

NGHIÊN CỨU VIỆC GIÁM SÁT SỨC KHỎE KẾT CẤU CÔNG TRÌNH DI SẢN QUA MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG DÂY TỪ THIẾT KẾ ĐẾN VẬN HÀNH

RESEARCH ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF HERITAGE BUILDINGS VIA WIRELESS SENSOR NETWORK FROM DESIGN TO OPERATION

Ths. Đặng Ngọc Tân - Khoa Xây dựng - Trường Đại học Xây dựng Miền Trung
Điện thoại: 0981425475 - Email: dangngoctan@muce.edu.vn

Tóm tắt: Trên thực tế, số lượng các ứng dụng hệ thống giám sát liên tục trong các công trình kỹ thuật dân dụng đã tăng trưởng đáng kể. Tuy nhiên, các ứng dụng này chủ yếu diễn ra ở những cấu trúc quy mô lớn, ví dụ như cầu, cầu cạn hoặc các giàn khoan ngoài khơi, và rất ít trường hợp giám sát các công trình di sản được ghi nhận trong các tài liệu khoa học. Xét thấy các thảm họa thiên nhiên tiềm ẩn rủi ro cao hơn đối với các công trình di sản - không chỉ từ thiên tai mà còn từ sự xuống cấp tự nhiên của vật liệu - công trình nghiên cứu này có mục tiêu chính là đóng góp vào việc ứng dụng hệ thống SHM cho các công trình di sản. Điều này được thực hiện thông qua việc mô tả các bước đầu tiên cần cân nhắc để tối ưu hóa hệ thống SHM, tiếp nối bằng mô tả quy trình xử lý dữ liệu của một hệ thống giám sát dài hạn. Để phục vụ mục tiêu đó, hai trường hợp thực tế đã được xem xét. Nghiên cứu này mang lại đóng góp quan trọng cho việc bảo tồn và phục hồi các công trình di sản, đồng thời thúc đẩy việc thu thập dữ liệu hư hỏng sớm, từ đó có thể sử dụng như một phương pháp để giảm thiểu rủi ro đổ vỡ và triển khai các kỹ thuật bảo trì cho các công trình di sản

Từ khóa: SHM, hệ thống giám sát, giám sát dài hạn.

1. Đặt vấn đề

Giám sát sức khỏe cấu trúc (SHM) là một phương pháp luận hiện đại dùng để đánh giá cấu trúc trong thời gian thực, thường được cấu thành từ ba hệ thống chính: hệ thống cảm biến, hệ thống truyền thông dữ liệu và hệ thống xử lý dữ liệu. Trên thực tế, SHM thường được ứng dụng phổ biến nhất trong các cấu trúc lớn như cầu đường, các tòa tháp) và các công trình ngoài khơi. Tuy nhiên, sự gia tăng số lượng các thảm họa thiên nhiên và những tiến bộ gần đây trong các hệ thống cảm biến ít xâm lấn hơn đã thúc đẩy việc ứng dụng SHM trên các cấu trúc hiện hữu nhằm tránh những tổn thất thảm khốc, như Mesquita và cộng sự (2016) đã chỉ ra.

Hội đồng Quốc tế về Nghiên cứu và Sáng tạo trong Xây dựng và Kiến trúc (CIB) trong ấn phẩm số 335 đã định nghĩa các công trình di sản (HC) là bất kỳ công trình kỹ thuật dân dụng hiện hữu nào mang giá trị văn hóa cao đối với cộng đồng xung

Abstract: In fact, the number of continuous monitoring system applications in civil engineering projects has grown significantly. However, these applications have primarily focused on large-scale structures, such as bridges, viaducts, or offshore platforms, and very few cases of heritage building monitoring have been recorded in scientific literature. Considering that natural disasters pose a higher risk to heritage structures- not only from catastrophes but also from the natural degradation of materials-the primary objective of this research is to contribute to the implementation of Structural Health Monitoring (SHM) systems for heritage buildings. This is achieved by outlining the initial steps required to optimize an SHM system, followed by a description of the data processing procedures for a long-term monitoring system. To serve this objective, two practical case studies were examined. This study provides an important contribution to the conservation and restoration of heritage structures, while promoting the early collection of damage data, which can be utilized as a method to mitigate the risk of collapse and implement maintenance techniques for heritage sites

Keywords: SHM, monitoring system, long-term monitoring.

