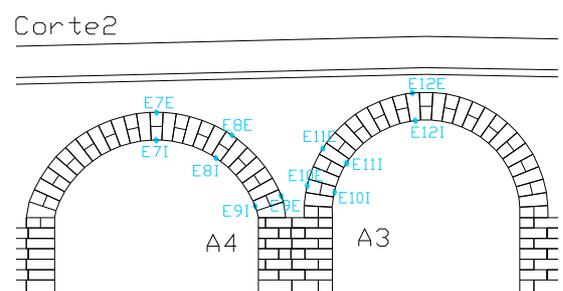


Fig 12c- Posicionamento de extensómetros. Alinhamento lateral jusante.

Foram adoptados extensómetros de resistência eléctrica da marca MM-Measurement Group, Inc., referência N2A-06-20CBW, com resistência de 350Ω. Cada extensómetro ficou ligado numa montagem em ¼ de ponte e três fios condutores segundo o Método Siemens.

A sua aplicação é semelhante à aplicação noutros materiais, tais como o betão, sendo no entanto necessária uma regularização prévia com resina para minimizar os efeitos da heterogeneidade do material de base que neste caso é o granito (ver figura 13a).

No intradorso foram abertas cavidades superficiais como a evidenciada na figura 13a a fim de albergar os extensómetros e as respectivas protecções mecânicas, eléctricas e à humidade, sobre as quais foi colocada uma camada final de argamassa à face da pedra. No extradorso, os extensómetros e as protecções foram colocadas na face da pedra, figura 13b, recebendo depois uma camada de argamassa antes da colocação das outras pedras ou do *tout-venant*.

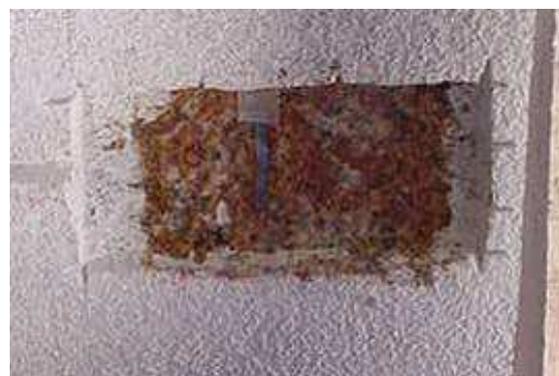


Fig 13a- Colocação de extensómetros. Regularização de base e extensómetro colado em cavidade previamente aberta.



Fig 13b- Colocação de extensómetros. Protecção final.

Na figura 13c apresenta-se uma vista geral de quatro zonas do extradorso já instrumentadas com extensómetros e em fase de recobrimento com blocos de pedra.



Fig 13c- Colocação de extensómetros. Vista geral em fase de recobrimento com pedra do tímpano.

Além dos extensómetros de base eléctrica, surgiu também no decorrer da instrumentação a possibilidade de instalar alguns extensómetros de base óptica, aproveitando a rede de fibras ópticas já instalada para os outros sensores. Estes sensores foram também produzidos e instalados pela FiberSensing, e baseiam-se essencialmente num sensor de Bragg em fibra óptica embutido numa matriz de material compósito. Na figura 14 apresenta-se dois desses extensómetros em fase de instalação.



Fig 14- Extensómetros de base óptica. Instalação.

4.5-Pressões no material de enchimento e tensões nos arcos

A monitorização das pressões verticais no material de enchimento é conseguida com células de pressão total por vezes usadas em obras geotécnicas.

Foi escolhida a zona de enchimento sobre o pilar P4, onde foram colocadas duas células de pressão, uma directamente sobre a face superior do pilar junto à nascença dos arcos e outra mais próximo da superfície. Na figura 15 ilustra-se o posicionamento das referidas células, designadas por C1 e C2. Na mesma figura é possível observar ainda a posição de outras cinco células (C3 a C7) do mesmo tipo embora com geometria diferente e que foram instaladas em rasgos abertos em pedras dos arcos a fim de avaliar as tensões neles introduzidas.

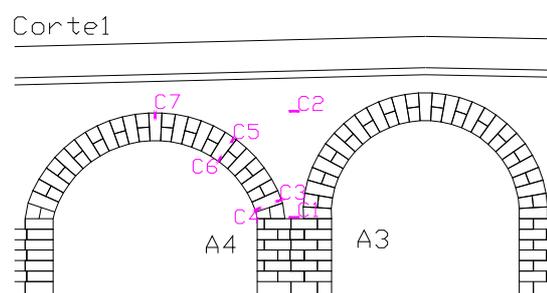


Fig 15- Posicionamento de células de pressão.

