

# Utilização de Estaca Raiz para Reforço de Fundação de Edificação Histórica: Estudo de Caso

Gláucia Nolasco de Almeida Mello <sup>[1]</sup>, Cynara Fiedler Bremer <sup>[2]</sup>, Hebert Gerson Soares Júnior <sup>[3]</sup>

[1] gnamello@pucminas.br. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais/Departamento de Engenharia Civil.

[2] cynarafiedlerbremer@ufmg.br. Universidade Federal de Minas Gerais/ Escola de Arquitetura/ Departamento de Tecnologia do Design.

[3] inventario@pucminas.br. Memorial da Arquidiocese de Belo Horizonte

## RESUMO

Neste artigo é apresentado um estudo de caso que descreve a solução adotada para o reforço da fundação de uma igreja tombada pelo patrimônio histórico. Parte da fundação dessa igreja sofreu recalque, o que provocou um leve tombamento da torre da lateral esquerda. Foram realizadas algumas visitas à edificação para a inspeção visual e identificação das manifestações e, posteriormente, acompanhamento da execução do reforço da fundação. Os sintomas e as manifestações patológicas foram registrados por meio de fotografias. Para o reforço da fundação a solução elegida foi estaca raiz e a execução destas foi acompanhada e registrada por meio de fotografias e vídeos. Foram identificados desaprumos nas alvenarias da fachada lateral esquerda e frontal, incluindo a torre esquerda em decorrência do recalque da fundação nesta região. As fissuras identificadas nessas alvenarias possuíam espessuras variando de 0,8 cm a 3,05 cm, ou seja, caracterizando a existência de trincas e rachaduras. Por ser uma igreja tombada pelo patrimônio histórico, as intervenções devem provocar impactos mínimos e preservar os aspectos e os elementos originais. Assim, a estaca raiz, é apropriada por sua facilidade de execução em locais com acesso limitado e, também, por provocar vibrações não tão intensas às estruturas. Foram executadas 16 estacas para reforçar a torre lateral esquerda.

**Palavras-chave:** Construções históricas, Reforço de fundação, Estaca raiz.

## ABSTRACT

*This paper presents a case study that describes the solution adopted to repair the foundation of the historical church. Part of the church's foundation was sinking, causing a slight tipping of the left tower of the church. There were some visits to the church for visual inspection and pathological manifestation identification and, subsequently, observation of the execution of the foundation reinforcement. The symptoms and pathological manifestations were recorded through photographs. To repair the foundation, the chosen solution was concrete piles and their execution was observed and recorded through photographs and videos. It was identified in the masonry of the left and front side façade, including the left tower, due to the foundation's sinking in this region. The cracks identified in these masonries had thicknesses ranging from 0.8 cm to 3.05 cm. Because it is a church listed by historical heritage, the interventions must have minimal impacts and preserve the original aspects and elements. Thus, concrete piles are appropriate for their ease of execution in places with limited access and also for causing not so intense vibrations to the structures.*

**Keywords:** *Historical heritage, Foundation repair, Concrete piles.*

## 1 Introdução

A Igreja Matriz de Nossa Senhora da Piedade, localizada no distrito de Piedade do Paraopeba, em Brumadinho/MG (Figura 1), teve suas origens em uma capela primitiva edificada presumivelmente na primeira metade do século XVIII. Conforme informações contidas na ficha de inventário da edificação, elaborada pelo Memorial da Arquidiocese de Belo Horizonte/Inventário do Patrimônio Cultural, documentos localizados no Arquivo Arquidiocesano de Belo Horizonte apontam que as “terras e capoeiras” foram doadas por Bento Rodrigues da Costa, em 27 de fevereiro de 1729, “a Nossa Senhora da Piedade sita na Paraopeba”, e que esse as “havia comprado ao Sargento Mór Leslico de Pontes Pinto” e “novamente se reedificara a Igreja de Nossa Senhora da Piedade”. A partir desta última informação infere-se que a edificação primitiva já existia, e que foi reconstruída ou passou por grandes reformas nesta época (MEMORIAL DA ARQUIDIOCESE DE BH, 2012). Ainda de acordo com o inventário mencionado, em uma reforma nos anos 1950 foi encontrado um fragmento de madeira com a inscrição MDCCXIII (1713) sob o piso de campas. Este ano passou a ser reconhecido pela população local como a data da construção da primeira capela e o fragmento permanece no interior da igreja até os dias atuais (MEMORIAL DA ARQUIDIOCESE DE BH, 2012).

**Figura 1** – Fachada frontal da Igreja Matriz de Nossa Senhora da Piedade, Brumadinho (MG).



Fonte: Acervo dos autores.

De acordo com o Dossiê de Tombamento (INSTITUTO NACIONAL DE PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO DE MINAS GERAIS, 2011) realizado pela Prefeitura de Brumadinho

e o Instituto Estadual do Patrimônio Histórico e Artístico de Minas Gerais, onde está situada, atualmente, a Igreja Matriz de Nossa Senhora da Piedade, uma capela de forma rudimentar foi construída em 1713. Por ordem de Bento Rodrigues, em 1729 iniciou-se sua reconstrução seguindo o estilo da primeira fase do barroco, mas também com influência da segunda fase do barroco/rococó. Entretanto, a estrutura que hoje se encontra erguida foi construída entre 1820 e 1830.

Essa igreja construída por ordem de Bento Rodrigues, no subsídio histórico para o projeto de restauração da Matriz Nossa Senhora da Piedade, realizado pelo historiador Bernardo Andrade, a mesma possuía um estilo comum às outras igrejas da época, com nave central e um altar mor em um retângulo, sacristia aos fundos e dois altares laterais. As paredes foram erguidas com tijolos de adobe e pau-a-pique; os esteios eram de braúna; as telhas, de cerâmica curvas; e não há registros sobre o piso e o forro, que provavelmente eram de tábuas de madeira (ANDRADE, 2014).

A matriz foi alicerçada sobre pedras e construída com alvenaria estrutural de pedra e adobe, cobertura de madeira e telhas cerâmicas. Os pisos eram de tábua corrida ao longo da nave central e em campas, lajes comumente utilizadas em lápides, distanciados do chão, na capela-mor. As duas torres vistas atualmente só foram erguidas em 1896-1897, por ordem do padre Ubaldo Anselmo da Silveira, juntamente com os corredores laterais seguindo o estilo barroco tardio. Após essas duas últimas alterações, a igreja manteve seu estilo arquitetônico, sendo que as intervenções realizadas posteriormente buscaram manter a sua tipologia (INSTITUTO NACIONAL DE PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO DE MINAS GERAIS, 2011; ANDRADE, 2014).

Após diversas intervenções, na década de 1960, a igreja foi praticamente reconstruída. Nesta ocasião as paredes externas foram substituídas por alvenaria de tijolos cerâmicos, cimento e concreto. Os pisos de tábua corrida e de campas foram substituídos por ladrilhos hidráulicos em toda a extensão interna. Uma laje substituiu o forro de madeira original. A sacristia foi ampliada, assim como toda a parte posterior do edifício, e recebeu anexos (INSTITUTO NACIONAL DE PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO DE MINAS GERAIS, 2011).