quanh. Các trường hợp ứng dụng SHM trong công trình di sản đặc biệt thú vị dưới góc độ khoa học - kỹ thuật do tầm quan trọng của các loại cấu trúc này đối với cộng đồng. Về bản chất, đánh giá một công trình di sản là một nhiệm vụ khó khăn do cần phải phân loại giá trị văn hóa và thấu hiểu về các sự kiện quan trọng (tự nhiên hoặc con người) mà cấu trúc đó đã trải qua trong suốt vòng đời, đặc biệt là cách các biểu hiện của thời gian nên được bảo tồn và quá trình phục hồi nên diễn ra như thế nào. Theo cách này, SHM có thể là một công cụ hữu ích cho việc đánh giá cấu trúc của công trình di sản (HC), đặc biệt là đối với việc sử dụng các phương pháp không phá hủy để thu thập dữ liệu, cũng như khả năng kết hợp hệ thống xử lý dữ liệu với các phương pháp đánh giá an toàn trong thời gian thực. Thật vậy, bảo trì cấu trúc có thể là một cách quan trọng để giảm thiểu rủi ro cấu trúc, tuy nhiên việc đánh giá HC có thể là một hoạt động phức tạp, đặc

biệt là do sự thiếu hụt thông tin về đặc tính vật liệu (thành phần và hiệu suất khi làm việc) và lịch sử tải trọng, và cũng do thực tế là các phương pháp áp dụng cho trường hợp đánh giá đặc biệt này khác với những phương pháp dùng cho đánh giá cấu trúc trong các công trình hiện đại (CIB, 2010). Trên thực tế, HC trải qua một lịch sử dày đặc các thay đổi về tính chất vật liệu và hệ thống cấu trúc, và trong một số trường hợp, một số lượng lớn các can thiệp đã được thực hiện, do đó, việc áp dụng các tiêu chuẩn xây dựng hiện hành có thể không phù hợp. Trong trường hợp này, các quy trình đặc biệt có cân nhắc đến những thay đổi về đặc tính cấu trúc của HC nên được thiết kế và áp dụng để đánh giá chính xác (ICOMOS, 2003).

Mục tiêu của lịch sử biến đổi cấu trúc là cung cấp thông tin về vật liệu xây dựng, các thông số an toàn, tác động tự nhiên, sự can thiệp của con người, sự xuất hiện hư hỏng, bệnh lý công trình, các thông số cấu trúc và bất kỳ loại sửa đổi xây dựng nào, nhằm thực hiện các biện pháp phòng ngừa để duy trì an toàn cấu trúc. Ngoài ra, dữ liệu từ mô hình hóa số có thể được đưa vào các báo cáo này như một phương pháp để cải thiện độ chính xác của lịch sử biến đổi. Xét thấy sự cần thiết của thông tin có tổ chức liên quan đến việc kiểm tra HC và lịch sử biến đổi cấu trúc, gần đây một hướng dẫn bảo trì tập trung vào HC đã được trình bày bởi Tavares, Costa và Varum (2014). Trong công trình này, các tác giả đưa ra một danh sách kiểm tra (check-list) các hoạt động chính nên được thực hiện trong quá trình kiểm tra, được sắp xếp theo mục đích kiểm tra, phép đo, tính định kỳ của việc kiểm tra và những người chịu trách nhiệm cho mỗi hành động được liệt kê. Gần đây nhất, một báo cáo tập trung vào việc đánh giá và giám sát công trình di sản đã được trình bày bởi Mesquita và cộng sự (2015).

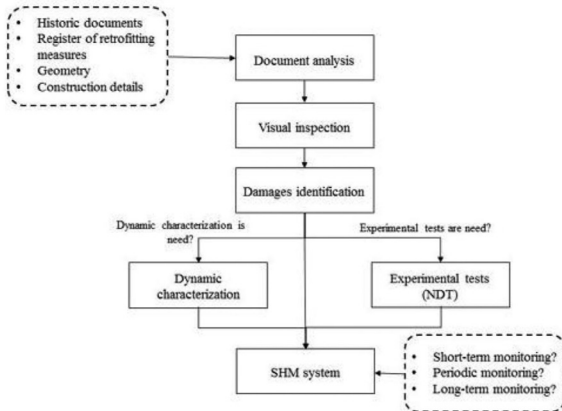
Hầu hết các kinh nghiệm giám sát HC được báo cáo trong tài liệu đều liên quan đến phân tích các thông số dao động (modal parameters), về bản chất là những thay đổi trong tần số tự nhiên [4]. Các đặc tính động học của một tòa tháp lịch sử đã được thực hiện và dữ liệu đã được sử dụng trong một mô phỏng máy tính. Hệ thống thu thập dữ liệu về cơ bản bao gồm các máy gia tốc được liên kết không dây với một trạm trung tâm xử lý tín hiệu. Trên thực tế, trong một thảm họa thực sự, các thay đổi về tần số tự nhiên cho thấy giá trị tương tự như những gì thu được từ mô phỏng máy tính. Một hệ thống báo động đã được triển khai, có thể cảnh báo chủ sở hữu về nguy cơ sụp đổ cấu trúc đang cận kề. Các công trình tương tự cũng được trình bày bởi Bencini và cộng sự (2010) và Balsamo và cộng sự (2013).