As células são da marca Geokon, modelos 3500 e 3510 [Geokon (2002)]. A principal diferença entre os dois modelos escolhidos diz respeito ao material de contacto que a célula está preparada para ter. Porém, o princípio de funcionamento destes equipamentos é o mesmo.

As células são constituídas por duas placas de aço inox ligadas entre si pelo seu perímetro através de soldadura. O interior é preenchido por uma fina camada de óleo cuja pressão varia consoante o aperto nas paredes da célula provocado pelas pressões externas. Se as placas forem suficientemente flexíveis, ou seja, se tiverem uma relação espessura/largura pequena, o efeito da soldadura na periferia passa a ser desprezável e, no centro da célula, a pressão do fluido interno traduz com suficiente aproximação a pressão do meio envolvente. A pressão do óleo é então transformada num sinal eléctrico através de um transdutor de pressão acoplado, que funciona em ponte completa de Wheatstone com sinal eléctrico de 100mV em fim de escala, para uma tensão de alimentação de 10V.

Os efeitos da temperatura estão acautelados pela existência na célula de um termistor que, registando a temperatura, permite fazer as correcções necessárias.

As células C1 e C2 têm forma circular, sendo a primeira do modelo 3510 e a segunda do modelo 3500, ambas para uma gama de pressões entre 0 e 600kPa. Diferem entre si pelo facto de a C1, figura 16a, ter uma das faces mais rígida adequada a meios de contacto mais duros como é a pedra, sendo a outra face materializada por uma placa mais flexível para estar em contacto com o material de enchimento. A célula C2, figura 16b, por seu turno, tem as duas faces flexíveis por se destinar a ser toda envolvida por solo.



Fig 16a- Células de pressão total: C1, modelo 3510 (circular) e C3, modelo 3500 (meia-lua), já instaladas.



Fig 16b- Células de pressão total: C2, modelo 3500 (circular) em fase de instalação.

As células C3 a C7 têm a forma de meia-lua e são do tipo 3500 (figura 16c), mas preparadas para uma gama de pressões de 0 a 1000kPa. Embora feitas com placas do mesmo tipo da C2 (para solo em ambas as faces), por serem menores são também mais rígidas e portanto adequadas para ser envolvidas por pedra e argamassa de preenchimento em toda a sua superfície exterior.



Fig 16c- Células de pressão total: C3, modelo 3500 (meia-lua) em fase de instalação.

4.6-Temperatura

O registo da temperatura em diversos locais da ponte destina-se essencialmente a permitir efectuar as correcções necessárias nas leituras dos restantes sensores para atender aos efeitos de variação térmica.

Exceptuando os termistores que vêm incorporados de fábrica com as células de pressão, os sensores de temperatura adoptados são baseados em fibra óptica, também fornecidos e instalados pela FiberSensing.

A opção por este tipo de sensores de temperatura de base óptica surgiu de forma natural pelo facto de ser possível integrá-los sem dificuldade na rede de fibras ópticas instalada para os transdutores de deslocamento. Estes sensores de temperatura foram colocados em conjunto com alguns transdutores e também, como já referido, junto com tubos de fluido dos sensores de nível. Na figura 17 pode-se observar um destes sensores com um daqueles tubos em fase de colocação.

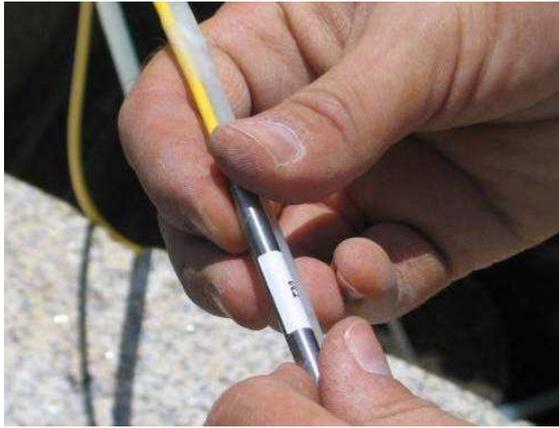


Fig 17- Sensor de temperatura de base óptica.

5 – TAREFAS ACESSÓRIAS

Tal como porventura já terá ficado patente através dos parágrafos e imagens anteriores, a instalação dos sensores descritos exigiu a execução de um conjunto apreciável de tarefas e de infra-estruturas específicas que vale a pena salientar e que importa prever desde o início do planeamento da instrumentação.

