

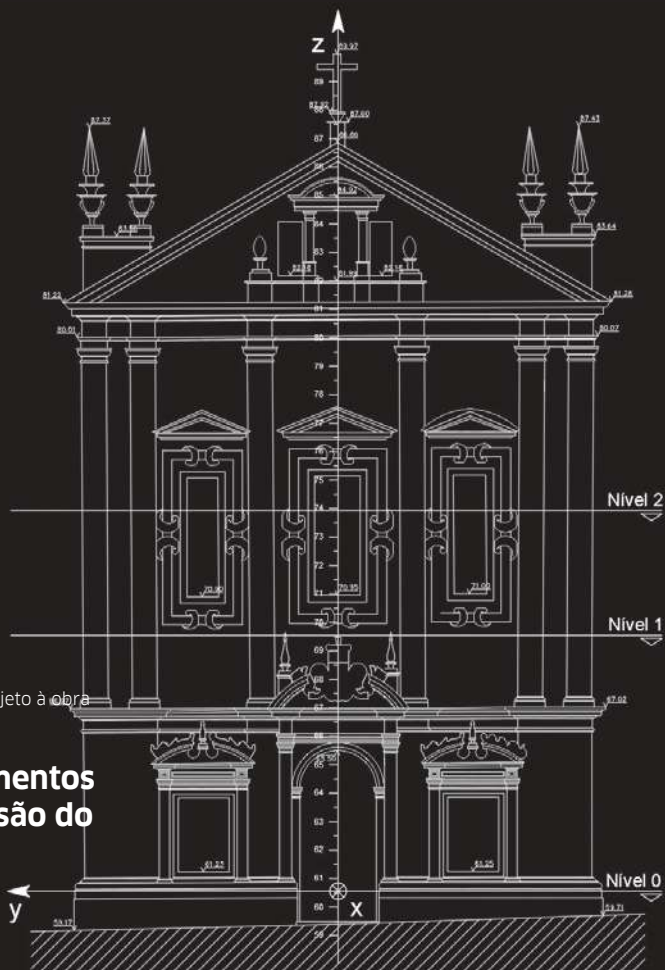
Sbo

Sebentas d'Obra Ciclo de construção, do projeto à obra

#34, fevereiro 2024

**Monitorização de monumentos
durante a obra de expansão do
Metro do Porto**
Porto

António Arêde



Editor

Cadernos d'Obra

Diretor

Bárbara Rangel

Coordenação Editorial

Bárbara Rangel

Conceção Gráfica

Teresa Seródio

Texto

António Arêde

Impressão

Minerva, artes gráficas

Fevereiro 2024

Depósito legal: 336727/11

ISSN 2184-6065

Tiragem: 200 exemplares

Publicação periódica

n.º 34. Ano XIII, fevereiro 2024

Propriedade

FEUP/DEC

R. Dr. Roberto Frias s/n

4200-465 Porto

Portugal

Tel./fax: + 351 22 508 19 40

cdo@fe.up.pt

É proibida a reprodução sem a autorização escrita dos autores e do editor.

A exatidão da informação, os copyrights das imagens, as fontes das notas de rodapé, bem como a bibliografia, são da responsabilidade dos autores dos artigos, razão pela qual a direção da revista não pode assumir nenhum tipo de responsabilidade em caso de erro ou omissão.

A iniciativa “Fora de Portas engenharia civil à mostra”, resulta da colaboração entre o Departamento de Engenharia Civil da FEUP, a Mostra da UP e o Município do Porto. Realiza-se no contexto da iniciativa Porto Innovation Hub (PIH), que pretende envolver os cidadãos e visitantes da Invicta na descoberta da inovação que transformou a cidade nos últimos séculos. Através da visita a locais históricos e infraestruturas emblemáticas do Porto, procura-se demonstrar o impacto direto da inovação na melhoria da qualidade de vida dos cidadãos. O PIH é uma iniciativa do Município do Porto que pretende ser uma plataforma para o fortalecimento do ecossistema de inovação e empreendedorismo da cidade, contribuindo desta forma para que o Porto se possa destacar no panorama nacional e internacional como uma cidade inovadora e criativa. O PIH propõe a criação de um espaço de experimentação e laboratório vivo, potenciando cenários e oportunidades de desenvolver novos produtos, métodos ou conceitos à escala urbana, contribuindo, assim, para a cultura de transformação para a inovação.

Monitorização de monumentos durante a obra de expansão do Metro do Porto

Introdução e enquadramento

A monitorização de monumentos durante a obra de expansão do Metro do Porto enquadra-se no âmbito do Protocolo de Colaboração entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e a Metro do Porto S.A. (MdP), em vigor desde Janeiro de 2021, e tem como um dos seus vários objetivos, o estabelecimento de mecanismos de cooperação que tornem possível a participação conjunta em projetos e estudos.

Neste contexto, entre as partes foi estabelecido um contrato específico para apoio da FEUP à MdP, no âmbito da obra de construção do Troço Liberdade/S. Bento – Boavista/Casa da Música, da nova Linha Circular (Rosa) do Metro do Porto, ao longo do qual existem diversos edifícios históricos sensíveis suscetíveis de serem estruturalmente afetados em resultado de movimentos do maciço de fundação, potencialmente induzidos pelas operações de escavação do túnel, das estações e dos poços projetados para aquele troço.

Em face do levantamento patrimonial elaborado, foram identificados imóveis históricos (monumentos) particularmente relevantes, para os quais, em interação com a MdP, se considerou do maior interesse a sua análise estrutural, observação e acompanhamento durante as obras de escavação nas respetivas imediações, visando detetar, se possível antecipadamente, potenciais danos na estrutura e contribuir para a definição de medidas para a sua mitigação.

Em concreto, de um universo inicial mais vasto, foram selecionados quatro monumentos de características estruturais distintas e com elevado valor histórico, cultural e social, nomeadamente a Igreja de Santo António dos Congregados, o Complexo Arquitetónico dos Clérigos (composto pela Igreja, Museu e Torre dos Clérigos), a Estação Ferroviária de São Bento e o Monumento aos Heróis da Guerra Peninsular (Obelisco da Rotunda da Boavista), adiante abreviadamente designados apenas de “Congregados”, “Clérigos”, “São Bento” e “Boavista”, respetivamente. Na presente publicação, porém, daqueles monumentos apenas será dado enfoque aos localizados na Baixa do Porto, i.e. Congregados, Clérigos e São Bento.

Para os três monumentos referidos, foram realizadas inspeções estruturais prévias e identificadas zonas que devessem ser objeto de observação e monitorização estrutural, a fim de detetar atempadamente possíveis efeitos dos trabalhos nas suas envolventes suscetíveis de originar danos naquelas construções.

Assim, além de uma breve síntese das conclusões das inspeções estruturais, apresentam-se aqui os aspetos principais dos sistema de monitorização estrutural implementado, focando as grandezas a monitorizar, os equipamentos de medida, a arquitetura geral do sistema e sua instalação, bem como a aquisição, transmissão, armazenamento, visualização e reporte dos resultados da monitorização.

A obra de construção do troço Liberdade/S. Bento – Boavista/ Casa da Música da nova Linha Circular (Rosa) do Metro do Porto

O troço Liberdade/S. Bento – Boavista/Casa da Música da nova Linha Circular (Rosa) do Metro do Porto, desenvolve-se na sua totalidade em túnel subterrâneo de duas vias e inclui a construção de quatro novas estações (Liberdade/São Bento, Hospital Santo António, Galiza e Boavista/Casa da Música) e de três de poços de ventilação (PEV-1, PEV-2 e PEV-3), conforme esquematicamente ilustrado na Fig. 01.

Em termos construtivos o túnel é executado por processo mineiro, envolvendo desmonte mecânico e a fogo, enquanto as estações e os poços incluem a execução de estruturas de contenção que envolvem tratamentos de solo por *jet-grouting*, realização de paredes de estacas e paredes moldadas.

Na zona da Baixa do Porto, onde se inserem os monumentos aqui abordados, são particularmente relevantes os trabalhos de construção do túnel de via e de escavação para a estação Liberdade/São Bento no setor assinalado pelo retângulo vermelho incluído na Fig. 01. Deste setor destaca-se as plantas de localização do túnel e da estação incluídas na Fig. 02a) e na Fig. 02b), onde se evidencia a proximidade da obra relativamente aos Congregados (Cgg), a São Bento (SB) e aos Clérigos (Clg) cuja implantação se encontra destacada por manchas devidamente identificadas.

Constata-se assim que a Igreja dos Congregados se encontra na área de influência das obras da MdP, nomeadamente as obras de escavação para a estação

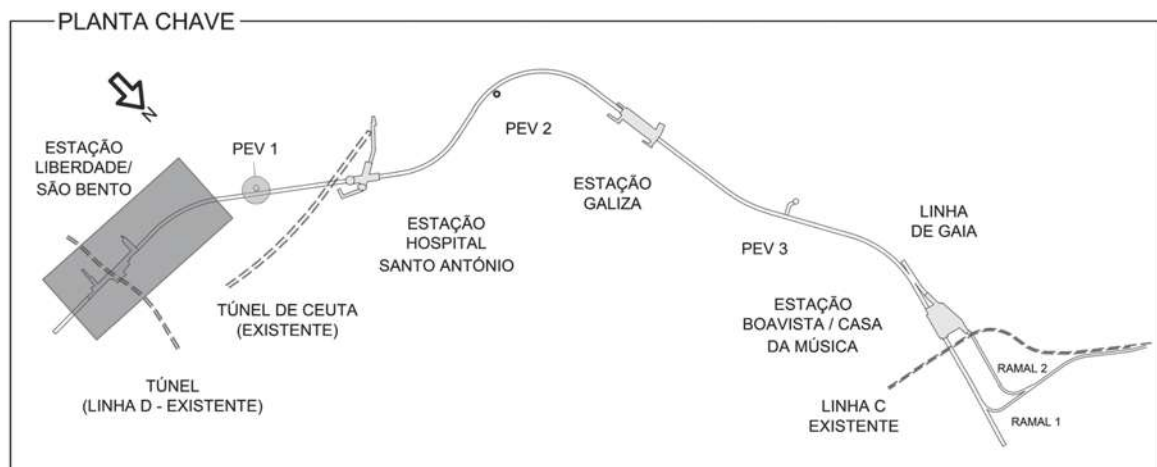
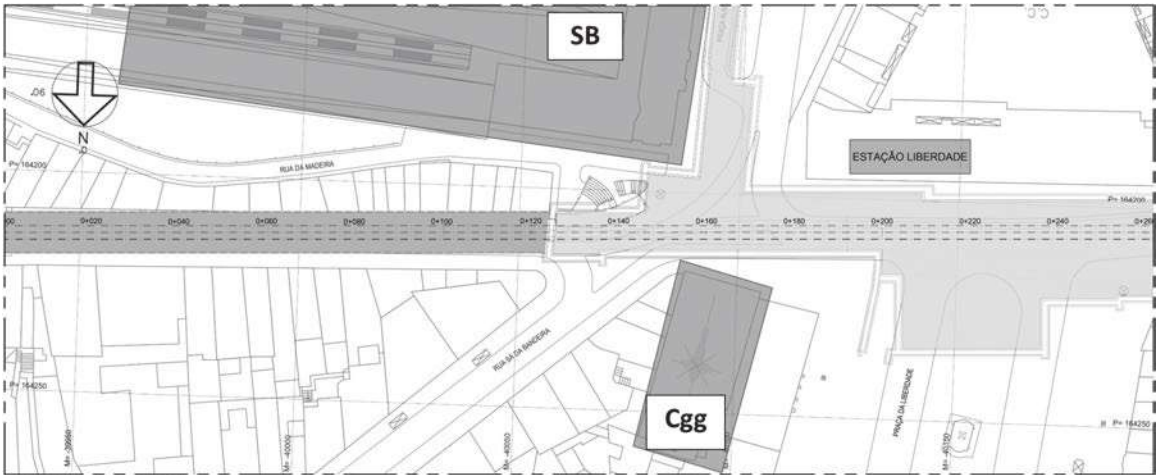