Depois desse período, poucas ações de manutenção foram executadas, culminando em um elevado grau de deterioração da igreja, apresentando

graves problemas estruturais na parte frontal, nas naves laterais, nas torres e no telhado. Para combater tais danos, os moradores da região arrecadaram recursos para realizar uma nova reforma em 1976. Naquela ocasião, o restante das paredes em adobe foram substituídas por tijolos cerâmicos e concreto, de tal maneira que não há nenhum resquício da alvenaria original. O madeiramento da cobertura foi substituído por lajes e vigas de concreto e as telhas cerâmicas, chumbadas. A sacristia e a parte posterior da estrutura foram novamente ampliadas (INSTITUTO NACIONAL DE PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO DE MINAS GERAIS, 2011).

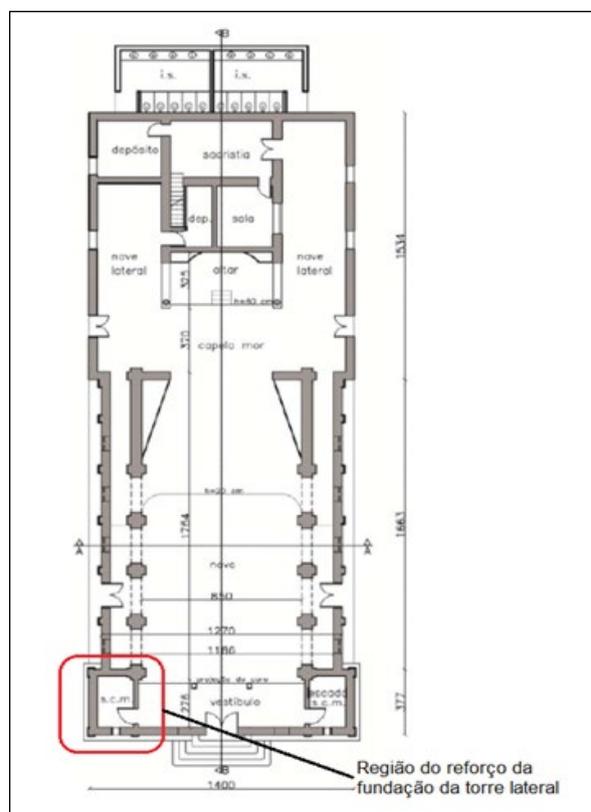
Em 1988, alguns procedimentos de manutenção da edificação foram realizados, dessa vez com o foco nos elementos artísticos. Durante a intervenção ocorrida em 2003, os ladrilhos hidráulicos foram cobertos por um piso cerâmico, exceto no altar-mor, mantendo essa característica até hoje; e foi realizada uma nova pintura nas paredes internas e externas. Nessa época, a estrutura frontal da igreja, incluindo as torres, apresentava grandes fissuras no encontro das alvenarias das fachadas laterais com as torres, foi quando foram colocadas as escoras sob o coro para aliviar as tensões na parede frontal e nas torres. Não foi realizada nenhuma intervenção que solucionasse esse dano devido à falta de recursos técnicos e financeiros (INSTITUTO NACIONAL DE PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO DE MINAS GERAIS, 2011).

Desde então, nenhuma outra grande intervenção significativa foi realizada, apenas pequenos reparos para manutenção, como pinturas internas e externas em 2007. Em 2019, a igreja entrou em processo de restauração no qual, incluiu o reforço da fundação da torre esquerda, ver destaque na Figura 2. A Figura 3 apresenta a cronologia desde a construção da capela, que deu origem à matriz, seguida das principais intervenções ocorridas nesta igreja.

Nos séculos XVI e XVII o atual distrito de Piedade do Paraopeba, surgiu como um ponto de apoio para os bandeirantes, homens que exploravam o interior do Brasil em busca de escravos, indígenas, pedras e metais preciosos. Esse pequeno povoado começou a se desenvolver final do século XVII com as descobertas de ouro nas regiões próximas, que abrange as atuais cidades de Ouro Preto, Mariana e Sabará. Além de servir como centro de abastecimento às regiões de exploração, o povoado se tornou, também, passagem e local de hospedagem para os que vinham do sul

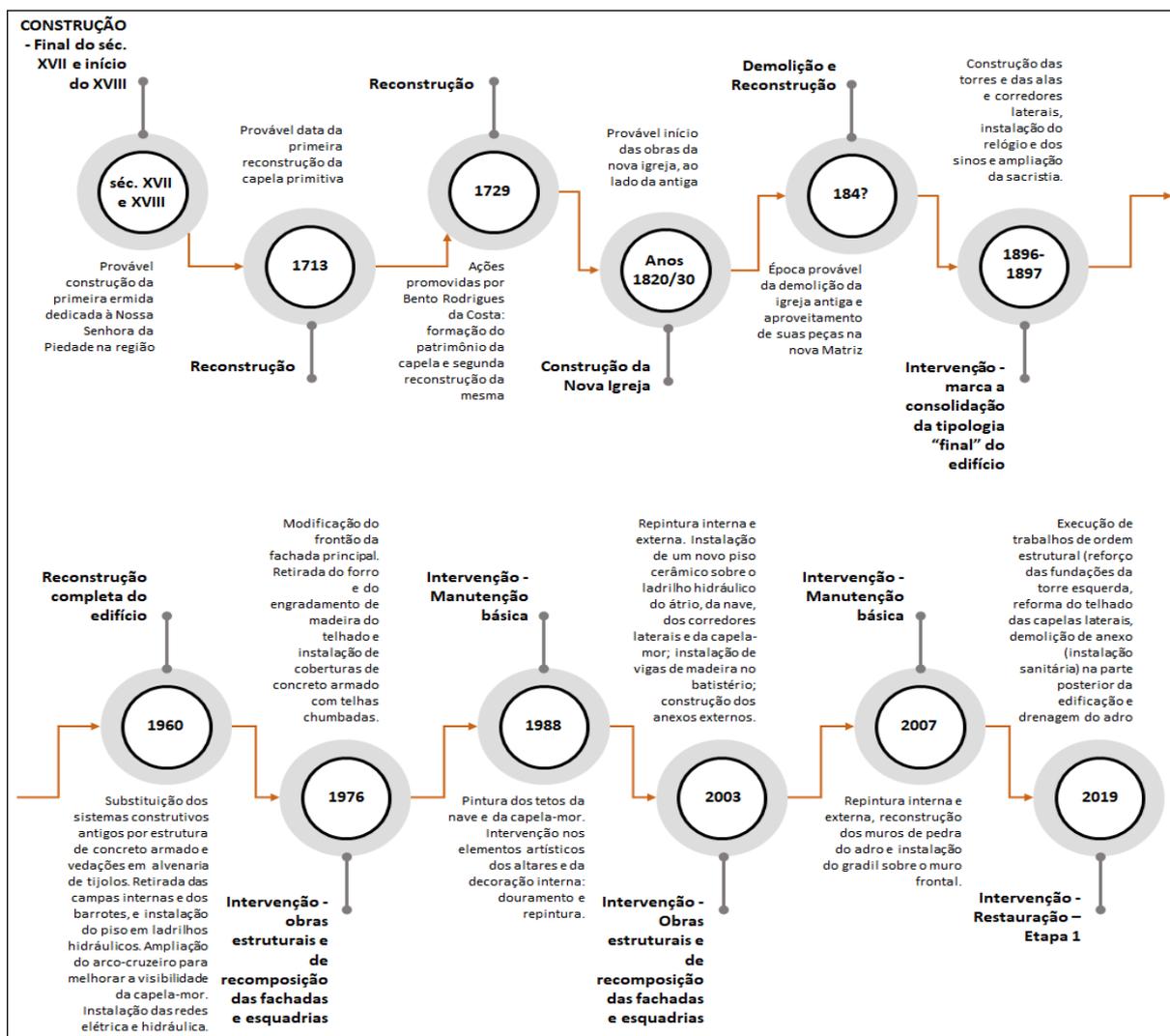
do estado, em direção às minas. A Igreja Matriz de Nossa Senhora da Piedade foi edificada quando já havia ocorrido o declínio da exploração do ouro na região e, a agricultura passou a ser a principal atividade local. O entorno da igreja foi tomado por residências e pequenos comércios que se mantêm até os dias atuais (INSTITUTO NACIONAL DE PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO DE MINAS GERAIS, 2011; ANDRADE, 2014). A igreja permanece como uma referência à identidade e religiosidade local, e sua importância religiosa, cultural e histórica foi atestada com o tombamento por meio do Decreto Municipal nº 024, de 22/03/2010 (MEMORIAL DA ARQUIDIOCESE DE BH, 2012). O processo de tombamento municipal, efetivado em 2010 pelo Conselho de Patrimônio de Brumadinho delimita o perímetro de tombamento da igreja que inclui toda a construção, bem como os jardins laterais, pois, assim, pode-se garantir, além da integridade física do bem tombado, a manutenção do ambiente que o compõe (INSTITUTO NACIONAL DE PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO DE MINAS GERAIS, 2011).