Para além de intervenções locais para cada sensor, tais como execução de furos, rasgos, cavidades, colocação de tubagens de protecção aos cabos, etc, foi necessário realizar:

- i) uma calha técnica para reunir e conduzir os cabos de todos os sensores a um armário técnico;
- ii) caixas de visita ao longo da calha técnica em locais devidamente escolhidos;
- iii) um local fechado para albergar o armário técnico.

A calha técnica foi realizada no local em chapa de zinco, por forma a se conseguir as exíguas dimensões exigidas. Estende-se ao longo da face jusante da ponte, junto à guarda lateral e revestida totalmente por pedra de granito. Na figura 18 pode-se observar o aspecto da calha já com alguns tubos ligados para condução de cabos eléctricos e ópticos, e uma das aberturas para as caixas de visita ilustradas na figura 19.



Fig 18- Aspecto da calha técnica



Fig 19- Caixa de visita e de acesso à calha técnica

O armário técnico fica situado numa das extremidades da ponte, ao lado do encontro e imediatamente abaixo da cota do pavimento conforme se pode observar na figura 20.

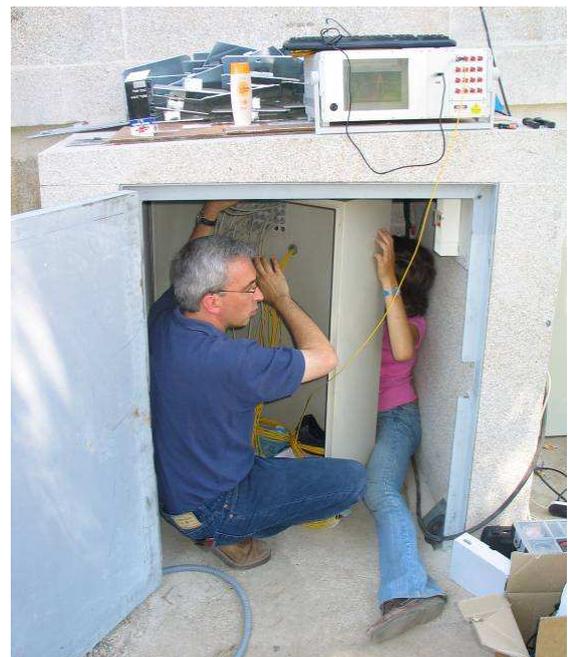


Fig 20- Armário técnico

Nesse armário fica o quadro das fichas de sinais de todos os cabos

eléctricos e ópticos para ligação ao sistema de aquisição, assim como o quadro eléctrico de alimentação de todos os equipamentos. O sistema de aquisição fica também alojado no mesmo armário fechado para monitorização em contínuo durante períodos longos.

6 – SISTEMA DE AQUISIÇÃO

A aquisição e registo de sinais dos sensores instalados é feita com recurso a dois sistemas diferentes conforme os tipos de sensores, tanto durante a sua instalação como na fase de serviço.

Para os sensores de base óptica (extensómetros, sensores de temperatura e transdutores de deslocamento) a aquisição é feita usando uma unidade de medição produzida pela FiberSensing com capacidade para condicionamento e aquisição de 16 ramos independentes de fibra óptica, contendo cada um até 12 sensores multiplexados em série. A instalação de todos os sensores ópticos foi devidamente acompanhada com recurso a uma destas unidades, que pode ser observada na figura 21.



Fig 21- Sistema de interrogação para sensores de fibras ópticas.

Para os sensores eléctricos, tais como extensómetros, sensores de nível, células de pressão e termistores, as leituras e registos foram e são feitas com sistemas de aquisição da National Instruments.

Na fase de instalação foi usado o sistema de aquisição do Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da FEUP, que tem conduzido e executado todos os trabalhos de instrumentação da ponte. Este equipamento consiste num sistema baseado numa plataforma PXI da

National Instruments, equipado com um controlador NI-8167, duas placas de aquisição (NI-6070E e NI-6071E) e diversos módulos de condicionamento de sinais extensométricos (SCXI-1520) e de transdutores de deslocamento LVDT (SCXI-1540). Este equipamento permitiu a leitura e registo de sinais das células de pressão e dos extensómetros durante a instalação, bem como dos LVDT's durante as operações de descimbre. Além disso, as características multifunção das placas permitiram a aquisição dos sinais dos termistores já instalados e também os primeiros registos de calibração em laboratório dos sensores de nível. Na figura 22 pode observar-se o referido sistema de aquisição.