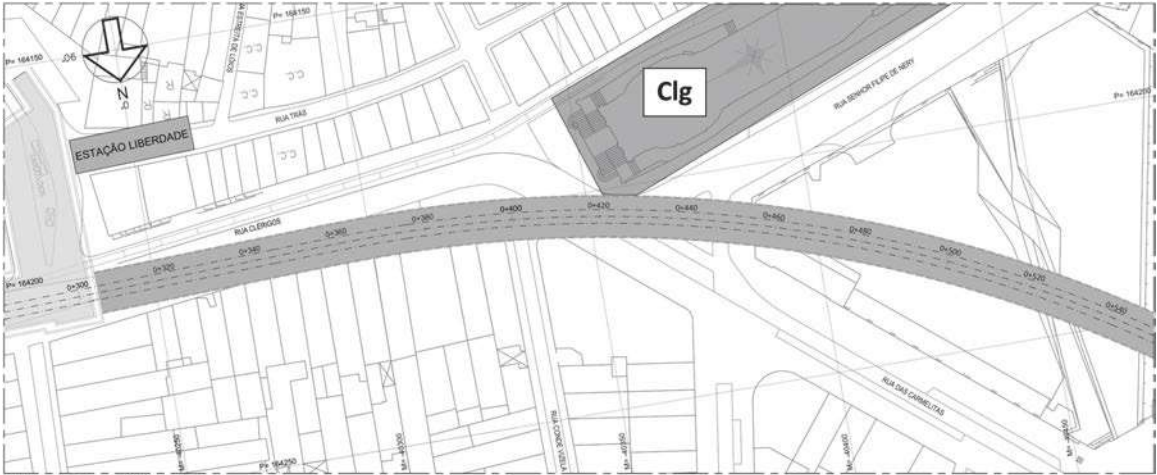
Fig. 01. Planta geral esquemática (chave) do troço Liberdade/S. Bento – Boavista/Casa da Música da nova Linha Circular (Rosa) do Metro do Porto

Liberdade/São Bento e/ou do túnel de via, enquanto o edifício da Estação de São Bento se situa na zona de influência das escavações frente à sua fachada e junto ao cunhal Noroeste. No que se refere ao Complexo dos Clérigos, localiza-se na bacia de influência da abertura do túnel que dista em planta cerca de 10 m da esquina Nordeste da Igreja dos Clérigos a uma profundidade

de cerca de 25 m. Não obstante estes factos, e tanto quanto é do conhecimento dos autores, importa realçar que a elaboração dos projetos da MdP tiveram em consideração a importância deste património assim como o estado de conservação dos mesmos, tendo sido implementado um conjunto de medidas de proteção e mitigação de patologias pré-existentis detetadas.



PLANTA DE LOCALIZAÇÃO
esc. 1:500



PLANTA DE LOCALIZAÇÃO
esc. 1:500

Fig. 02. Implantação da Estação Liberdade/São Bento e do túnel na zona da Baixa do Porto e sua proximidade aos monumentos sob observação:
(a) Congregados (Cgg) e São Bento (SB) e
(b) Clérigos (Clg)

> Fig. 03. Localização da Igreja dos Congregados [1]

Edifícios históricos daaixa do Porto objeto de monitorização

Os edifícios históricos da baixa do Porto sob monitorização foram objeto de uma inspeção estrutural prévia a fim de identificar e caracterizar patologias estruturais eventualmente já existentes. Seguidamente, inclui-se uma breve descrição desses edifícios e das principais conclusões sobre o seu estado estrutural prévio às obras de construção da Linha Rosa.

Igreja dos Congregados

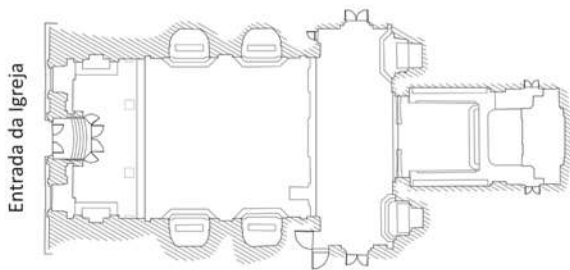
Descrição sumária construtiva e estrutural

A Igreja dos Congregados é uma igreja barroca localizada no concelho do Porto, na Freguesia da Sé – atual União de Freguesias de Cedofeita, Santo Ildefonso, Sé, Miragaia, São Nicolau e Vitória. A Sul a igreja confronta com a Rua de Sá da Bandeira defronte à Praça Almeida Garret, a Este com dois edifícios laterais pertencentes à congregação e com um terceiro edifício (todos voltados

à Rua de Sá da Bandeira) e a Oeste com um outro edifício limitado pela Praça da Liberdade (ver Fig. 03).

Iniciada a sua construção em 1694, a igreja foi concluída em 1703 e teve a sua capela-mor reedificada em 1823. Tal como se indica no site Monumentos.pt [2] e se ilustra na Fig. 04, a igreja possui “planta em cruz latina e é composta por nave única e capela-mor retangular, em volumes articulados por coberturas diferenciadas com telhado de duas águas. Apresenta a fachada principal orientada a sul dividida em dois registos por cornija saliente. O primeiro registo é em cantaria de granito marcado por um portal encimado por frontão. O segundo registo possui pilastras, que são duplas nos extremos da fachada e simples a meio, formando assim três panos; em cada um desses panos existem janelas alongadas e esguias, duplamente emolduradas e encimadas por frontões (circulares nas laterais e triangular na central), e decoradas com vitrais. Entre as molduras





das janelas existem dois frisos de azulejos lisos amarelos.” “No interior, coro-alto sobre três arcos assentes em colunas jônicas estriadas, tendo no subcoro dois altares de mármore; colateralmente quatro capelas de arco pleno com retábulos e sanefas de talha encimadas por tribunas e dois púlpitos quadrados (...). Nos braços do transepto abrem-se portais de arco pleno sobre pilastras estriadas assentes em pedestais elevados, e frontões partidos. Duas capelas com retábulos de talha dourada ladeiam o arco triunfal.” A Fig. 05 apresenta imagens que ilustram alguns dos aspetos referidos.

O sistema estrutural principal da igreja caracteriza-se por paredes exteriores portantes em alvenaria de pedra, com as abóbadas da nave e da abside em alvenaria de tijolo e pedra, respetivamente. A estrutura da cobertura é constituída por asnas em madeira apoiadas



Fig. 04. Planta térrea da Igreja dos Congregados

Fig. 05. Fotografias ilustrativas da Igreja dos Congregados e da respetiva estrutura:
(a) fachada Sul - trecho superior; (b) fachada Sul - trecho inferior;
(c) arco triunfal; (d) coro-alto e face interior da fachada Sul

nas paredes exteriores. No interior da igreja, a nave e o transepto apresentam o arco triunfal, os arcos laterais do transepto, os arcos dos altares laterais, as pilastras, as cornijas e os frisos executados em cantaria de granito, enquanto a restante superfície das paredes está revestida a estuque pintado com a técnica *trompe-l'oeil*. O coro-alto tem revestimentos de madeira, em ambas as faces inferior e superior, sugerindo uma estrutura de suporte também em madeira, formada por vigas e tarugos. Face às dimensões em planta, é de presumir que as vigas de madeira apoiam na parede da fachada e nos arcos abatidos em alvenaria de granito que repousam em colunas de granito.

Intervenções anteriores

Com base na documentação consultada e na inspeção realizada, constatou-se que a igreja foi sujeita a diversas intervenções ao longo do tempo, das quais aqui apenas se destacam as intervenções estruturais apresentadas na Fig. 06, nomeadamente:

- i) a colocação de agramos metálicos na moldura da janela Este da fachada acima do piso do coro alto (Fig. 06a), na parede do frontão da fachada (acima da abóbada) também no lado Este (Fig. 06b) e na parede sobrejacente ao arco triunfal (Fig. 06c);
- ii) o preenchimento generalizado de aberturas de juntas e fendas (Fig. 06b a Fig. 06d).



Fig. 06. Igreja dos Congregados - intervenções estruturais: agramos metálicos (a) na moldura da janela Este da fachada acima do piso do coro, (b) na parede do frontão da fachada (acima da abóbada) do lado Este, (c) na parede sobrejacente ao arco triunfal; (d) juntas refechadas no tímpano do lado Oeste

Danos estruturais existentes

Os danos estruturais observados [3] concentram-se no lado Este da Igreja nas paredes de alvenaria de granito, nos arcos de granito que suportam o coro-alto e nos elementos de madeira da cobertura.

Apesar das intervenções estruturais anteriores, nomeadamente a colocação de agramos metálicos e o preenchimento de juntas e de fendas, com maior incidência no lado Este da Igreja, verifica-se a reabertura de juntas, fissuras e fendas em particular nas paredes sobrejacentes ao arco triunfal. Verifica-se ainda a existência de fissuras no estuque da abóbada da nave visíveis à distância e a olho nu, e que estão provavelmente associadas a deformações ou fissuras do substrato. A deformação observada nos arcos de suporte do coro-alto, arco Este e arco central, poderá também ter estado

associada a assentamentos da fundação que, porém, aparentam estar estabilizados por não se observarem aberturas de juntas dos arcos. Alguns destes danos estruturais, sumariamente descritos, encontram-se ilustrados na Fig. 07.

Proximidade à obra e potenciais impactos

Dado que as obras do metro decorrem defronte à Igreja dos Congregados, é expectável que os seus potenciais impactos nesta construção se restrinjam à zona da fachada (e partes adjacentes das paredes longitudinais) e à estrutura de suporte do coro alto, podendo traduzir-se em: i) assentamento vertical e ii) rotação da fachada, iii) aberturas de fendas/juntas no plano da fachada e/ou nos cunhais de ligação com as paredes longitudinais, e iv) vibrações.