Figura 2 – Planta da Igreja Matriz, nível Nave.



Fonte: Adaptado de Instituto Nacional de Preservação do Patrimônio Histórico e Artístico de Minas Gerais, (2011).

Figura 3 – Cronologia de intervenções e ações de manutenção ocorridas na Igreja Matriz de Nossa Senhora da Piedade.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O processo de restauração iniciado em 2019 foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa, as seguintes atividades foram incluídas: reforço da fundação da torre esquerda, reforma do telhado das capelas laterais, demolição de anexo (instalação sanitária) na parte posterior da edificação e drenagem do adro, de acordo com a cronologia apresentada na Figura 3. Na segunda etapa, as atividades de restauração dos elementos de vãos e vedações, alvenarias e instalações serão contempladas.

Este artigo, especificamente, tem como objetivo relatar o processo do reforço da fundação da torre esquerda, ou seja, a determinação do problema, o diagnóstico e a solução adotada, não sendo aqui abordado as demais etapas e atividades de restauração

da igreja. Assim, a metodologia estabelecida para o desenvolvimento da investigação foi: (1) levantamentos das manifestações patológicas presentes por meio de inspeção visual e ensaios não destrutivos; (2) exame o projeto estrutural desenvolvido para o reforço da fundação da igreja com estacas raiz e; (3) acompanhamento algumas etapas da execução do reforço da fundação.

## 2 Referencial Teórico

Os patrimônios históricos construídos são importantes expressões que identificam uma comunidade. São conexões tangíveis com o passado, pois, transmitem informação histórica e cultural para

as gerações futuras (ZHANG; DONG, 2019). Outro aspecto importante relacionado à conservação do patrimônio histórico construído diz respeito à sustentabilidade (HAVINGA; COLENBRANDER; SCHELLEN, 2019). Ambos estão intimamente conectados, uma vez que, tanto um quanto o outro, visam reutilizar e não desperdiçar um recurso não renovável, não substituível e não permutável como o patrimônio cultural (EUROPEAN UNION COUNCIL, 2014; LUCIANI; DEL CURTO, 2018).

Contudo, os danos causados nos bens históricos patrimoniais, sejam por aspectos relacionados às questões de agressividade ambiental, propriedades físicas e químicas, o mau uso, envelhecimento da estrutura ou falhas no processo executivo, levam à necessidade da adoção de medidas preventivas ou restauradoras, que devem respeitar a integridade histórica, estética, material e de estabilidade desses patrimônios. Neste sentido, é fundamental conhecer as questões históricas, bem como as características da estrutura, intervenções e ações já realizadas nessas edificações, como forma de estabelecer e determinar práticas adequadas que possam garantir-lhes a conservação.

Um processo de intervenção em uma edificação pode adquirir níveis que vão do mais simples ao extremamente complexo. As intervenções mais simples englobam ações cotidianas de manutenção tais como, pintura, limpeza, entre outros. O reforço de uma estrutura pode requerer uma intervenção extremamente complexa dependendo do grau ou da evolução do dano apresentado. Apesar da complexidade executiva e do alto custo das ações, o reforço estrutural é comumente realizado nos processos de reabilitação de edificações modernas e antigas. A necessidade de reforçar uma estrutura pode surgir a qualquer momento, desde a fase de construção, durante a qual podem ser detectados erros no projeto ou nos processos de execução, estendendo-se por toda sua vida útil. E, os motivos pelos quais uma estrutura deve ser reforçada são diversos como, por exemplo, deterioração da estrutura, ocorrência de desastres naturais, alterações na funcionalidade da estrutura, desenvolvimento de requisitos de normas mais exigentes e danos à estrutura por acidente, como colisões, incêndios, explosões, entre outros (BEDNARZ *et al.*, 2014; LAVÍN *et al.*, 2018; MAYORGA *et al.*, 2019; PAPAPOPOULOS e IOANNIS, 2019; SONDA *et al.*, 2019).

## 2.1 Fundações em estruturas antigas

Segundo Nápolis Neto e Vargas (1998), os povos mais antigos foram tomando consciência das dificuldades de se executar fundações, principalmente, em terrenos mais frágeis, por meio das experimentações. Os terrenos onde se edificavam as construções maiores e mais pesadas cediam e as construções ruíam ou eram demolidas e os escombros eram aproveitados como fundações de novas edificações. Posteriormente, passaram a utilizar as pedras ou tijolos como materiais para as fundações (NÁPOLIS NETO; VARGAS, 1998; APPLETON, 2011; GHIASI *et al.*, 2013).

Normalmente, as fundações de edifícios antigos são do tipo sapatas isoladas para as colunas ou sapatas contínuas para as paredes, construídas com pedras ou tijolos. Com o tempo, os tijolos foram melhorados com relação à resistência à tração e à retração, por meio da adição de palha à sua massa, tijolo esse denominado adobe. Intercalando-se os tijolos com caniços, se percebeu que o conjunto passava a funcionar melhor, principalmente nos recalques. Mais tarde, os tijolos evoluíram e passaram a ser cozidos em fornos (NÁPOLIS NETO; VARGAS, 1998).