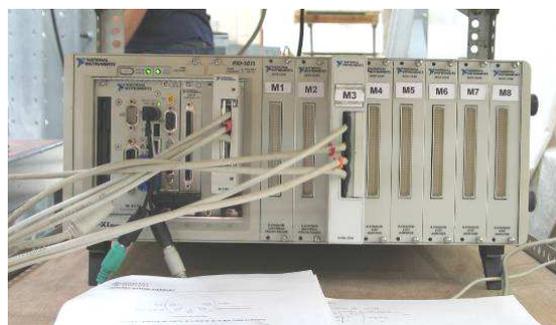


Fig 22- Sistema de aquisição NI-PXI para sensores de base eléctrica durante a instalação.

Para a fase definitiva de monitorização em serviço, a aquisição será feita com sistema de aquisição FieldPoint da National Instruments (figura 23).



Fig 23- Sistema de aquisição NI-FieldPoint para sensores de base eléctrica em fase definitiva.

Na versão Compact FieldPoint entretanto adquirida pelo LESE para a monitorização desta e de outras obras, a configuração do sistema consiste num módulo principal cFP-2010 de processador

e memória, três módulos de aquisição a 12 bits para sinais analógicos já amplificados, para um total de 24 canais, e cinco módulos de aquisição também a 16 bits para 40 canais de pontes extensométricas. Com este sistema serão feitas as leituras e registo dos sinais dos sensores de nível, dos termistores e dos extensómetros eléctricos, tendo sido já utilizado para fazer as calibrações finais dos sensores de nível em laboratório.

7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A possibilidade de acompanhar a construção da nova ponte em alvenaria de pedra sobre o rio Vizela, em Vila Fria, e mais ainda de a instrumentar para a monitorização do seu comportamento estrutural ao longo do tempo, constitui uma oportunidade excelente e quase única de contribuir para a melhoria do conhecimento deste tipo de obras.

Nesse sentido, adoptou-se uma estratégia integrada de instrumentação, através da qual se pretende obter registos da resposta da ponte, tanto a nível global como local, recorrendo a sensores de nível (materializados por sensores de pressão de alta sensibilidade), transdutores de deslocamento e temperatura baseados em fibra óptica, extensómetros eléctricos e de fibra óptica, células de pressão total e termistores.

A instalação dos sensores está quase concluída, prevendo-se a realização de ensaios de carga até ao final do corrente ano. Até a presente data não existem ainda registos sistemáticos dos sensores já instalados razão pela qual apenas se apresentou a estratégia e alguns detalhes da instrumentação adoptada.

REFERÊNCIAS

- Chousal, J., Medição de Deslocamentos no Plano Através da Correlação Espacial de Imagem, 4º Encontro Nacional de Análise Experimental de Tensões e Mecânica Experimental, IPB, 2001
- Costa, C., Análise do Comportamento da Ponte da Lagoncinha sob a Acção do

Tráfego Rodoviário – Tese de Mestrado em Engenharia Civil – FEUP, 2002

Costa, A., Arêde, A. e Costa, C., Ponte de Vila Fria – Projecto – FEUP, 2002

L. A. Ferreira, F. M. Araújo, A. A. Maia, P. A. Alves, J. L. Santos, Redes de Bragg em Fibra Óptica - contribuições para o desenvolvimento de uma tecnologia revolucionária em monitorização estrutural, Betão Estrutural 2004, 2004

Geokon, Inc., Earth Pressure Cells , 2002

Honeywell, 160PC Low pressure sensors, 164PC01D37

GE Bayer Silicones, Baysilone M100, 2002

Secil., Argamassa de Alvenaria Hidrofugada, 2002

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração empenhada da Dr^a Teresa Restivo e do Prof. Joaquim Mendes, por todo o apoio na definição e preparação dos sensores, à Eng^a Daniela Glória por todo o imenso trabalho de preparação e instalação da instrumentação, ao Eng^o Luís Noites pelo empenho na programação do sistema de aquisição e ao Sr. Valdemar Luís por todo o cuidado, esforço e dedicação na execução das mais variadas e pesadas tarefas subjacentes à instrumentação.

Expressam também o seu reconhecimento à empresa Augusto Oliveira Ferreira, na pessoa do seu responsável Eng^o Filipe Ferreira, ao Eng^o Miguel Fernandes e ao Sr. Emídio Domingues, toda a paciência e apoio que dispensaram na obra durante a instalação dos sensores e infra-estruturas necessárias.