Một trường hợp quan trọng khác về giám sát công trình di sản đã được trình bày trong Lima và cộng sự (2008). Trong công trình này, một công trình được xây dựng vào thế kỷ XVI và XVII cũng được giám sát bằng phân tích tần số tự nhiên. Đối với quy trình đánh giá, ban đầu việc kiểm tra trực quan đã được thực hiện và các hư hỏng đã được xác định. Các tác giả đồng ý rằng việc kiểm tra sơ bộ là cần thiết để đánh giá ban đầu về rủi ro cấu trúc và để xác định hệ thống giám sát. Nhằm cung cấp thông tin về vị trí tốt nhất để lắp đặt cảm biến, một mô hình hóa số đã được thực hiện và các vùng có rủi ro cao đã được xác định. Về cơ bản, hệ thống giám sát đã đo đạc các chuyển vị (sự phát triển của vết nứt) và sự biến thiên nhiệt độ. Các cân nhắc về quy trình đánh giá HC được đề cập ở trên bởi CIB (2010) đã được cộng đồng kỹ thuật và học thuật tuân theo. Tuy nhiên, bên cạnh phân tích các thông số dao động trong đánh giá an toàn cấu trúc, đặc biệt là ở HC, sự thoái hóa vật liệu cũng nên được xem xét và liên kết với các phép đo (CIB, 2010) nhằm đưa ra các dự đoán về tuổi thọ và sự xuất hiện hư hỏng cục bộ, để áp dụng các biện pháp gia cố. Sohn và cộng sự (2004) đã chỉ ra rằng việc phân tích cấu trúc chỉ dựa trên sự thay đổi các thông số dao động không cho phép xác định đáng kể vùng bị ảnh hưởng bởi hư hỏng. Mặc dù vậy, vị trí lý tưởng để đặt cảm biến sẽ có hiệu quả tốt hơn nếu dựa trên một mô hình hóa sơ bộ, tập trung vào việc xác định các vùng dễ bị tổn thương.

2. Các quy trình đánh giá công trình di sản (HC) thông qua hệ thống SHM tối ưu

Cấu hình tối ưu của một hệ thống SHM tập trung vào đánh giá HC không chỉ phụ thuộc vào các thông số kỹ thuật của hệ thống thu thập dữ liệu. Trên thực tế, việc định vị chính xác hệ thống cảm biến tại các vị trí hư hỏng chính và kinh nghiệm của đội ngũ kỹ thuật có ảnh hưởng lớn hơn đến việc hệ thống giám sát có được tối ưu hóa hay không. Ngoài ra, trong trường hợp đánh giá HC, giá trị văn hóa cũng đặt ra thêm các vấn đề cần được giải quyết trong quá trình thiết kế hệ thống SHM, ví dụ như làm thế nào để cung cấp một hệ thống giám sát đầy đủ nhưng ít gây ảnh hưởng đến thị giác (xâm lấn thị giác) nhất có thể. Thật vậy, việc tối ưu hóa số lượng cảm biến cần được thực hiện nhằm cung cấp một hệ thống giám sát có chi phí thấp nhất có thể. Tuy nhiên, việc thiết kế một hệ thống giám sát tối ưu ngày càng ít phụ thuộc vào số lượng cảm biến, bởi vì kỹ thuật ghép kênh cảm biến (sensors multiplexing) đã góp phần làm giảm chi phí tiền tệ của hệ thống cảm biến, và thay vào đó, việc tối ưu liên quan nhiều hơn đến việc ghi lại các dữ liệu đã

được tối ưu hóa. Theo cách này, Hình 1 trình bày một sơ đồ với các quy trình tổng quát để tối ưu hóa hệ thống SHM