No auge da arquitetura grega e logo em seguida da romana, se destacam os pórticos e colunas dos palácios e templos travejados com vigas de pedra. Esses novos elementos e sistemas estruturais propiciavam a concentração de cargas nas fundações assim, onde essas passaram a ser executadas com blocos superpostos. As partes superiores que ficavam aparentes eram constituídas de duas ou três camadas de blocos alongados de pedras aparelhadas em ângulos retos e justapostos. A parte enterrada era construída com pedras menos aparelhadas e misturadas. As camadas expostas, denominadas ortostatos, tinham como função proporcionar uma distribuição melhor das cargas nas fundações (NÁPOLIS NETO; VARGAS, 1998).

Em fundações menores, as sapatas isoladas, também conhecidas, como almofadas de pedra eram comuns (APPLETON, 2011; GHIASI *et al.*, 2013). Em locais onde o solo era frágil as escavações recebiam uma camada de terra misturada com cinzas de carvão ou com o próprio carvão, de terra apiloadada, ou uma mistura de calcário mole com pedregulho. As fundações que cobriam toda a área de construção eram muito raras. Quando eram empregadas, eram executadas com camadas sucessivas de blocos ou pedras sobre uma camada de fundo constituída de

pedra e argila misturadas. As estacas de madeira cravadas por máquinas que, segundo Nápolis Neto e Vargas (1998), podem ter sido derivadas das máquinas de guerra, também foram utilizadas em algumas situações como elementos de fundações.

## 2.2 Reforço de fundações antigas

Tanto para estruturas modernas quanto para antigas, os danos nas fundações são considerados fatores críticos e um dos problemas estruturais mais difíceis de serem tratados durante a restauração (PAPADOPOULOS; VAYAS, 2019). A alteração das propriedades mecânicas do solo que sustenta a fundação de uma estrutura, produzindo tensões adicionais que podem causar deformações muito diferente daquelas que prevaleceram por muitos anos, geralmente, é a principal causa dos recalques diferenciais. Segundo Lavín, Sánchez e Serna (2018), as principais causas das alterações nas propriedades mecânicas do solo são: (1) vazamentos nas tubulações de água que provocam a alteração do teor de umidade do solo; (2) flutuações no lençol freático na área; (3) atividade biológica como o crescimento e o apodrecimento de raízes; e (3) degradação física e química de materiais de fundação enterrados.

Para essa situação, a melhoria das condições do solo é o primeiro passo para começar a reparar os danos. O próximo passo seria o reforço da fundação propriamente dita. Para isso, existem diversas técnicas disponíveis para a reabilitação de fundações, algumas de baixa perturbação, menos destrutível, como, por exemplo, a que consiste em injeção graute. A seleção da técnica de reforço depende de muitos fatores, incluindo o tipo de fundação a ser reforçada, a capacidade de manutenção, a resistência, a durabilidade e, de outros fatores não técnicos, como a viabilidade construtiva e econômica.

Mayorga *et al.* (2019) descrevem a técnica adotada para o reforço de alguns elementos estruturais da igreja de Santiago em Jerez de la Frontera na Espanha. A técnica consistiu, principalmente, na injeção longitudinal de graute nas colunas e nos contrafortes. Apesar do diagnóstico não ter revelado problemas relacionados às fundações de pedra da igreja, nessa restauração também foi realizada a consolidação por injeção de graute nas bases das colunas e contrafortes com o objetivo de melhorar as propriedades da fundação para: (i) suportar as novas cargas que receberiam com a adição do graute; e (ii) consolidá-lo a fim de minimizar o efeito deletério da umidade. Segundo os autores, os

resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que o objetivo era a homogeneização da rigidez das colunas. A eficácia do reforço foi avaliada comparando-se o Módulo de Young das colunas antes, durante e depois da reabilitação dos elementos estruturais.

Para o reforço da fundação do templo de Apollo Epikourios foi utilizada a argila estabilizada como o material principal da intervenção (PAPADOPOULOS; VAYAS, 2019). Nesse monumento, a falha da fundação ocorreu devida à gradual erosão da camada de argila que foi colocada pelos antigos construtores entre a fundação e as bases delas. Nesse caso, o material de argila foi removido (após a desmontagem da estrutura) e mais tarde foi reposicionado quando estabilizado com cal e cimento. Essa técnica utilizada para a restauração da fundação do monumento em questão, foi baseada na consideração que a estabilização aumenta, suficientemente, a resistência da argila, garantindo durabilidade contra as ações climáticas e a transferência segura de carga. Além disso, a argila estabilizada é um material semelhante ao colocado pelos antigos construtores; portanto, seu uso constitui uma intervenção mínima. Ela também não desenvolve muita aderência à rocha, portanto, sua implementação é considerada quase inteiramente reversível.

Ghiasi *et al.* (2013) apresentaram várias tecnologias utilizadas para o reforço de fundações em paredes de alvenaria não reforçada. Os autores citam as possibilidades de reforço para alvenarias internas e externas, ou seja, periféricas e, para construção de novas fundações sob fundações existentes. Para essa última alternativa, Ghiasi *et al.* (2013) indicam como alternativas as sapatas corridas e as estacas. Para a estabilização de solos sob as fundações, eles sugerem o procedimento de injeção de graute, enquanto Lavín, Sánchez e Serna (2018) sugerem a injeção de resinas.

## 3 Inspeção visual na igreja matriz

Durante todo o seu período de existência a Igreja Matriz de Nossa Senhora da Piedade foi submetida a vários processos de intervenção, incluindo em algumas modificações de ordem estrutural, tais como, substituição do telhado de madeira por uma cobertura de concreto armado com telhas chumbadas (1976) e instalação de vigas de madeira no batistério (2003). As vigas de madeira instaladas no batistério tinham como função receber o carregamento do coro para aliviar as paredes externas e da torre. Esperava-se que esse procedimento evitasse o agravamento dos problemas estruturais. Contudo, os danos estruturais não foram