Fig. 07. Igreja dos Congregados - danos estruturais:

(a) abertura de junta, previamente preenchida, na parede do tímpano sobre o arco triunfal, do lado Este, (b) fissuras na abóbada e ligação varandim/fachada do lado Este, (c) deformação e juntas preenchidas com argamassa no arco Este do coro-alto; (d) deformação do arco central do coro alto

Estação de São Bento

Descrição sumária construtiva e estrutural

A Estação de S. Bento localiza-se no centro histórico do Porto, confrontando a Norte, com a Rua da Madeira, a Sul com a Rua do Loureiro, a Oeste com a Praça Almeida Garret e a Este com a escarpa da Batalha (muro de contenção e entrada do túnel) (Fig. 08a). Apresenta uma planta em U, composta por um corpo central, onde se localiza o átrio/vestíbulo, ladeado por dois corpos laterais semelhantes, mas de maior cêrcea, cada um dos quais dividido em duas partes distintas, o torreão e a restante ala, conforme se apresenta na Fig. 08b. Ambos os corpos laterais são compostos por rés-do-chão (R/C), sobreloja, dois pisos superiores e sótão. O Torreão Sul tem ainda uma cave.

Na fachada principal, a Oeste (Fig. 09a e Fig. 09b), é clara a divisão de volumes, havendo uma simetria entre as partes Norte e Sul, que se estende às fachadas laterais. A fachada do corpo central é caracterizada por dois níveis distintos, separados por uma arquitrave que também divide os vãos envidraçados móveis (inferiores, portas) e fixos (superiores, janelas) (Fig. 09b).

O átrio tem aproximadamente 42 m de comprimento por 14 m de largura e um pé-direito de 14 m, tendo as suas quatro paredes revestidas a azulejo, da autoria de Jorge Colaço (Fig. 09c). Cada piso dos torreões e alas posteriores está dividido em vários espaços, através de paredes divisórias (em tabique, tijolo furado e gesso cartonado), estando estes espaços concessionados a diferentes entidades. Os Pisos 1 e 2 de ambos os torreões e alas seguem uma configuração semelhante,

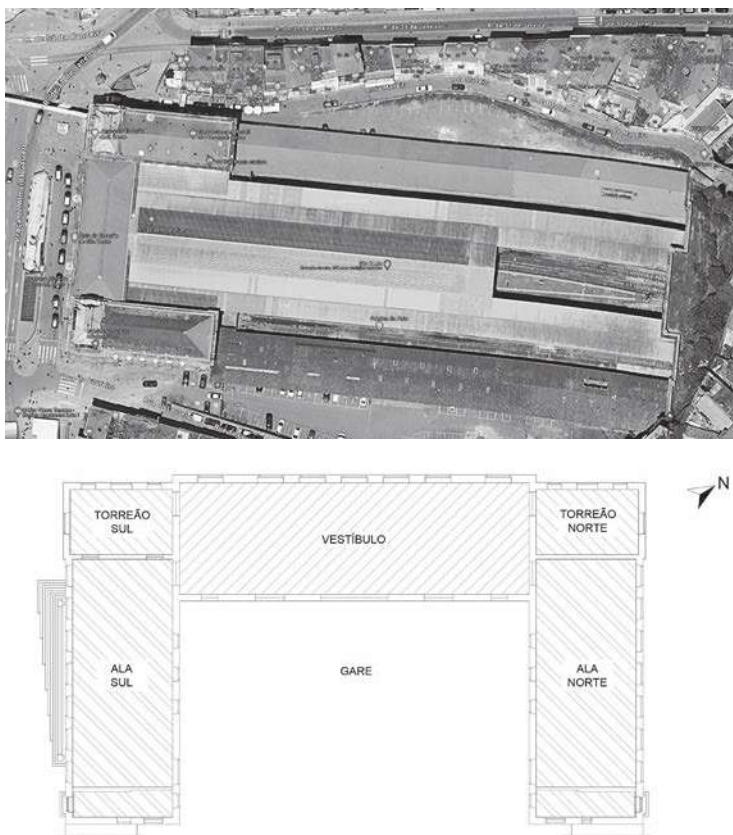


Fig. 08. Estação de São Bento: (a) Localização [1] e (b) Corpos principais do edifício



Fig. 09. Estação de São Bento: (a) Perspectiva exterior 3D [1]; (b) fachada principal, Oeste; (c) vestibulo a Sul; (d) corredor de distribuição nas alas; (e) sótão do Torreão Norte; (f) gare

apresentando nas alas um corredor longo, central, que faz a distribuição para os compartimentos situados junto às fachadas (Fig. 09d).

O teto do átrio tem revestimento em estuque trabalhado e é estruturalmente executado por barrotes e vigas de madeira que apoiam numa estrutura treliçada metálica. A cobertura do átrio tem quatro águas com estrutura em asnas metálicas e revestimento em telha cerâmica.

Cada torreão tem uma cobertura de quatro águas, com estrutura de madeira (Fig. 09e) e revestimento em fibrocimento, incorporando um relógio em janela de mansarda voltado a Oeste e duas janelas de mansarda voltadas a Norte e Sul (Fig. 09b,e). As coberturas das Alas Sul e Norte têm três águas, com estrutura de madeira e revestimento em telha cerâmica. A gare é constituída por uma estrutura metálica com pilares em ferro fundido [2] e dois corpos térreos, que se desenvolvem paralelamente às plataformas até ao muro de contenção (Fig. 09a,f).

O sistema estrutural principal da estação caracteriza-se por paredes exteriores portantes em alvenaria de pedra, com pavimentos em estrutura mista betão-madeira ou estrutura metálica-madeira, coberturas em madeira, nos torreões e alas, e uma cobertura mista madeira-metálica no átrio.

Intervenções anteriores

O histórico de intervenções a que se teve acesso não reporta alterações nem correções significativas ao sistema estrutural principal. De facto, apenas foram realizados ajustes arquitetónicos, com impacto estrutural limitado, e localizados:

- i) em ambas as alas, para introdução de sobrelojas em pisos intermédios (e respetivas escadas de acesso), realizados já em pavimentos aligeirados de betão armado apoiados na estrutura principal existente, e para introdução de elevadores junto ao extremo Este de cada ala;
- ii) na ala Norte, para adaptação do espaço à função de instalação hoteleira envolvendo a criação de *mezzanines* e de uma escada metálica de emergência interior.

Outras intervenções que foram ocorrendo, incidiram apenas em elementos não estruturais e configuraram operações de restauro e manutenção para beneficiação das fachadas, com recuperação de caixilharias, das coberturas, incluindo a da gare, e da iluminação exterior.

Os azulejos do átrio foram recentemente objeto de obras de conservação (meados da década de 2010) e, entre 2021 e 2022, decorreram obras de substituição do estuque decorativo do teto do átrio, substituição da telha da cobertura e montagem de passadiços metálicos no desvão da cobertura para facilitar ações de inspeção e manutenção.

Danos estruturais existentes

Em termos estruturais a Estação de São Bento encontra-se em bom estado de conservação [4] não inspirando cuidados de maior, apesar da evidência de alguns danos estruturais que, aparentemente, não se afiguram ativos. Esses danos estruturais ocorrem na zona Sul do edifício, e manifestam-se por:

- i. aberturas de juntas nos vãos (arcos e padieiras) do átrio, na fachada Oeste (Fig. 10a,b) e na parede que divide o átrio da gare (Fig. 10c);
- ii. fissuras diagonais na parede do sótão do Torreão e da Ala Sul (Fig. 10d).

Embora não tenha sido possível estabelecer a sua causa, estes danos estruturais sugerem uma tendência de movimento global em direção a sul da zona sul do vestíbulo e do torreão Sul, sendo plausível alguma relação com movimentos da fundação ou alterações do nível freático naquela zona aquando de trabalhos que tenham ocorrido na envolvente. A este propósito é oportuno referir que, a partir de sondagens realizadas já no âmbito da preparação dos trabalhos do MdP, confirma-se a existência de fundações diretas superficiais pouco profundas do lado Norte do edifício da estação (visíveis na sondagem ilustrada na Fig. 11a), ao passo que do lado Sul a base dos elementos de fundação se apresenta bastante mais profunda (Fig. 11b). Acresce que, em registos históricos relativos à construção da estação, se encontram menções a grande profundidade das fundações do lado Sul, não sendo de excluir a possibilidade de existir estacaria de madeira tal como noutros edifícios da época na baixa do Porto.

Proximidade à obra e potenciais impactos

Considerando o tipo e localização das obras da nova Estação da Liberdade que decorrem defronte à parede da fachada principal do átrio e dos torreões, bem como da fachada Norte do torreão e da ala Norte, é plausível

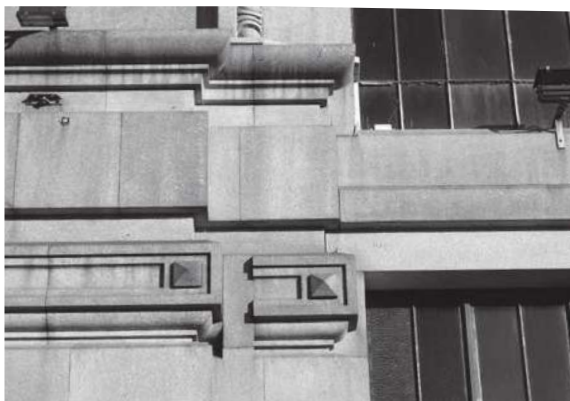


Fig. 10. Estação de São Bento - danos estruturais na zona Sul do edifício da estação:
(a) arcos e (b) padieiras de vãos da fachada principal, Oeste;
(c) da parede que divide o átrio da gare e (d) fissuração no sótão do Torreão Sul

Fig. 11. Estação de São Bento: sondagens à fundação dos cunhais frontais: (a) Norte e (b) Sul

admitir que os eventuais impactos da obra no edifício da estação se localizem apenas nas zonas da parede da fachada principal Oeste, das paredes das fachadas laterais Norte e Sul, e das paredes transversais interiores que contêm os painéis de azulejos (Norte e Sul) do átrio. Os potenciais impactos poderão consistir em:

- i) assentamento vertical da base das referidas paredes,
- ii) rotações da parede da fachada (para fora-do-plano e/ou no seu próprio plano),
- iii) aberturas de fendas/juntas no plano das paredes e/ou nos cunhais de ligação entre paredes perpendiculares e
- iv) vibrações.

Complexo Arquitetónico dos Clérigos

Descrição sumária construtiva e estrutural

O Conjunto Arquitetónico Clérigos, constituído pela Igreja, Museu e Torre, localiza-se no centro do Porto e confronta a Norte com a Rua de São Filipe de Nery, a Sul com a Rua da Assunção, a Este com o cruzamento das Ruas das Carmelitas e dos Clérigos, e a Oeste com o Campo dos Mártires da Pátria (Fig. 12).

O conjunto arquitetónico foi construído no século XVIII, com projeto do arquiteto Nicolau Nasoni, e classificado em 1910 como Monumento Nacional (Categoria: MN – Monumento Nacional, Decreto de 16-06-1910, DG n.º 136 de 23 junho 1910/ZEP, Portaria, DG, 2.ª série, n.º 6 de 08 janeiro 1954) [2].