Hình 1: Sơ đồ quy trình tối ưu hóa hệ thống giám sát cho Công trình Di sản

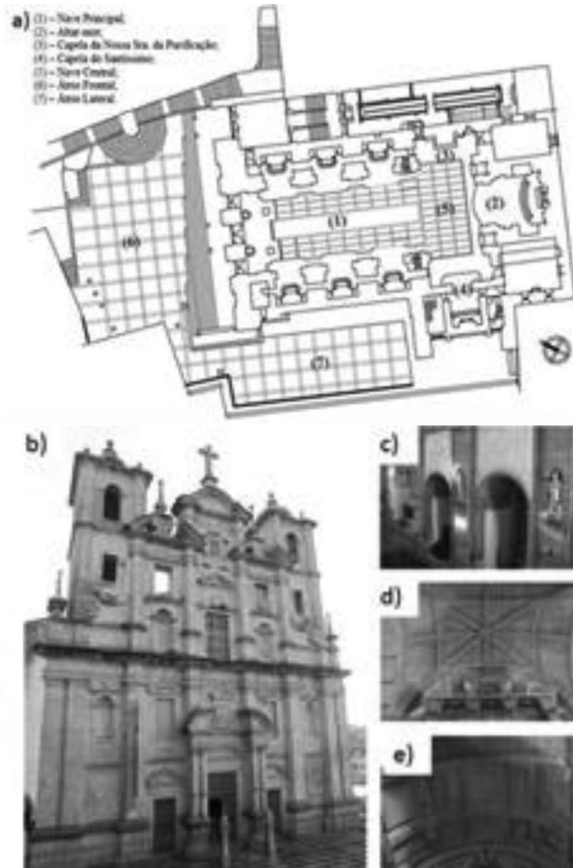
Tất cả các thông tin có sẵn, như hồ sơ lịch sử, chi tiết xây dựng và các biện pháp cải tạo đã thực hiện, cần được thu thập trước khi tiến hành kiểm tra trực quan nhằm cung cấp đầy đủ dữ liệu cho việc lập kế hoạch kiểm tra. Những thông tin ban đầu này cho phép đội ngũ kỹ thuật loại bỏ một số vấn đề và đưa ra các giả thuyết để đối chiếu sớm với các bằng chứng thu thập được trong quá trình kiểm tra trực quan. Mục tiêu chính của kiểm tra trực quan là xác nhận các thông tin thu thập được từ phân tích tài liệu, chẳng hạn như thông tin về hình học cấu trúc, đồng thời xác định các bằng chứng chính hoặc hư hỏng hiện diện trên công trình di sản (HC) được đánh giá. Tiếp theo, tùy thuộc vào các hư hỏng được tìm thấy và những điểm chưa chắc chắn trong ứng xử cấu trúc, việc đặc tính hóa động học và thử nghiệm thực nghiệm có thể là cần thiết. Bản chất của các thử nghiệm sẽ phụ thuộc vào loại hư hỏng hoặc bằng chứng tìm thấy trong quá trình kiểm tra trực quan và mục tiêu của việc đánh giá. Tuy nhiên, các thử nghiệm không phá hủy (NDT) là những ứng cử viên hàng đầu được thực hiện, vì các hướng dẫn chính về đánh giá công trình di sản quy định rằng việc đánh giá cần ít gây xâm lấn nhất có thể. Sau khi các thông tin cấu trúc đã được thu thập, đây là lúc để lựa chọn loại hình SHM sẽ được áp dụng, cụ thể là: giám sát ngắn hạn, giám sát định kỳ hoặc giám sát dài hạn[3]. Về cơ bản, phương thức hoạt động của hệ thống phụ thuộc vào các hư hỏng trên cấu trúc và nhu cầu của chủ sở hữu. Ví dụ, giám sát ngắn hạn thường được sử dụng nhất để xác định các thông số cấu trúc và đánh giá các biện pháp cải tạo, trong khi các trường hợp được báo cáo trong tài liệu về giám sát định kỳ và giám sát dài hạn thường tập trung vào việc phát hiện hư hỏng hoặc đánh giá sự phát triển của hư hỏng.

3. Các bước đầu tiên để thiết kế SHM tối ưu

Trong phần này, các bước đầu tiên để lập kế hoạch cho một hệ thống SHM tối ưu sẽ được mô tả thông qua trường hợp thực tế tại Nhà thờ São Lourenço. Về cơ bản, trước hết các bước từ phân tích tài liệu, đánh giá hư hỏng cho đến thiết kế hệ thống SHM để triển khai tại Nhà thờ São Lourenço sẽ được trình bày, tiếp theo là phần minh chứng về hoạt động của một hệ thống giám sát dài hạn tối ưu. Cả hai hệ thống này cũng có thể được gọi là hệ thống giám sát từ xa[5].