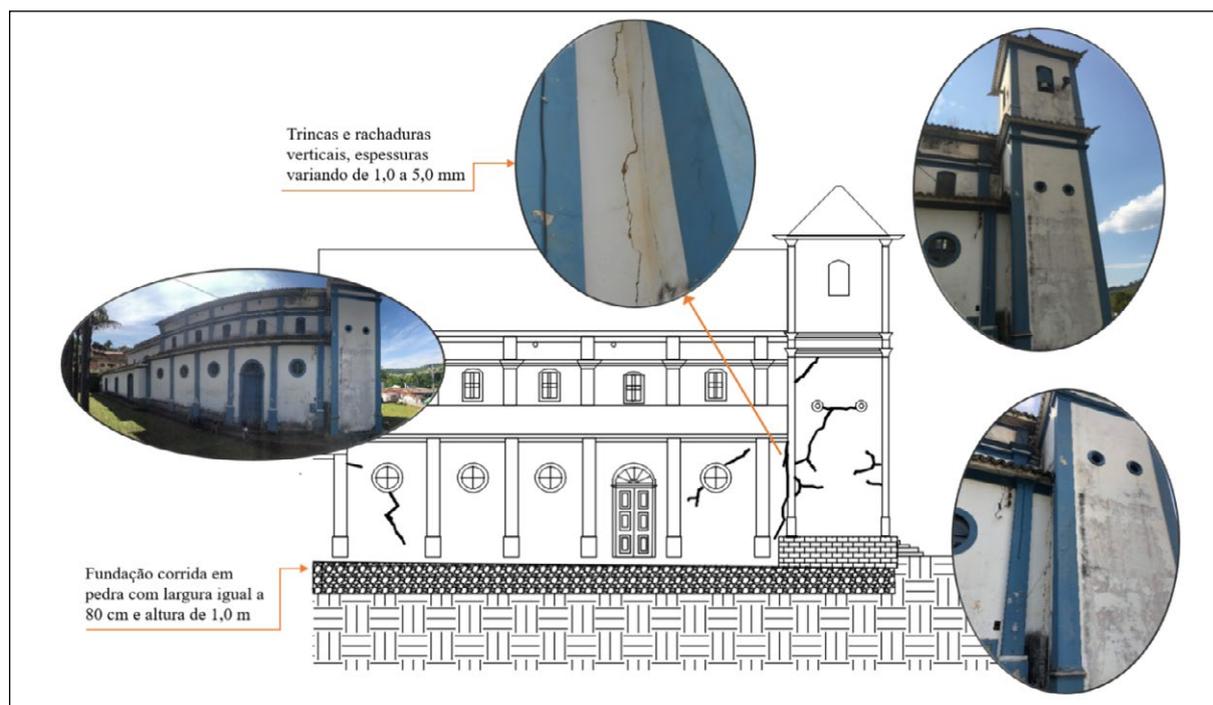
sanados e estes continuaram em progressão. Com o agravamento dos danos estruturais, houve a necessidade de escoramento do coro aliviar as tensões na parede frontal e nas torres. Não foi realizada nenhuma intervenção que solucionasse esse dano devida à falta de recursos técnicos e financeiros (INSTITUTO NACIONAL DE PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO DE MINAS GERAIS, 2011).

Durante a inspeção visual da igreja foram desenvolvidas as seguintes atividades: (1) levantamento fotográfico com registro de todos os danos identificados não só nas alvenarias mas em todos os elementos relacionados a cobertura, revestimento, estrutura, alvenaria, vãos e vedações, pisos, forros,

elementos integrados internos, o agenciamento externo, instalações e sistema de segurança da igreja; (2) utilização de fissurômetros para catalogação das fissuras existentes nos elementos estruturais; (3) verificação do prumo das alvenarias laterais e frontal.

Nas alvenarias das fachadas lateral esquerda e frontal, elementos investigados para o problema em questão aqui neste artigo, diversas manifestações patológicas foram identificadas: sujidades, manchas, destacamento do revestimento, presença de umidade e mofo, crescimento de vegetação, deterioração da madeira dos vãos (portas e janelas) apresentando descascamento da pintura, fissuras e trincas. Algumas destas manifestações podem ser identificadas na Figura 4.

**Figura 4** – Manifestações patológicas apresentadas na fachada lateral esquerda e torre esquerda da Igreja Matriz de Nossa Senhora da Piedade.



Fonte: Elaborado pelos autores.

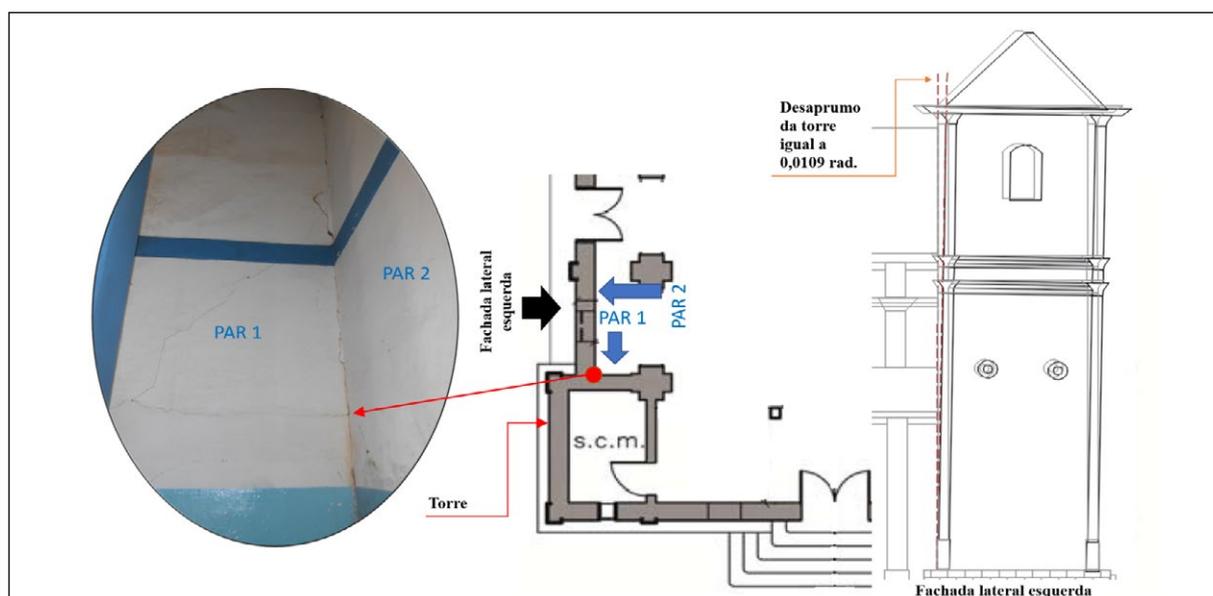
Além das manifestações patológicas identificadas, as alvenarias da fachada lateral esquerda e da torre esquerda exibem danos significativos causados pelo recalque diferencial da fundação da torre esquerda. As movimentações do solo e assentamentos da fundação são reconhecidas como um problema, pois levam a danos na estrutura, que podem ser reconhecidos ao se observar o padrão de fissuras (GIANGREGORIO *et al.*, 2019). Nesse caso, o recalque diferencial causou a abertura de trincas e rachaduras na amarração

entre as alvenarias da fachada lateral esquerda e torre esquerda, como ilustra o detalhe na Figura 4. E, também, a abertura de trincas e fissuras nas alvenarias internas dos mesmos elementos estruturais, como destacado na Figura 5, alvenaria interna da lateral esquerda (PAR 2) e alvenaria interna da torre esquerda (PAR 1). Em consequência desses danos, a torre esquerda inclinou-se e hoje encontra-se com um desaprumo de aproximadamente 0,0109 rad (Figura 5).