A Igreja é composta por nave única, capela-mor de planta retangular, coro-alto junto à fachada principal e sacristia no tardo da capela-mor. O Museu corresponde ao volume central com cinco pisos; efetua a ligação entre a Igreja e a Torre e funcionou como Hospital até aos finais do século XIX. A Torre, adjacente ao museu, tem planta quadrangular e aproximadamente 75 m de altura, desde a base até ao topo da cruz de ferro, e constitui o ex-libris da cidade do Porto.

A Igreja tem planta elíptica (Fig. 13a), com uma nave única coberta por uma cúpula onde se observa, ao centro, o brasão da Irmandade dos Clérigos (Fig. 13b) e possui dimensões aproximadas em planta de 37x19 m². As paredes são constituídas por dois paramentos de alvenaria que ladeiam corredores e escadas laterais, exteriores à nave e à capela-mor (Fig. 13c), de acesso a zonas

mais elevadas (como o coro-alto) e a pontos de observação da nave e da capela-mor.

O Museu, onde outrora funcionou o Hospital, está instalado no edifício no tardo da Igreja, apresenta linhas mais sóbrias, com uma planta retangular que “afunila” na zona de ligação à Torre. Em planta, as dimensões aproximadas são de 28x14 m², com a largura a decrescer para cerca de 8 m, quando encosta à Torre. Possui paredes portantes de alvenaria de pedra e pisos em madeira, com lajeados de granito nas zonas da escadaria lateral interior. A semelhança da Igreja e dos pisos da Torre adjacentes ao Museu, em 2013 foi alvo de uma intervenção arquitetónica e estrutural de reabilitação que criou as valências exigidas a um museu moderno.

Quanto à Torre, apesar de inicialmente ter estado prevista a construção de duas torres nas fachadas laterais da Igreja, a pedido da Irmandade dos Clérigos, Nicolau Nasoni apresentou o projeto de uma torre para o conjunto dos Clérigos. De acordo com este projeto, a Torre viria a ser inserida no tardo do edifício do Hospital (atual Museu), criando um corpo de transição com paredes que convergiriam para a Torre. Construída em granito, com características exemplares do estilo Barroco, a Torre dos Clérigos desenvolve-se em altura ao longo de patamares localizados a diferentes cotas e acedidos por uma escada interior em granito (Fig. 14a,b) com um total de 225 degraus, que dá acesso a dois varandins, a duas cotas distintas (Fig. 14c,d) com uma vista panorâmica da cidade do Porto.

Intervenções anteriores

Em traços gerais, a história da construção do Conjunto Arquitetónico Clérigos, que decorreu de 1732 a 1773, pode ser dividida em três fases:

- a construção da Igreja, entre os anos de 1732 e 1750,
- a construção do Hospital (atual Museu) e da Torre, entre os anos de 1754 e 1763 e
- a alteração da Capela-Mor entre os anos de 1767 e de 1773.

O processo de construção da Igreja foi demorado e com interrupções devidas ao aparecimento de fissuras na fachada principal, atribuídas à inadequabilidade das fundações para sustentar a fachada idealizada, e, posteriormente, fissuras na cúpula que obrigaram a rever os planos



Fig. 12. Conjunto Arquitetónico Clérigos: (a) localização [1], (b) fachada principal da Igreja, (c) fachada principal da Torre e (d) alçado norte

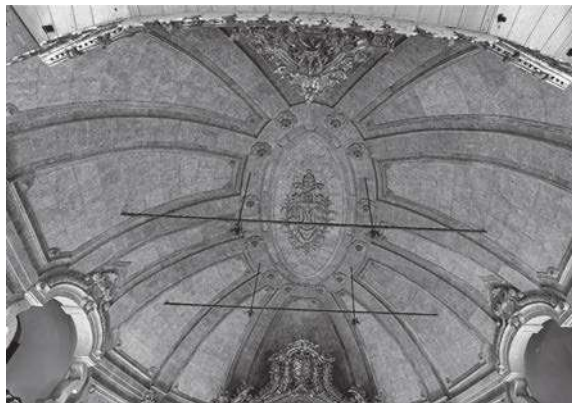


Fig. 13. Igreja dos Clérigos: (a) vista da Igreja a partir do coro-alto, (b) cúpula abobadada da Igreja e (c) corredores laterais à nave da Igreja

previstos para a cúpula executada em alvenaria de pedra.

Com base na documentação fornecida e na inspeção realizada [5], constatou-se que todo o conjunto arquitetônico foi sujeito a intervenções de cariz cultural e estrutural. Quase imediatamente após a conclusão das obras de construção do conjunto, foi efetuada a primeira alteração na sua volumetria interna, com a ampliação e alteração da forma da capela-mor, passando de uma abside semicircular, com janelas laterais, para o espaço retangular que hoje existe.

A principal modificação em relação ao projeto original diz respeito ao encerramento do lanternim que inicialmente existia na cúpula da Igreja e a cujo peso foi atribuída a ocorrência de fissuras na cúpula nos primeiros anos de construção.

De acordo com os documentos de arquivo, a forma original das escadas da fachada principal foi alterada para a sua forma atual em 1827, admitindo-se que a alteração tenha sido efetuada por forma a possibilitar a inserção de um novo arruamento.

No século XX foi substituída grande parte da estrutura de cobertura, da Igreja e do edifício do Hospital, que era constituída por elementos de madeira. A nova estrutura de cobertura foi executada em betão armado, integrando-se na mesma alguns dos elementos originais em madeira, reforçados com tirantes de aço.

Em 2013, por ocasião da comemoração dos 250 anos da construção da Torre, ocorreu a última intervenção de restauro e recuperação do património móvel e integrado bem como de todo o conjunto edificado. Os sistemas construtivos existentes foram preservados e restaurados com recurso a técnicas tradicionais, mantendo-se os pavimentos em madeira ou substituindo-os por elementos similares. Na Torre não há registos de ter sido realizada qualquer intervenção estrutural, tendo sido apenas acrescentados estrados e guardas metálicas para melhoria das condições de segurança dos visitantes. Esta intervenção terá colmatado grande parte dos danos anteriormente existentes na Igreja e no Museu.

Danos estruturais existentes

Na zona da Igreja, destacam-se as fissuras observadas na fronteira entre arco triunfal da igreja e a abóbada da capela-mor, nas paredes dos corredores laterais da nave e nos degraus entre a nave e a capela-mor.

Na Torre, pelo seu interior, são bem visíveis fissuras que não são recentes, tendo começado a ser monitorizadas desde, pelo menos, 1982 (ano de colocação dos testemunhos de cimento). Apresentam um padrão tendencialmente vertical na face interior das paredes do contorno exterior, e horizontal nos degraus, que também funcionam como elementos de ligação entre o núcleo central e as paredes anteriores. Apesar de não ser possível apontar uma causa única e definitiva para estas fissuras, admite-se que estejam relacionadas com a existência de deformações diferenciadas entre o núcleo interno da torre e as paredes exteriores, e que resultará de estados de tensão vertical e ações térmicas distintos entre os dois elementos, associados a eventuais assentamentos diferenciais entre esses elementos.

Proximidade à obra e potenciais impactos

Face à localização das obras de escavação do túnel próximas do cunhal Nordeste da Igreja dos Clérigos, considera-se plausível admitir que os eventuais impactos da obra no Complexo Arquitetónico dos Clérigos se concentrem na zona da galilé da igreja, em particular na parede da sua fachada principal Este e nas paredes laterais Norte e Sul que possuem grandes aberturas. No entanto, dadas as características particulares do teto abobadado da igreja e da constituição das paredes longitudinais que suportam a abóbada, bem como os danos estruturais já ocorridos nessas zonas, e ainda as características do maciço de fundação subjacente, considera-se também importante admitir a possibilidade de ocorrência de impactos na parede lateral Norte da nave da igreja. Adicionalmente, tendo em conta a esbelteza da torre, a sua vulnerabilidade face a movimentos do solo e os danos estruturais já existentes, não deve ser descurada a suscetibilidade de ocorrerem impactos da obra também na estrutura da torre. À semelhança dos dois casos anteriores, os potenciais impactos poderão consistir em:

- i) assentamento vertical da base dos cunhais da galilé, da parede Norte da nave da igreja e da torre,
- ii) rotações das paredes das fachadas Este e Norte da igreja (para fora-do-plano e/ou no seu próprio plano), bem como da torre,
- iii) aberturas de fendas/juntas no plano das mesmas paredes e/ou nos cunhais de ligação entre paredes e
- iv) vibrações.



Fig. 14. Torre da Igreja dos Clérigos:

(a) e (b) escada interior,

(c) vista exterior do varandim à cota mais alta e (d) vista exterior do varandim inferior

Monitorização e observação estrutural

Grandezas a medir e equipamentos de medida

Conforme anteriormente descrito, nos três monumentos em observação, as grandezas físicas a medir são:

- i) assentamentos verticais,
- ii) rotações em relação à vertical,
- iii) deslocamentos relativos entre dois pontos (associados a movimentos de juntas ou fendas) e
- iv) acelerações ou velocidades associadas a vibrações da estrutura.

Adicionalmente, dado que se trata de monitorização de longa duração, é necessário medir também a temperatura, próximo dos locais de medição de outras grandezas, de modo que às variações dessas grandezas possa ser retirada a influência devida à variação térmica que, inevitavelmente, está sempre presente nas estruturas e/ou nos equipamentos independentemente de outras perturbações externas.

Para medir as grandezas referidas foram adotados os tipos de sensores descritos em seguida.

Sensores de pressão hidrostática

A medição de assentamentos verticais é feita indiretamente através de sensores de pressão hidráulica, destinados a medir variações de pressão hidrostática nos pontos onde se pretende avaliar o assentamento. São também aqui designados por Sensores de Nível (SN) porque, estando interligados entre si por um sistema hidráulico (de água, no presente caso), estes sensores medem a variação de pressão da coluna de água nos seus respetivos pontos; deste modo é possível obter o desnível desses pontos relativamente a um local onde se espera não haver variação de nível (local monitorizado com um sensor de nível designado por “sensor de Referência”).

Os resultados dos registos destes sensores são expressos pela diferença de leitura entre um dado sensor e a leitura do sensor de referência. Valores positivos dessa diferença correspondem a um deslocamento vertical descendente de um dado sensor SN_# relativamente ao de referência, ou seja a um assentamento do ponto da estrutura a que está fixado esse sensor SN_#.

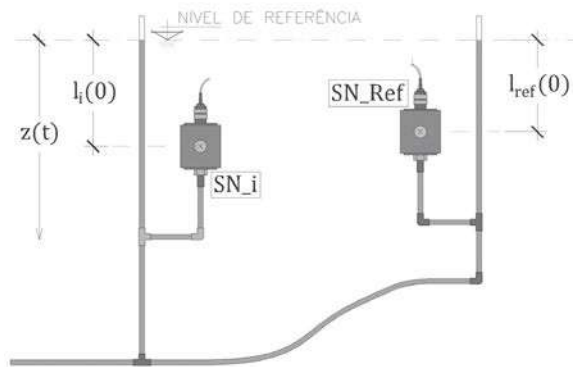


Fig. 15. Medição de assentamentos: (a) Sensor de nível instalado e (b) Esquema de instalação com sensor de referência

Dado que os assentamentos devem ser sempre pequenos, então também serão reduzidas as variações de pressão, o que requer a adoção de equipamentos muito sensíveis. É o caso do tipo de sensor adotado neste sistema, ilustrado na Fig. 15, que incorpora uma célula cerâmica para medição de baixos valores de pressão com transmissão elétrica analógica. Adicionalmente, este equipamento possui um sensor de temperatura integrado e um microprocessador que realiza, de forma automática, a compensação de efeitos térmicos que podem afetar os resultados da medição de pressão diretamente obtida na célula cerâmica.