Nhà thờ São Lourenço, còn được gọi là Nhà thờ Grilos, là một cấu trúc xây dựng bằng đá học (masonry) được xây dựng vào thế kỷ XVII, nằm tại Paço Episcopal thuộc trung tâm thành phố Porto. Nhà thờ có mặt bằng dạng kéo dài, đặc trưng bởi một Gian chính (Central Nave) với ba nhà nguyện đặt ở mỗi bên, một Gian thờ chính (Altar-Mor) và hai Nhà nguyện phụ là Nhà nguyện Nossa Senhora da Purificação và Nhà nguyện Santíssimo, như được trình bày trong Hình 2. Xuyên suốt toàn bộ nhà thờ, có thể nhận thấy sự hiện diện của các dấu ấn kiến trúc dòng Tên (Jesuits), về cơ bản là một loại kiến trúc giáo dục và tôn giáo, mang phong cách Baroque dòng Tên và Tân cổ điển. Ngoài ra, vào năm 1982, Nhà thờ São Lourenço đã được xếp hạng là một phần của Di sản Quốc gia Bồ Đào Nha, và năm 1998, Trung tâm Lịch sử Porto đã được UNESCO công nhận là di sản thế giới. Mặt tiền chính của Nhà thờ São Lourenço có hai tầng, cấu tạo bởi các bức tường liên tục bằng các khối đá lớn, chủ yếu là đá hoa cương (granite), trong khi cửa chính bao gồm hai cột đặt trên bệ đỡ. Ở hai bên mặt tiền chính là hai cửa phụ với các trán tường hình tam giác (triangular pediments). Ở bên trong nhà thờ, một vòm đá hoa cương với các dấu ấn dòng Tên kéo dài dọc theo toàn bộ chiều dài của Gian chính; Gian chính được nối với Gian thờ chính và hai Nhà nguyện phụ bằng một mái vòm (dome). Hình 2.b cho thấy các chi tiết của mặt tiền chính và nội thất của Nhà thờ São Lourenço.

Trong suốt những thập kỷ qua, một số hoạt động can thiệp tại Nhà thờ São Lourenço đã được thực hiện, chủ yếu tập trung vào việc ổn định tòa nhà. Vào năm 2008, việc quan sát thấy các vết nứt ở phía ngoài nhà thờ (khu vực cầu thang) đã thúc đẩy việc áp dụng các biện pháp cải tạo. Tuy nhiên, trong giai đoạn 1994-1997, một đợt giám sát ngắn hạn đã được thực hiện bởi LNEC nhằm thu thập dữ liệu về tính hiệu quả (hoặc không) của các biện pháp cải tạo cấu trúc[4]. Các kết quả giám sát do đội ngũ LNEC thu thập tập trung vào việc đo đạc các chuyển vị tuyến tính của các vết nứt trên tường và chân móng, với độ mở vết nứt tối đa ghi nhận



Hình 2: Cái nhìn tổng thể về Nhà thờ São Lourenço: a) Sơ đồ mặt bằng; b) Mặt đứng chính; c) Chi tiết các bức tường xây và khu vực các nhà nguyện phụ; d) Chi tiết mái vòm và e) Chi tiết các vòm đá granite dọc theo Gian chính (Nave).

được là 0,8 mm. Tuy nhiên, các quy trình giám sát đã không tính đến ảnh hưởng của nhiệt độ đối với cơ chế đóng-mở của vết nứt. Cuối cùng, vào năm 2010, một báo cáo chính thức của Bộ Di sản Văn hóa Nhà thờ São Lourenço đã cảnh báo về 'những hư hỏng cấu trúc nghiêm trọng được quan sát thấy tại nhà thờ và nhu cầu thực tế phải tiến hành can thiệp khẩn cấp.