As fissuras, trincas e rachaduras na amarração entre as alvenarias da lateral esquerda e torre apresentam os danos mais importantes presentes na igreja. Com o auxílio de fissurômetros, as fissuras, trincas e rachaduras foram mensuradas. Na fachada as trincas e rachaduras possuíam uma configuração vertical com espessura variando de 1,0 a 5,0 mm

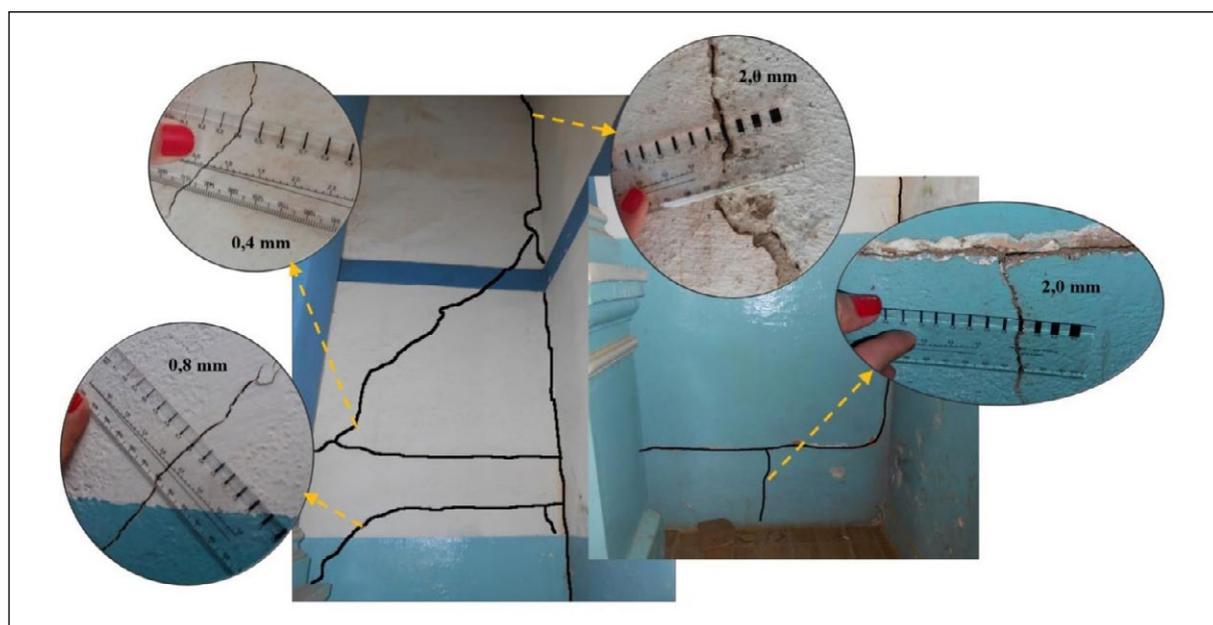
(Figura 4) Internamente, conforme destacado na Figura 6, fissuras, trincas e rachaduras foram identificadas com espessuras variando de 0,4 mm a 2,0 mm. As fissuras se apresentam inclinadas, mas as trincas e rachaduras se evidenciam na posição vertical, ilustradas na Figura 6.

**Figura 5** – Identificação das alvenarias internas da lateral esquerda e da torre, detalhe para a inclinação da torre esquerda.



Fonte: Elaborado pelos autores.

**Figura 6** – Destaque para algumas das fissuras, trincas e rachaduras no encontro das alvenarias da lateral esquerda e torre.



Fonte: Elaborado pelos autores.

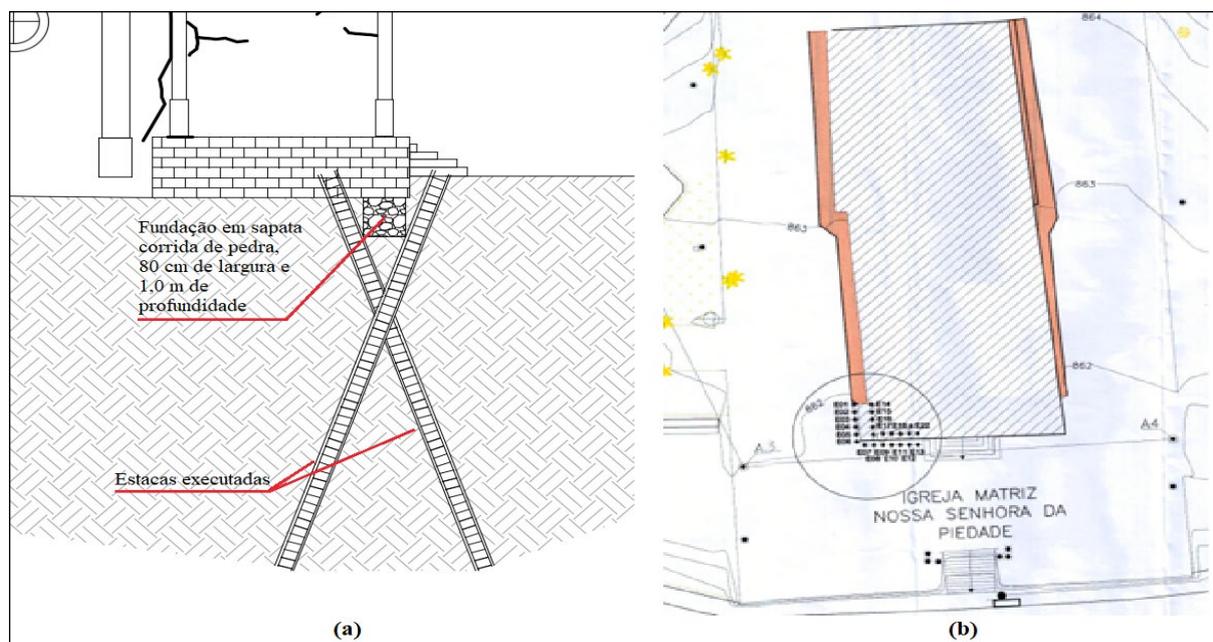
#### 4 Reforço da fundação da torre lateral esquerda

Em se tratando do reforço de fundação, esse é necessário em situações de alteração das condições do terreno com o surgimento de problemas geotécnicos relacionados a fatores diversos como: (i) modificações das propriedades físicas e mecânicas do solo; (ii) abaixamento do nível freático; (iii) descompressão do solo; (iv) insuficiência ou cálculo mal executado da fundação; e (v) aumento da carga atuante na estrutura (NÁPOLIS NETO; VARGAS, 1998; APPLETON, 2011; GHIASI *et al.*, 2013).

Como já destacado anteriormente, há diversas tecnologias que podem ser aplicadas para o reforço de fundações. Algumas garantem intervenções mínimas

como, por exemplo, a injeção de graute nos elementos de fundação a serem reforçados. E outras exigem um procedimento de intervenção mais complexos, como a execução de novos elementos de fundação sob os existentes. No caso específico da Igreja Matriz de Nossa Senhora da Piedade, esse foi o procedimento adotado. Uma nova fundação foi executada, composta de estacas raiz, sob a fundação existente da torre lateral esquerda. A fundação existente na igreja aqui investigada é do tipo sapata corrida de pedra, cuja seção transversal é retangular com dimensões de 0,80 centímetros de largura e 1,0 metro de altura, ilustradas na Figura 7a. Na Figura 7b é apresentado um esboço da localização das estacas externas e internas a serem executadas.

**Figura 7** – Estacas para reforço da fundação: (a) esboço das estacas, e (b) localização das estacas externas e internas da torre esquerda.



Fonte: Elaborado pelos autores.