Sensores de rotação – Clinômetros

A medição de rotações em relação à vertical é feita por sensores de rotação (ou Clinômetros) bidirecionais, que registam, cada um, rotações em torno de dois eixos horizontais ortogonais. O tipo de sensor adotado é, na realidade, um transdutor de acelerações baseado em tecnologia MEMS (*Micro-Eleto-Mechanical Systems*), que permite medir a inclinação do vetor vertical da aceleração da gravidade em relação ao sistema de eixos do sensor e daí obter os valores das rotações absolutas com eixos horizontais ortogonais. A Fig. 16a ilustra um clinómetro já instalado numa parede de um dos monumentos, com indicação das direções A e B de medição da rotação; a relação destas direções com a orientação da parede em que se encontra instalado é ilustrada na Fig. 16b.

Sensores de deslocamento – Fissurómetros

Este tipo de sensor elétrico corresponde a um

transdutor de deslocamento, aqui designado de Fissurómetro (FS), é fixado à estrutura a monitorizar em dois pontos e mede a variação da distância entre esses pontos. Essa variação poderá corresponder ao movimento de abertura/fecho de uma junta ou fissura, já existente ou nova, localizada entre aqueles pontos, tal como mostra a Fig. 17 que ilustra um fissurómetro já instalado num dos imóveis monitorizados.

Sensores de vibração – acelerómetros

A medição de vibrações é feita através de acelerómetros triaxiais baseados na tecnologia MEMS (*Micro-Eleto-Mechanical Systems*) que permitem obter as três componentes do vetor vertical da aceleração da gravidade em relação ao sistema de eixos do sensor, a partir das quais é possível calcular os valores das acelerações segundo a direção vertical e outras duas direções horizontais ortogonais entre si. A partir dos registos

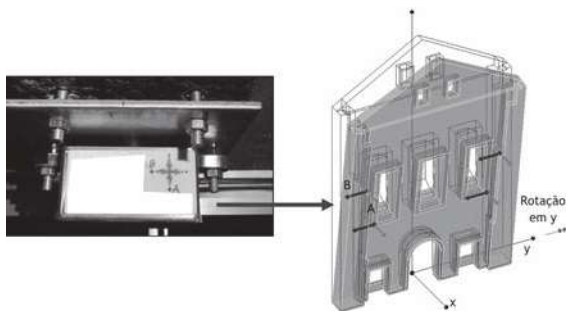


Fig. 16. Medição de rotações: (a) Clinómetro instalado e (b) Esquema de posicionamento numa parede

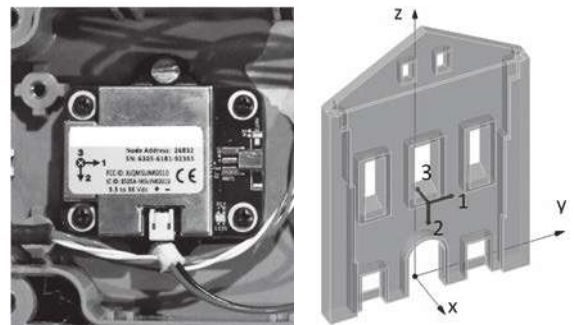


Fig. 17. Fissurómetro para medição de deslocamentos relativos entre dois pontos

Fig. 18. Medição de acelerações: (a) Acelerómetro instalado e (b) Esquema de posicionamento numa parede

temporais de acelerações, são obtidas as séries temporais de velocidades por integração numérica. A Fig. 18a ilustra um acelerómetro já instalado numa parede de um dos monumentos, com indicação das direções 1, 2 e 3 de medição da aceleração no sistema de eixos local do sensor; a relação destas direções com a orientação da parede em que se encontra instalado é ilustrada na Fig. 18b. Este tipo de sensor adotado dispõe de capacidade de transmissão de dados *wireless* para um equipamento recetor dos dados de todos os sensores.

Sensores de temperatura

A medição de temperatura é feita através de sensores constituídos por uma sonda (Fig. 19a) tipo Pt100 (elemento sensor de platina com resistência de 100 Ω a 0 °C) cuja resistência elétrica varia com a temperatura. A variação de resistência é convertida num sinal de corrente elétrica, tipicamente de 4-20 mA, através de um transmissor de temperatura (Fig. 19b).



Fig. 19. Medição de temperatura: (a) Sonda e (b) Transmissor de temperatura

Arquitetura geral do sistema de monitorização

Além dos equipamentos de medida anteriormente descritos, o sistema de monitorização adotado compreende ainda os seguintes componentes físicos, que se encontram ilustrados na Fig. 20:

- i) Módulos de aquisição (Fig. 20a) de sinais dos sensores que lhes estão ligados por cabo (todos os acima referidos, com exceção dos acelerómetros), armazenamento local de dados e sua transmissão *wireless* para um módulo agregador de sinais;
- ii) Módulo agregador (Fig. 20b) de sinais (ou *gateway*) provenientes, via *wireless*, dos módulos de aquisição de sinais e dos acelerómetros (que também possuem capacidade de armazenamento local de dados e sua transmissão *wireless*);
- iii) Router/modem de transmissão remota de dados por internet via GSM (Fig. 20b), para computador de armazenamento, tratamento e visualização de dados (localizado na FEUP)
- iv) Sistema de alimentação elétrica ininterrupta a todos os equipamentos (Fig. 20b).

Instalação do sistema

A instalação do sistema de monitorização estática e dinâmica, foi naturalmente precedida da definição de um plano de instrumentação detalhado contendo a localização de todos os equipamentos e as diversas ligações entre eles.

Foi primeiro instalado o sistema de monitorização na Igreja dos Congregados, a que se seguiu o da Estação de São Bento e por fim o do Complexo Arquitetónico dos Clérigos.

Todos os trabalhos de preparação, verificação e instalação da instrumentação foram realizados com o apoio dos recursos humanos e técnicos do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da FEUP, sob coordenação direta do primeiro autor.

A sequência de procedimentos foi idêntica nos três casos e consistiu essencialmente em:

- i. Preparação prévia de toda a instrumentação e equipamento em laboratório;
- ii. Instalação de toda a rede hidráulica e elétrica que interliga os sensores de nível, seguida da instalação

- desses sensores;
- iii. Instalação dos clinômetros, fissurômetros e sensores de temperatura bem como de toda a cablagem de interligação elétrica;
- iv. Instalação dos módulos de aquisição e execução das ligações dos sensores aos módulos;
- v. Instalação dos sensores de vibração;
- vi. Instalação do *gateway* e do *router/modem* de transmissão remota de dados;
- vii. Teste de funcionamento do sistema.

A título exemplificativo, e por ser o mais simples, apresentam-se em seguida algumas imagens relativas à configuração e à instalação do sistema de monitorização da Igreja dos Congregados.

Os sensores e equipamentos instalados foram agrupados em zonas (definidas longitudinalmente em planta, Fig. 21) e algumas delas em níveis (definidos em altura, Fig. 22). Neste caso dos Congregados, existem apenas duas zonas com sensores e uma zona com o equipamento de recolha de sinais e transmissão para o exterior (Fig. 21). A Zona 0 corresponde à área do altar

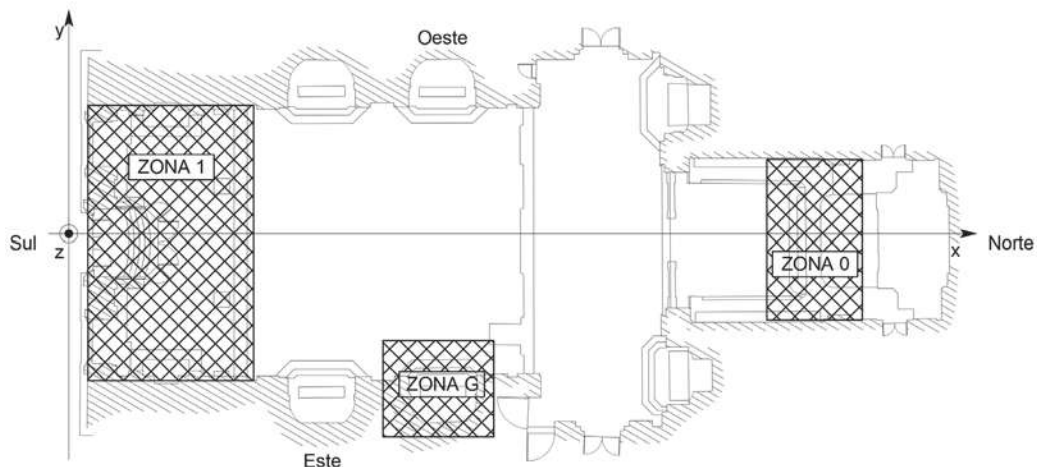
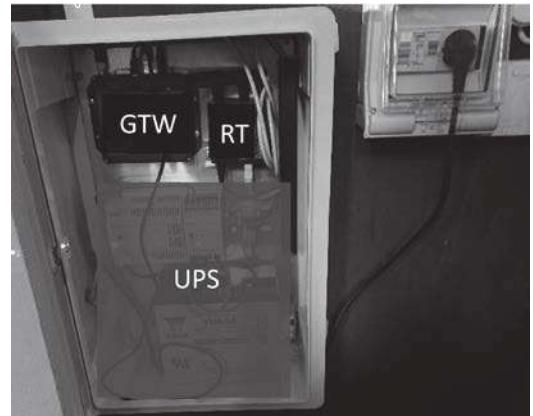


Fig. 20. Equipamentos complementares do sistema de monitorização: (a) Módulos de aquisição e transmissão de dados; (b) Módulo agregador - *Gateway* (GTW), *router* (RT) e alimentação elétrica ininterrupta (UPS)

Fig. 21. Igreja dos Congregados: planta de zonas de instalação de sensores de monitorização e sistema de referência global

principal e possui apenas um nível, o Nível 0 (rés-do-chão). A Zona 1 compreende a área entre a fachada principal a Sul e as colunas do coro-alto e é composta por três níveis: Nível 0, Nível 1 (coro-alto) e Nível 2 (varandim interior), conforme indicado na Fig. 21 e na Fig. 22. Por fim, a Zona G situa-se no púlpito da parede lateral Este (Fig. 21) e apenas contém o gateway e o router/modem de dados anteriormente referidos.

A Fig. 23 apresenta o esquema de posicionamento em alçado dos sensores na Zona 1, que inclui 18 dos total dos 20 sensores instalados na Igreja dos Congregados. Por sua vez, o posicionamento em planta de todos os sensores é apresentado na Fig. 24, Fig. 25 e Fig. 26, respetivamente, para os Níveis 0, 1 e 2.