Trong những năm gần đây, người ta đã quan sát thấy sự tiến triển của các vết nứt và chuyển vị cấu trúc, chủ yếu ở phía bên trái của nhà thờ. Do đó, một đợt kiểm tra tập trung vào việc lập bản đồ hư hỏng đã được thực hiện ở cả khu vực bên ngoài và bên trong nhà thờ. Từ những thông tin thu thập được trong quá trình phân tích tài liệu và kiểm tra trực quan, có thể thiết lập một khung tổng thể về cơ chế hư hỏng tại Nhà thờ São Lourenço, như có thể thấy trong Hình 3. Về cơ bản, giả thuyết được đưa ra là sự dịch chuyển của nền đất tại khu vực có đường hầm được xây dựng đã gây ra hiện tượng xoay các thành phần móng và làm dịch chuyển các bức tường ở phía bên trái nhà thờ[1]. Cho đến thời điểm này, vẫn chưa thể biết liệu các dịch chuyển này có bị đẩy nhanh bởi lưu lượng giao thông trong

đường hầm hay đã ổn định, và đó chính là động lực chính cho việc lắp đặt hệ thống SHM tại nhà thờ. Tiếp theo, Hình 4 cho thấy các vết nứt được tìm thấy trong quá trình kiểm tra trực quan tại khu vực bên ngoài nhà thờ, nơi các vết nứt nghiêm trọng nhất được tìm thấy chủ yếu ở phía bên trái.

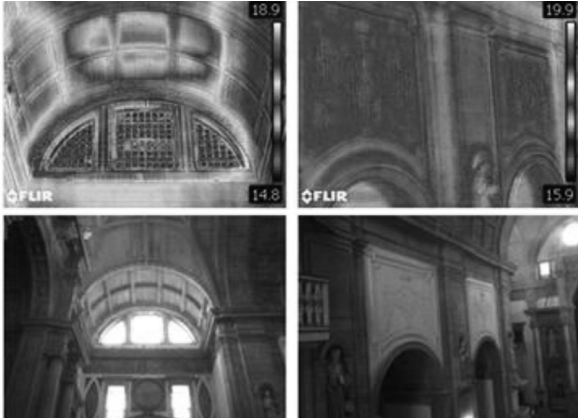


Hình 3: Sơ đồ tổng quát về cơ chế chuyển vị tại Nhà thờ São Lourenço



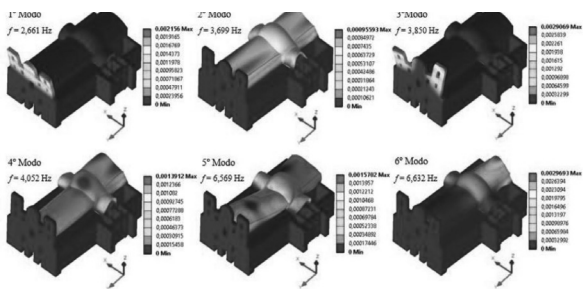
Hình 4: Sự xuất hiện các vết nứt tại khu vực ngoại thất của Nhà thờ São Lourenço

Ngoài ra, trong quá trình kiểm tra trực quan được thực hiện tại Nhà thờ São Lourenço, các hư hỏng ở bên trong nhà thờ đã được xác định; số lượng vết nứt nhiều nhất được tìm thấy chủ yếu ở các vòm của các nhà nguyện bên hông cũng như tại các cột và tường. Như đã chỉ ra ở Hình 3 và Hình 4, khu vực chính chịu ảnh hưởng bởi sự dịch chuyển của nền đất đã gây ra sự xuất hiện của các vết nứt, nơi vị trí của các hư hỏng cho thấy sự xoay của phía bên trái nhà thờ. Tuy nhiên, sự xoay này không chỉ ảnh hưởng đến phía bên trái; một số vết nứt với độ mở nhỏ cũng được tìm thấy tại các vòm của các nhà nguyện nằm ở phía bên phải. Tiếp tục quá trình kiểm tra, một số ảnh chụp hồng ngoại nhiệt (thermographies) cũng đã được ghi lại nhằm xác định sự tồn tại của các vùng ẩm ướt, do sự xuất hiện của một số vùng tối trên tường[6]. Tuy nhiên, kết quả kết luận rằng không có sự hiện diện của độ ẩm tại các bức tường; các vùng tối đó được hiểu là hệ quả của việc đọng ẩm trước khi mái nhà được phục hồi. Các ví dụ về ảnh chụp hồng ngoại nhiệt được ghi lại bên trong nhà thờ có thể được xem tại Hình 5.