As estacas são elementos de fundações profundas que possuem seções transversais pequenas e comprimento longo. Existem diversos tipos de estacas, dentre eles as estacas de concreto que podem ser de concreto armado ou protendido, moldadas *in loco*, ou pré-moldadas. Dentre as os tipos de estacas escavadas e injetadas existem as estacas raiz e as microestacas. Segundo Alonso (1998), as primeiras são aquelas em que injeções de ar comprimido são aplicadas imediatamente após a moldagem usando-

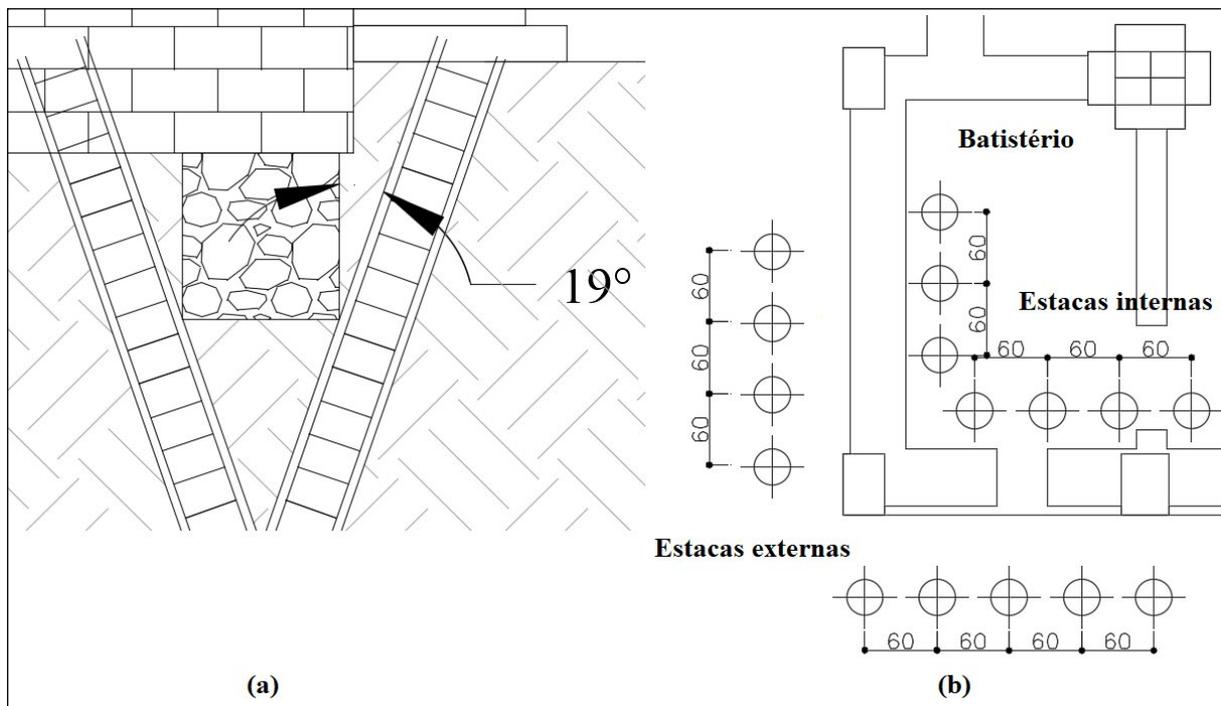
se baixas pressões. Nas microestacas é adotada a tecnologia de tirantes injetados em múltiplos estágios e, ao contrário das estacas raiz, são aplicadas altas pressões na injeção (ALONSO, 1998). Ainda de acordo com Alonso (1998), estaca raiz é um tipo de estaca moldada *in loco*, executada por meio de perfuração rotativa com o auxílio de circulação de água injetada no interior dos tubos. A execução de estaca raiz envolve basicamente quatro etapas: (i) perfuração auxiliada por circulação de água; (ii) instalação da armadura;

(iii) preenchimento com o concreto; e (iv) remoção do revestimento e aplicação de golpes de ar comprimido.

A escolha do tipo de estaca a ser empregado para uma determinada situação depende de fatores como a viabilidade de execução e custo. Dois aspectos importantes foram levados em consideração para a escolha do tipo de estaca a ser executada para o reforço em questão. O primeiro foi a ausência de vibração e o segundo foi a possibilidade de execução

em áreas com espaço limitado. Foram executadas 16 estacas para o reforço da torre lateral esquerda, sendo nove estacas externas e sete internas (Figura 8b). O comprimento das estacas determinado em projeto foi de 10 metros, com um ângulo de inclinação de 19° (Figura 8a). Elas foram executadas com uma distância de 60 centímetros entre si (Figura 8b). No projeto do reforço desta fundação havia uma previsão de resistência de 35 MPa para cada estaca.

**Figura 8** – Disposição das estacas: (a) ângulo de inclinação das estacas, e (b) localização das estacas externas e internas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 9 apresenta alguns registros do processo executivo das estacas. Na foto da Figura 9a se observa a perfuração auxiliada por circulação de água e há também um detalhe da cabeça da estaca exibindo a armadura, nesse caso, quatro barras de 25 mm de diâmetro. Após a perfuração, a armadura foi instalada conforme a foto da Figura 9b. Em seguida, o concreto foi bombeado para o interior do furo, como ilustrado na foto da Figura 9c.

Os equipamentos utilizados possibilitaram a execução das estacas no interior da igreja, uma vez que foi possível instalá-los dentro do batistério que se localiza no interior da torre esquerda. Outro aspecto importante é a baixa vibração gerada por esses equipamentos, o que é muito conveniente para o caso

dessa Igreja, que é tombada pelo patrimônio histórico. A Figura 10a ilustra o equipamento no interior da igreja e a Figura 10b, as estacas externas após a finalização da execução das estacas no exterior da igreja. O tempo de execução de cada estaca foi de um dia.

Após a limpeza das fissuras, trincas e rachaduras, essas foram devidamente preenchidas. As fissuras foram preenchidas com argamassa e as trincas e rachaduras foram preenchidas com um selante flexível à base de poliuretano (mastique PU 40). O mastique do tipo PU 40 é um tipo selante com alto poder de aderência ao concreto e alvenaria, não causa manchas, é impermeável e resistente às intempéries. Portanto, apesar de ser mais comumente utilizado em juntas de dilatação, é adequado ao propósito aqui discutido, a

vedação das trincas e rachaduras. Na Figura 11 há um registro da abertura entre a alvenaria interna da torre esquerda (PAR 1 na Figura 5) e a alvenaria interna da lateral esquerda da igreja (PAR 2 na Figura 5), antes e após o preenchimento com o selante.

## 5 Considerações finais

Como mencionado anteriormente, o recalque de fundação pode ocorrer por diversas causas. No caso específico relatado neste artigo, a possibilidade cogitada foi a saturação do solo nos períodos de chuva, pois não havia um sistema de drenagem adequado

ao redor da igreja, o que propiciava o acúmulo de água próximo às alvenarias. Outra condição para ocorrer esse recalque é a consolidação distinta do aterro, de forma que as camadas mais altas deste recalcam mais que no nível inferior. Uma sondagem foi realizada para o simples reconhecimento do solo com SPT em seis furos localizados ao redor da igreja. No relatório disponibilizado, há identificação de aterro pouco compacto até uma profundidade de aproximadamente 1,5 metro para um dos furos próximos à torre esquerda. Em três outros furos foram identificadas camadas de aterro a profundidades de 1,0 a 2,0 metros.