O esquema de interligação física entre os diversos sensores e restantes equipamentos do sistema localizados nas Zonas 1 e 0 encontra-se ilustrado na Fig. 27.

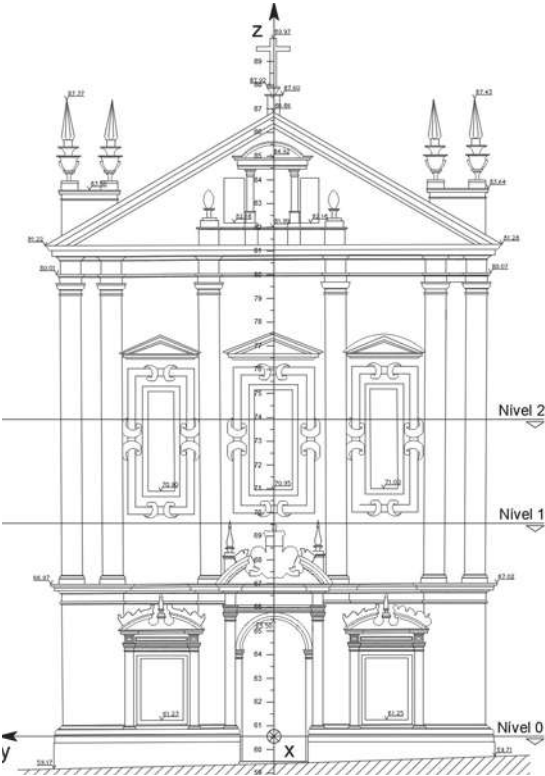


Fig. 22. Igreja dos Congregados: níveis de instalação de sensores de monitorização e sistema de referência global

A título ilustrativo, da Fig. 28 à Fig. 30, apresentam-se imagens de alguns dos sensores instalados nos vários níveis e zonas bem como de algumas fases do processo de instalação.

O tipo de sensores e equipamentos acima referidos foram adotados igualmente na Estação de São Bento onde foram instalados:

- i. sensores de nível e de rotação ao longo de toda a fachada principal,
- ii. fissurómetros nas paredes dos painéis de azulejo Norte e Sul do átrio e nas paredes de sótão dos torreões,
- iii. sensores de vibração nos painéis de azulejo e
- iv. diversos sensores de temperatura dispersos pelas várias zonas monitorizadas.

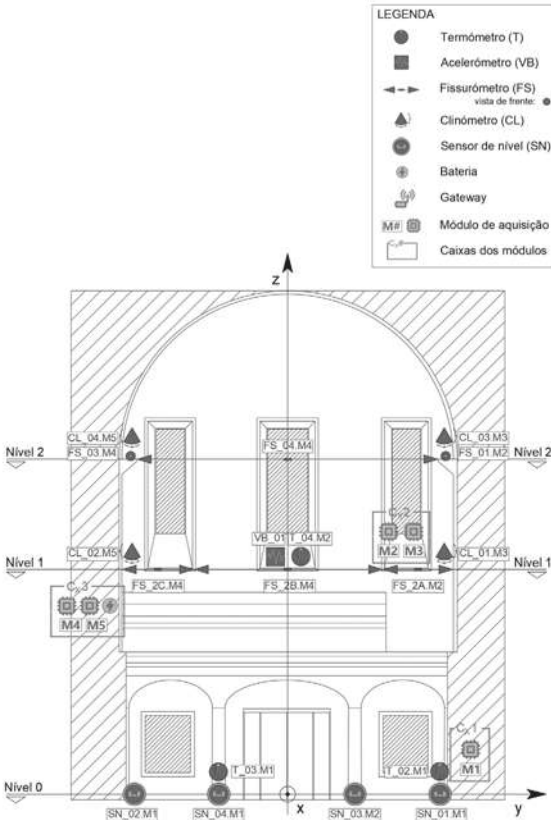


Fig. 23. Igreja dos Congregados: alçado interno e vista de distribuição de sensores na Zona 1

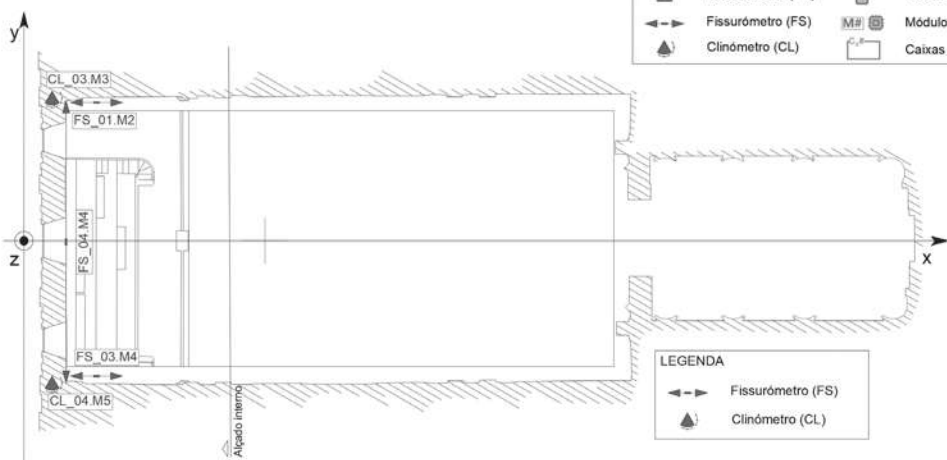
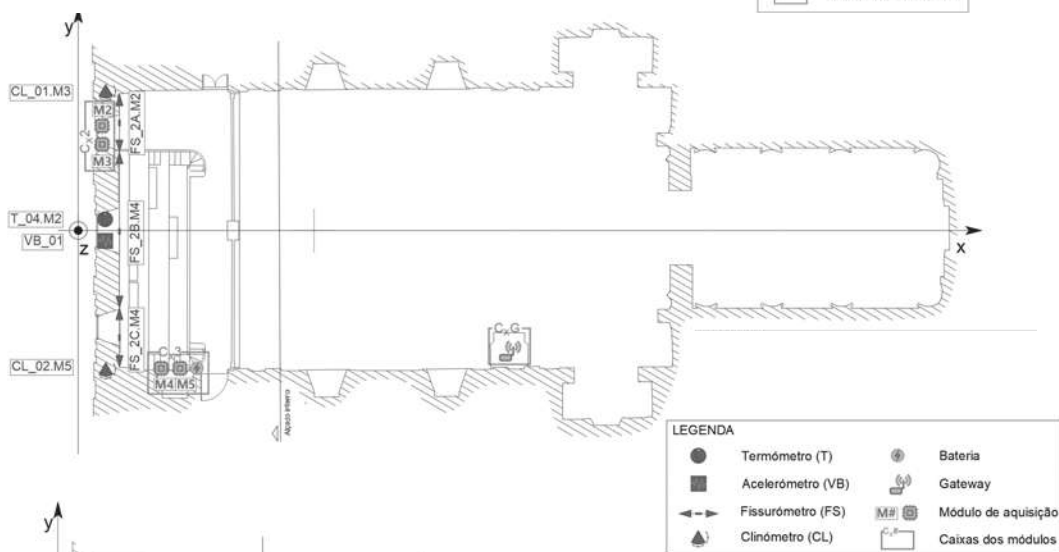
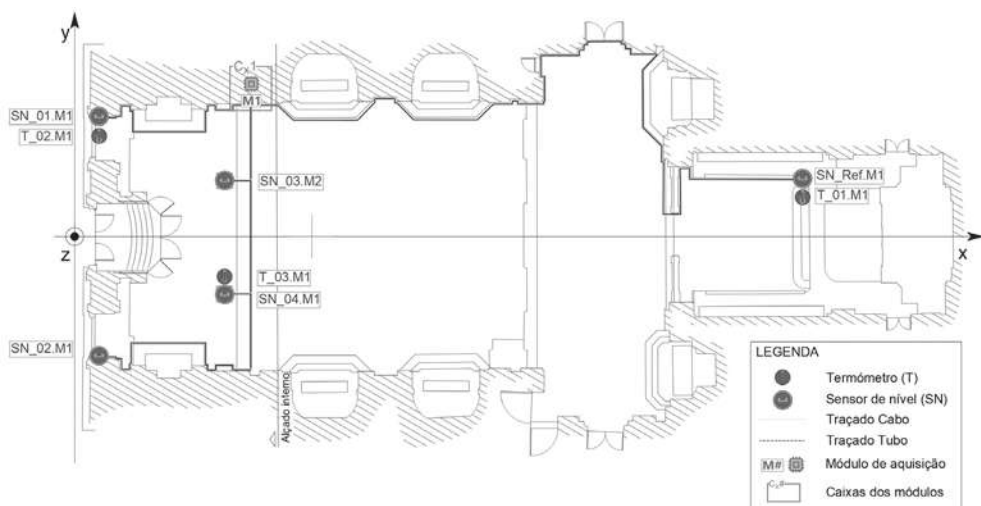
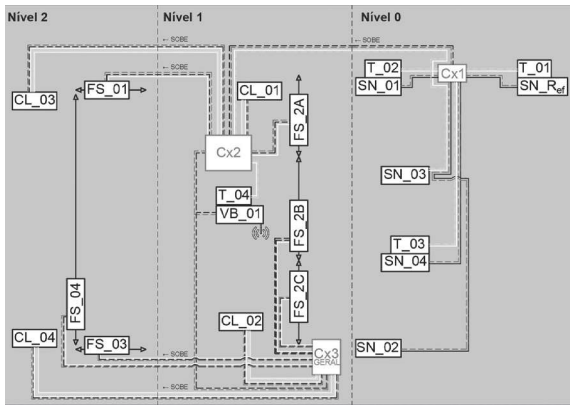


Fig. 24. Igreja dos Congregados: localização em planta dos sensores instalados ao Nível 0 na Zona 1 e na Zona G

Fig. 25. Igreja dos Congregados: localização em planta dos sensores e equipamentos instalados ao Nível 1 na Zona 1 e na Zona G

Fig. 26. Igreja dos Congregados: localização em planta dos sensores instalados ao Nível 2 (do varandim) na Zona 1



De igual forma, no Complexo dos Clérigos, foram instalados:

- sensores de nível na galilé e nave da Igreja e na base da Torre,
- sensores de rotação nos cunhais da galilé da Igreja, na parede lateral Norte da nave da Igreja e em três níveis da Torre,
- fissurómetros nas paredes da galilé, na parede lateral Norte da nave da Igreja e em dois níveis da Torre,
- sensores de vibração na base da parede lateral Norte da nave da Igreja e, na mesma prumada, na base da cúpula da nave, bem como na base da Torre e à cota alta da mesma e
- diversos sensores de temperatura.