Hình 5: Các hình ảnh nhiệt thu thập được bên trong nhà thờ São Lourenço

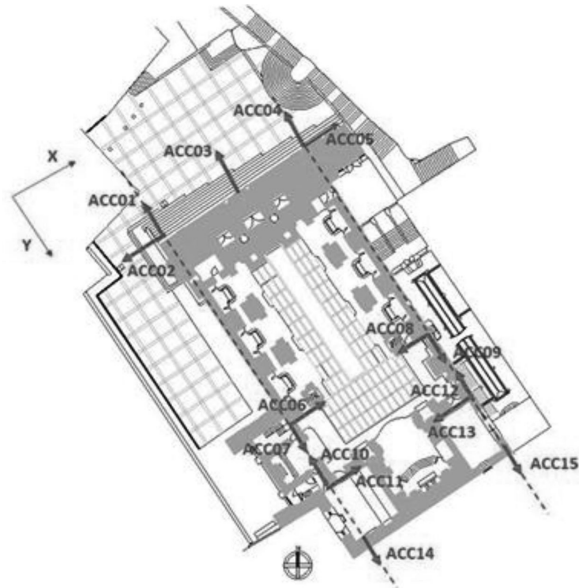
Dựa trên các hư hỏng được xác định qua kiểm tra trực quan và các thông tin thu thập được từ quá trình phân tích tài liệu, một đề xuất hệ thống SHM đã được soạn thảo. Đầu tiên, một mô phỏng số đã được thực hiện nhằm đưa ra một số hướng dẫn về ứng xử động học của nhà thờ, đồng thời cung cấp các thông tin hữu ích cho việc tối ưu hóa hệ thống SHM. Mô hình số ba chiều (3D) được xây dựng trên phần mềm CAD[5], sau đó được xuất sang Ansys® để thực hiện phân tích dao động (modal analysis). Về cơ bản, mô hình này xem xét ba thành phần chính: Mặt tiền, gian chính và mái nhà. Đối với mặt tiền, các giá trị được xem xét bao gồm: mô-đun Young là 20 kN/mm², trọng lượng riêng là 25 kN/m³ và hệ số Poisson là 0,20. Trong khi đó, đối với mái và tường, các giá trị được xem xét lần lượt là 1,5 kN/mm², trọng lượng riêng 22 kN/m³ và hệ số Poisson 0,20. Vùng tiếp xúc giữa các cấu kiện được coi là liên kết chặt (bonded). Kết quả của phân tích dao động được trình bày trong Hình 6, với tần số cơ bản tìm được là 2,661 Hz.



Hình 6: Kết quả phân tích dao động (phân tích modal) của mô hình số

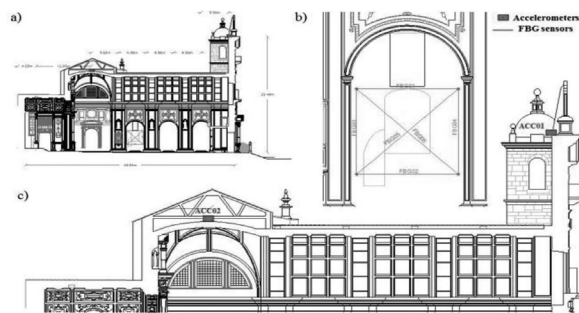
Thật vậy, mô hình số cần phải được hiệu chuẩn bằng các thử nghiệm thực nghiệm, và vì lý do đó, một chiến dịch thực nghiệm đã được đề xuất dựa trên kinh nghiệm của đội ngũ CONSTRUCT-LESE. Sơ đồ các thử nghiệm thực nghiệm để đặc tính hóa động học được trình bày trong Hình 7, nơi 14 máy gia tốc (accelerometers) được đặt dọc theo

hướng dọc của nhà thờ. Về cơ bản, dữ liệu gia tốc sẽ được thu thập theo cả phương ngang và phương dọc, trong đó phần mặt tiền sẽ được lắp đặt 5 trong số 14 máy gia tốc này[3]. Thiết lập thực nghiệm này được chuẩn bị dựa trên kinh nghiệm của đội ngũ CONSTRUCT-LESE và cũng dựa trên các tài liệu khoa học hiện có.