**Figura 9** – Execução das estacas: (a) perfuratriz e detalhe da cabeça da estaca; (b) instalação da armadura, e (c) concretagem do furo.



Fonte: Acervo dos autores.

**Figura 10** – (a) perfuratriz posicionada no interior da igreja e (b) estacas após a execução no exterior da igreja.



Fonte: Acervo dos autores.

**Figura 11** – Rachadura localizada entre as alvenarias da lateral esquerda e da torre:  
(a) antes do preenchimento (b) após o preenchimento com selante flexível.



Fonte: Acervo dos autores.

Segundo Papadopoulos e Vayas (2019), as falhas em fundações são sempre os problemas estruturais mais difíceis de se lidar. Em estruturas antigas, esses problemas podem ser ainda mais complexos e as soluções podem ser limitadas. Para a Igreja Matriz de Nossa Senhora de Piedade ficou decidido que a solução adotada deveria estabilizar a estrutura impedindo a evolução dos danos, mas a torre não seria reposicionada em seu prumo original, isto é, ela permaneceria inclinada. Assim, a estaca raiz pareceu atender aos requisitos necessários, pois ao se cruzarem, as estacas internas e externas, servirão de apoio para a fundação antiga.

Outras duas limitações importantes e que influenciaram na escolha da solução adotada foram: (i) o espaço interno limitado, pois as estacas internas deveriam ser executadas dentro da torre esquerda; e (ii) a necessidade de se evitar as vibrações geradas durante a execução de determinados tipos de fundação. Com a utilização de equipamentos de pequeno e médio porte, essas estacas podem ser executadas em locais de difícil acesso e inclusive em diferentes angulações. Em ambos os casos a opção de estaca raiz se mostrou bastante adequada possibilitando a execução do reforço com o mínimo de intervenção possível no interior da igreja.

A partir desta investigação, se verificou que não houve cuidado necessário com a preservação dos elementos originais, causando uma perda quase total das características originais da igreja. Ainda sobre a preservação da estrutura, a falta de cuidado e de manutenção ao longo dos anos propiciou o surgimento de intensa progressão das manifestações patológicas identificadas. Além da falta de manutenção, constatou-se que o recalque diferencial causou um dano severo à estrutura por ter sido negligenciado durante um grande período. Em 2003, a necessidade de atenção

com a estrutura da igreja foi identificada quando foram instaladas algumas vigas no batistério com o objetivo de aliviar as tensões nas paredes. Contudo, somente em 2019 os procedimentos de reforço se iniciaram.

A aplicação dessa técnica tornou possível o reforço da fundação evitando o colapso de uma edificação pertencente ao patrimônio do estado de Minas Gerais. A situação dessa igreja era bastante complexa não apenas pelo perigo iminente de colapso, mas também por causa dos danos extensos que afetaram alguns elementos estruturais. Em função do orçamento disponível para a reabilitação e das limitações existentes, as soluções adotadas foram consideradas bastante adequadas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem imensamente o apoio da PUC Minas, da Escola de Arquitetura da UFMG, ao Memorial da Arquidiocese e à prefeitura de Brumadinho que permitiram as visitas antes, durante e após a execução do reforço da fundação da Igreja Matriz Nossa Senhora da Piedade.

## REFERÊNCIAS

ALONSO, U. R. Execução de fundações profundas. In: HACHICH, W. *et al.* (org.). **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. cap. 9.

ANDRADE, B. A. B. **Igreja Matriz de Nossa Senhora da Piedade Distrito de Piedade do Paraopeba Brumadinho/MG: subsídios históricos para o projeto de restauração**. Ouro Preto (Brasil), 2014.

APPLETON, J. **Reabilitação de edifícios antigos: patologias e tecnologias de intervenção**. 2. ed., Lisboa (Portugal): Orion, 2011.

BERDNARZ, L. J. *et al.* Strengthening and long-term monitoring of the structure of an historical church presbytery. **Engineering Structures**, v. 81, p. 62-75, 2014.

EUROPEAN UNION COUNCIL. Council conclusions of 21 May 2014 on cultural heritage as a strategic resource for a sustainable Europe. **Official Journal of the European Union**, 2014.

GHIASI, V. *et al.* Methods of retrofitting the foundation of unreinforced masonry buildings. **The Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 18, n. Y, p. 5747-5758, 2013.

GIANGREGORIO, M. C. *et al.* Integrated approach combining direct survey and observation in damage analysis in case of soil settlement. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLII-2/W11, 2019. 2nd International Conference of Geomatics and Restoration, 2019, Milan (Italy).

HAVINGA, L.; COLENBRANDER, B.; SCHELLEN, H. Heritage significance and the identification of attributes to preserve in a sustainable refurbishment. **Journal of Cultural Heritage**, 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO DE MINAS GERAIS. IEPHA. **Dossiê de tombamento da paróquia Nossa Senhora da Piedade**. Belo Horizonte (Brasil), 2011.

LAVÍN, J. R. S.; SÁNCHEZ, F. E.; SERNA, A. M. Chemical injections realized with null pressure for underpinning the foundation of an 18th Century building located in the historical city of Cuenca (Spain). **Applied Sciences**, v. 8, n. 7, 2018.

LUCIANI, A.; DEL CURTO, D. Towards a resilient perspective in building conservation. **Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development**, v. 8 n. 3, p. 309-320, 2018.

MAYORGA, E. R. *et al.* The repair of the structure of Santiago's Church (Jerez de la Frontera, Spain) using grout-injection. **International Journal of Architectural Heritage**, v. 13, n. 8, p. 1234-1251, 2019.

MEMORIAL DA ARQUIDIOCESE DE BELO HORIZONTE. **Inventário do Patrimônio Cultural da Arquidiocese de Belo Horizonte: Igreja Matriz de Nossa Senhora da Piedade – Piedade do Paraopeba – Brumadinho (MG)**. Coord. Mônica Eustáquio Fonseca. Belo

Horizonte (Brasil): Memorial da Arquidiocese de Belo Horizonte, 2012. Vol. 1 (Inventário; 106).

NÁPOLIS NETO, A. D. F.; VARGAS, M. História das fundações. In: HACHICH, W. *et al.* (org.). **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. cap. 1

PAPADOPOULOS, K.; VAYAS, I. Restoration and strengthening techniques for Ancient-Greek monuments. **International Journal of Architectural Heritage**, v. 13, n. 1, p. 33-46, 2019.

SONDA, D. *et al.* The restoration and seismic strengthening of the earthquake-damaged UNESCO heritage palace in Kathmandu. **International Journal of Architectural Heritage**, v. 13, n. 1, p. 153-171, 2019.

ZHANG, Y.; DONG, W. Determining minimum intervention in the preservation of heritage buildings. **International Journal of Architectural Heritage**. 2019. p. 1-15.