Fig. 27. Igreja dos Congregados: Esquema geral de ligação dos sensores e restantes equipamentos nas Zonas 0 e 1

Fig. 28. Igreja dos Congregados - Sensores de nível instalados e em funcionamento no Nível 0, nas Zona 1 e 0: (a) junto à fachada; (b) numa das colunas de suporte do coro-alto;



(c) junto ao altar;
(d) a (g) fases de montagem

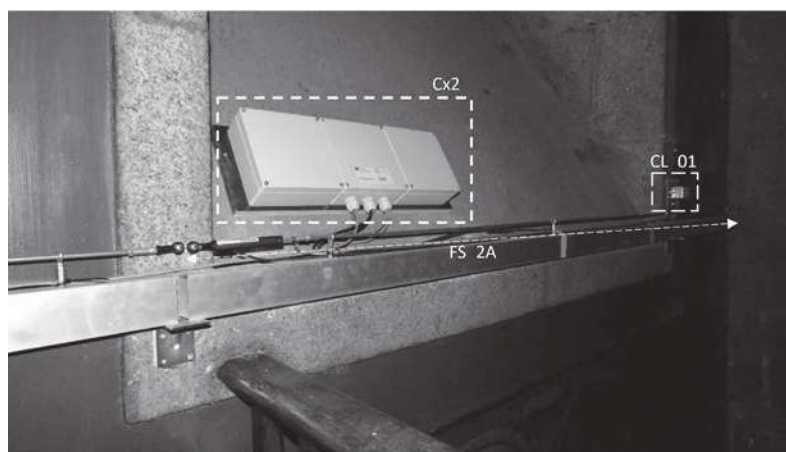
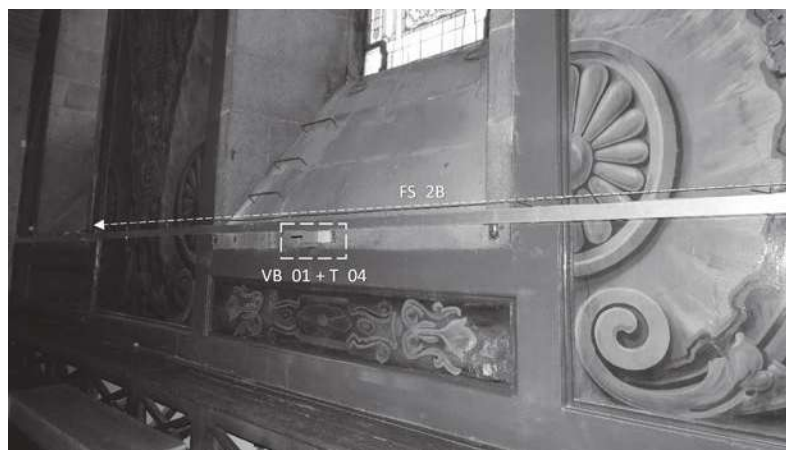
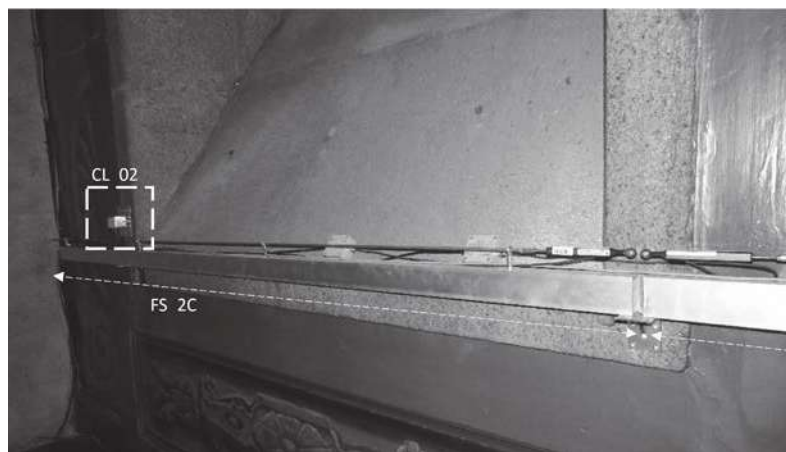


Fig. 29. Igreja dos Congregados - Sensores instalados e em funcionamento no Nível 1, na Zona 1 junto à fachada:
(a) janela Este;
(b) janela central;
(c) janela Oeste

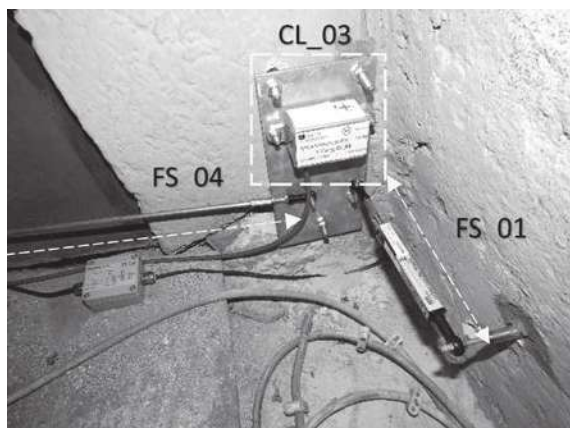
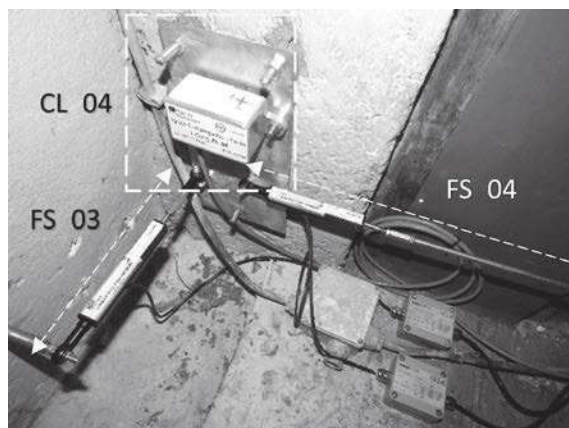


Fig. 30. Igreja dos Congregados - Sensores de nível instalados e em funcionamento no Nível 2, na Zona 1 junto à fachada:
(a) canto Este; (b) canto Oeste;
(c) varandim e janela Este; (d) varandim e janela Oeste;
(e) e (f) fases de montagem

Aquisição, transmissão, armazenamento e visualização de dados

A aquisição de dados com o sistema de monitorização instalado é feita de forma contínua e registada localmente nos módulos de aquisição e na *gateway*. Esta encontra-se integrada numa rede local gerida pelo *router*, dotado de um *modem* que permite o acesso a partir do exterior via *internet* para a recolha (*download*) de dados.

O acesso à *gateway*, seja para gestão e configuração do sistema ou para recolha de dados, pode ser feito de duas formas:

- Localmente, através de um computador ligado diretamente à *gateway* por USB e de software próprio da marca dos equipamentos de aquisição;
- remotamente, via *internet* usando uma rede privada virtual (VPN), a partir de um computador externo e usando o mesmo software da marca ou uma aplicação especificamente desenvolvida para, em tempo

real, descarregar os dados existentes na *gateway* para uma base de dados de séries temporais, *open-source*, alojada num servidor na FEUP.

A informação armazenada na base de dados é acedida por duas aplicações informáticas específicas para:

- visualização contínua dos dados em painéis de controlo (*dashboards*) acessíveis através um browser, construídos numa plataforma *open-source*; exemplos desses *dashboards* são apresentados da Fig. 31 à Fig. 34, para resultados dos diferentes tipos de sensores (de vibração, de nível, clinómetros e fissurómetros)
- geração automática de relatórios de monitorização contendo informação sob forma gráfica de evoluções de séries temporais de dados e também sob a forma de tabelas que resumem, por exemplo, valores máximos de grandezas medidas em períodos temporais definidos pelo utilizador.

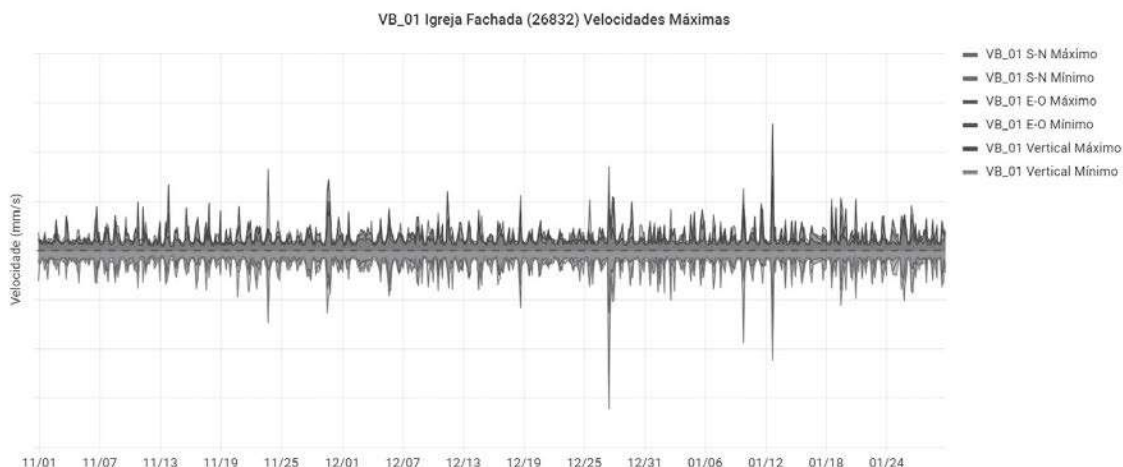


Fig. 31. Igreja dos Congregados – Dashboards de velocidades máximas obtidas dos sensores do sensor de vibração

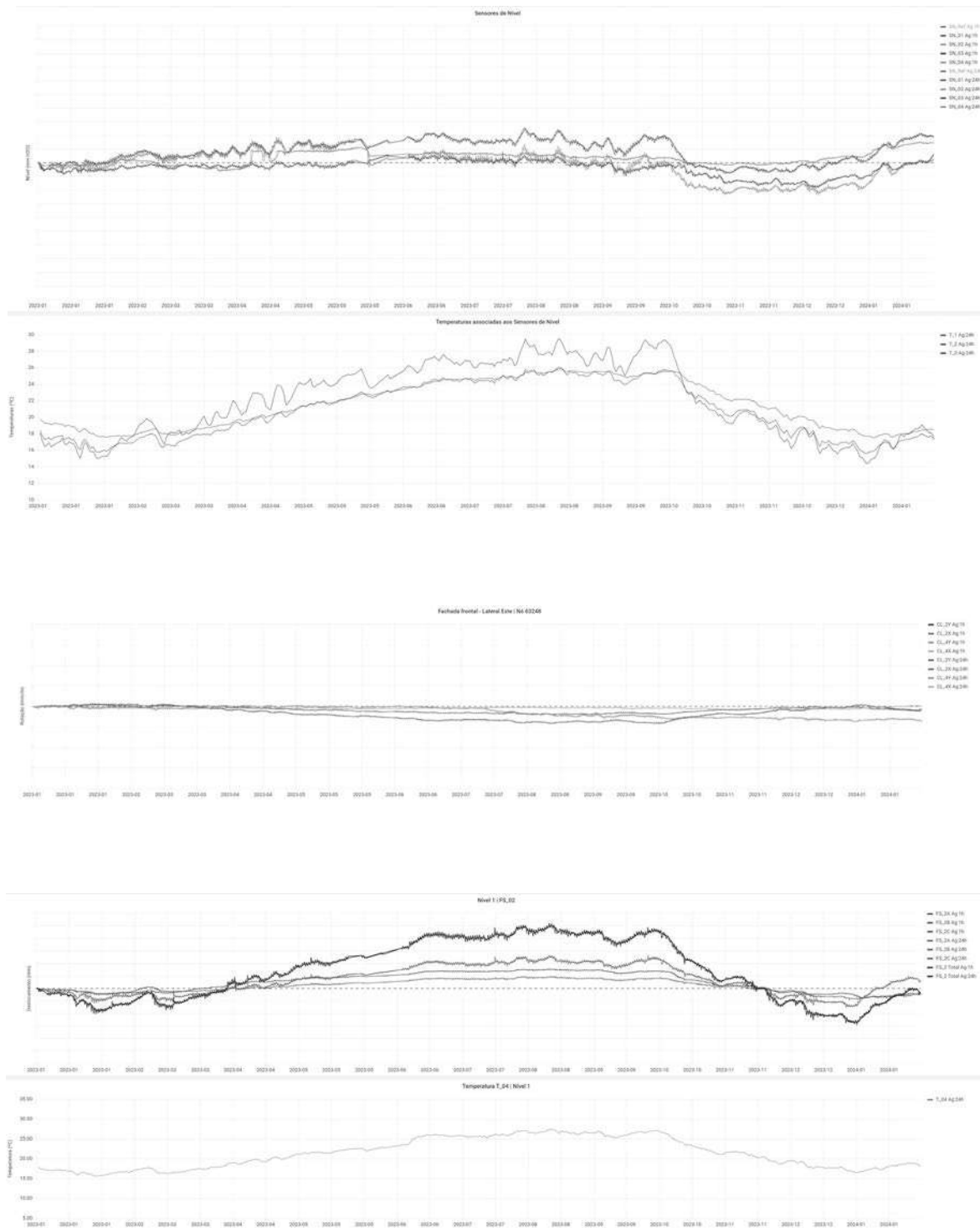


Fig. 32. Igreja dos Congregados - Dashboards de sensores de nível e de temperatura

Fig. 33. Igreja dos Congregados - Dashboards de clinómetros

Fig. 34. Igreja dos Congregados - Dashboards de fissurômetros e sensor de temperatura

A arquitetura do fluxo de dados desde a sua geração até à sua visualização e reporte escrito encontra-se esquematizada na Fig. 35.

Com base nesta plataforma digital desenvolvida para acesso aos dados obtidos dos sistemas de monitorização estrutural da Igreja dos Congregados, da Estação de São Bento e do Complexo dos Clérigos, torna-se particularmente simples e eficiente a sua visualização contínua e reporte em tempo útil.

Além disso, a plataforma é facilmente escalável para sistemas de monitorização de outras obras, permitindo também:

- i. a emissão de alertas (embora ainda não implementado) caso sejam atingidos ou ultrapassados limites (previamente definidos) de grandezas sob monitorização;
- ii. a construção de gémeos digitais (*Digital Twins*) das obras monitorizadas, através da expansão de modelos BIM com camadas adicionais de dados de monitorização que possibilitem a sua visualização de forma mais facilitada e intuitiva (estando já em curso a construção de um *Digital Twin* de um dos monumentos sob monitorização no âmbito deste projeto).

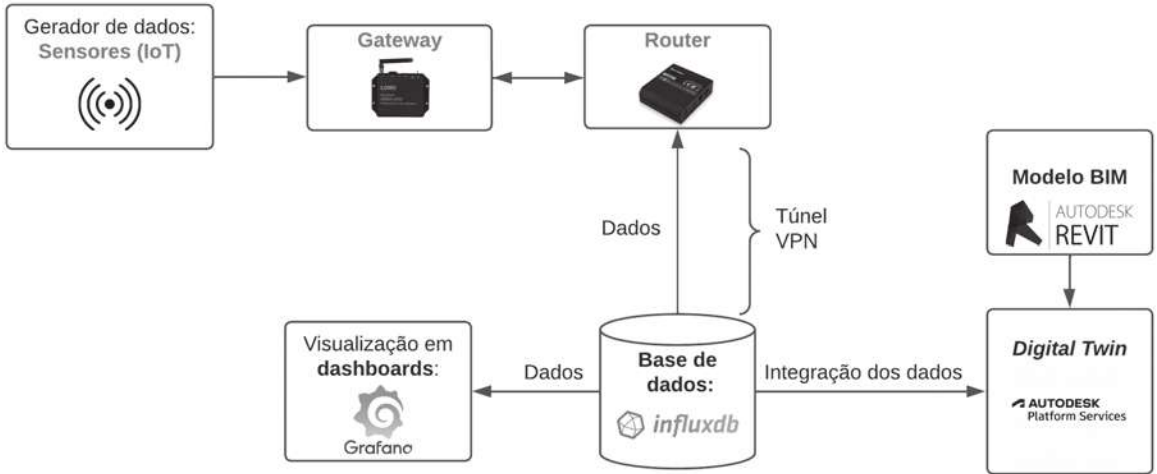


Fig. 35. Fluxo de dados da monitorização: da geração aos Dashboards e aos relatórios

Notas finais

A monitorização estrutural de construções históricas, como a que acaba de ser apresentada, envolve características e desafios particulares, desde logo na conceção de todo o sistema e na distribuição e localização dos sensores a instalar.

Apesar dos tipos de sensores utilizados serem comuns a operações de monitorização realizadas noutro tipo de estruturas modernas ou contemporâneas, correntes ou especiais, mas sobretudo mais monolíticas, há cuidados particulares a ter na adoção desses sensores pelo facto de as estruturas antigas, tipicamente construídas em alvenaria (de pedra ou tijolo), terem uma constituição construtiva mais discreta. Desse facto resulta a possibilidade de ocorrerem movimentos localizados, aos quais a estrutura se consegue adaptar como um todo, mas de que podem resultar danos não aceitáveis, como é o caso de fissuração de património integrado, nomeadamente painéis de azulejos (como os da Estação de São Bento) ou outro tipo de revestimentos de elevado valor histórico e cultural. Este é, portanto, um aspeto importante, quando, por exemplo se trata de monitorizar possíveis aberturas de fissuras ou de juntas em elementos estruturais (paredes, arcos, etc.) descontínuos por natureza, nos quais a localização de maior potencial ocorrência de danos é muito imprevisível. De facto, esta é razão pela qual, nos sistemas de monitorização instalados, foram adotados fissurómetros com prolongamento adicional do campo objeto de medição de forma a poder ter a certeza de captar deformações localizadas ao longo de grandes extensões. Cuidado semelhante requer a monitorização de rotações, para a qual deve haver redundância na quantidade e localização de sensores, de modo a “filtrar” possíveis movimentos localizados.

Outro aspeto importante é o cuidado a ter na instalação de sensores, equipamentos e dispositivos adicionais indispensáveis ao correto funcionamento da instrumentação, de modo a minimizar eventuais perturbações no monumento (e que sejam eliminadas após retirada da instrumentação) e impactos visuais indesejáveis que

afetem a sua fruição cultural por parte dos utilizadores e visitantes.

Também relevante é a importância da multidisciplinaridade da equipa envolvida. O processo de monitorização é tanto mais rápido e eficaz quanto mais facilitado for o acesso à informação registada pelos sensores. Nesse sentido, o recurso a ferramentas tecnológicas como por exemplo, bases de dados de elevado desempenho, a sistemas de produção e visualização de *dashboards* e a software específico desenvolvido para a geração automática de relatórios de monitorização, é essencial para uma utilização e um aproveitamento pleno do sistema de monitorização.

Por fim, realça-se que estas operações de instalação de monitorização estrutural de construções históricas, para além dos inerentes investimentos financeiros (que até podem ser reduzidos no contexto de uma obra como a que aqui está em causa e face ao valor do património cultural envolvido), requerem uma forte mobilização de meios de acesso (por vezes muito complexo) aos locais de instalação da instrumentação, de pessoal especializado (e particularmente sensibilizado para a delicadeza do trabalho em objetos de património histórico) e de uma boa dose de engenho para adaptações aos imprevistos da realidade local. Neste contexto, e considerando a sensibilidade destas construções históricas face a perturbações do meio urbano envolvente, não deve ser desconsiderada a possibilidade de, pelo menos parte, da instrumentação instalada poder continuar a ser aproveitada para futura monitorização estrutural contínua que permita, não só detetar eventuais anomalias, mas também contribuir para um melhor conhecimento do comportamento a longo prazo destas estruturas antigas face às ações do meio envolvente ou até de degradação da própria construção.

Agradecimentos

O trabalho aqui descrito é, por natureza, multidisciplinar e requer o envolvimento de uma vasta equipa com diversas valências sem as quais não seria possível a sua realização. Além disso, também as atividades de instalação dos sistema de monitorização, em muito beneficiam da colaboração das entidades que tutelam e gerem os monumentos onde foram instalados aqueles sistemas.

Neste contexto, os autores expressam aqui o seu agradecimento às seguintes pessoas e instituições:

- aos colaboradores ativos da FEUP neste projeto, nomeadamente a Dr.^a Susana Moreira, o Prof. João Miranda Guedes, a Eng.^a Esmeralda Paupério, os Eng.^{os} Gabriel Ferreira, Helder Silva e Lucas Carvalho, o Dr. Rui Silva, os Técnicos do Laboratório de Estruturas Eng.^o Téc. Guilherme Nogueira, Dr. Nuno Pinto e Sr. Cláudio Ferraz;
- à Irmandade de Santo António dos Congregados, em particular na pessoa do Sr. Pe. José Magalhães e do Sr. Cônego Amadeu Ferreira da Silva, e dos zeladores da Igreja Sr. Nelson Lisboa e Sr. Fernando Moreira;
- à IP - Infraestruturas de Portugal, na pessoa dos seus colaboradores Eng.^a Ana Vaz Ribeiro, Técnico Rui Mourão e Dr. João Sousa;
- à Irmandade dos Clérigos, nomeadamente o seu Presidente Pe. Manuel Fernando, o seu Diretor Executivo Dr. António Tavares, e os colaboradores do *staff* local Sr.^s Lucílio Martins, Diogo Pinho, Daniel Marinho e Nuno Sousa
- à Direção Regional de Cultura do Norte (DRCN), à Câmara Municipal do Porto e à Metro do Porto S.A.

Referências

- [1] Google Inc., Google Earth, 2018.
- [2] DGPC (Direção-Geral do Património Cultural), “Monumentos,” Sistema de Informação Para o Património Arquitectónico, 2001-2016. [Online]. Available: <http://www.monumentos.gov.pt>. [Acedido em 2017].
- [3] A. Arêde, S. Moreira e E. Paupério, “Relatório de inspeção e diagnóstico estrutural – Igreja de Santo António dos Congregados” FEUP, 2021.
- [4] A. Arêde, S. Moreira, G. Ferreira e E. Paupério, “Relatório de inspeção e diagnóstico estrutural – Estação de São Bento” FEUP, 2022.
- [5] A. Arêde, J. Guedes, R. Silva e L. Carvalho, “Relatório de inspeção e diagnóstico estrutural – Conjunto Arquitectónico dos Clérigos” FEUP, 2023.