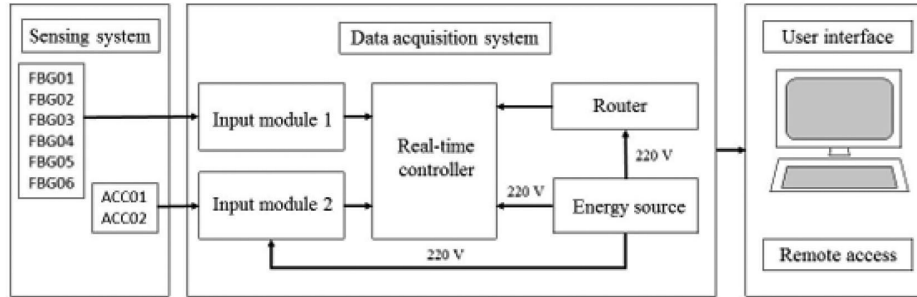


Hình 7: Bố trí các cảm biến trên mặt bằng nhà thờ

Cuối cùng, Hình 8 trình bày hệ thống giám sát dài hạn được đề xuất để triển khai tại Nhà thờ São Lourenço; trong đó Hình 8b. cho thấy cách sắp xếp các cảm biến FBG (Fiber Bragg Grating) và Hình 8c. hiển thị vị trí của hai máy gia tốc quang học. Hệ thống SHM đơn giản hóa này tập trung vào việc đo lường cơ chế đóng-mở của các vết nứt, do các cảm biến FBG có độ chính xác cực cao trong việc đo chuyển vị (đạt mức nanomet-nm), đồng thời dữ liệu từ các máy gia tốc sẽ cung cấp thông tin về những thay đổi trong các thông số dao động của cấu trúc[2]. Chi tiết về hệ thống SHM có khả năng truy cập từ xa được đề xuất cho Nhà thờ São Lourenço được trình bày trong Hình 9, nơi mô tả



Hình 8: Hệ thống SHM được đề xuất triển khai tại Nhà thờ São Lourenço: a) Cái nhìn tổng thể về hệ thống SHM, b) Chi tiết về các cảm biến FBG (sợi quang Bragg) và c) Vị trí lắp đặt của các máy gia tốc kế.



Hình 9: Chi tiết các thành phần của hệ thống SHM được triển khai tại Nhà thờ São Lourenço

các thành phần cấu tạo và sự tương tác giữa chúng.

4. Kết luận

Xét đến sự cần thiết của việc phát triển các công cụ hỗ trợ đánh giá Di sản Văn hóa (HC), bài báo này trình bày một số quy trình tối ưu hóa hệ thống SHM (Giám sát sức khỏe cấu trúc), dựa trên các nghiên cứu điển hình thực tế, cụ thể là Nhà thờ São Lourenço. Quy trình được mô tả trong bài báo này đưa ra một sơ đồ làm việc đơn giản hóa cần được điều chỉnh cho phù hợp với thực tế của đối tượng di sản được đánh giá, đồng thời đóng góp quan trọng cho việc đánh giá di sản, có thể sử dụng như một công cụ trong quá trình lập kế hoạch. Để độc giả dễ hiểu hơn, phương pháp nghiên cứu được tiếp cận theo hai bước: bước đầu tiên liên quan đến các giai đoạn đánh giá ban đầu (từ phân tích tài liệu đến đề xuất hệ thống SHM), trong khi phần thứ hai của nghiên cứu tập trung vào hệ thống SHM đang hoạt động.

Đối với hệ thống SHM đề xuất cho Nhà thờ São Lourenço, việc phân tích tài liệu và kiểm tra trực quan đã cho phép thu thập các thông tin liên quan về kịch bản hư hại, trong khi các ghi chép nhiệt ảnh (thermography) đã giúp làm rõ sự không tồn tại của các vùng ẩm ướt bên trong nhà thờ. Tiếp theo, các thông tin về hình học đã cho phép xây dựng mô hình số và mô phỏng các dạng dao động đầu tiên, cung cấp các thông tin hữu ích sớm cho việc lập kế hoạch đặc tính hóa động lực học. Việc đặc tính hóa động lực học là cần thiết do sự thiếu hụt thông tin về loại cấu trúc này trong các tài liệu khoa học, đồng thời cũng là cách để thu thập thông tin tin cậy về hành vi cấu trúc của nhà thờ, phục vụ cho việc cập nhật mô hình số (numerical model updating). Ngoài ra, các dạng dao động đã giúp xác định các điểm cần đặt máy gia tốc kế để tối ưu hóa việc thu thập dữ liệu. □

Tài liệu tham khảo

- [1] ABRUZZESE, D. et al. Monitoring and vibration risk assessment in cultural heritage via Wireless Sensors Network. 2009 2nd Conference on Human System

- Interactions, p. 568-573, maio 2009.
 [2] ANTUNES, P. et al. Liquid level gauge based in plastic optical fiber. *Measurement*, v. 66, p. 238-243, abr. 2015..
 [3] BALSAMO, D. et al. Long term, low cost, passive environmental monitoring of heritage buildings for energy efficiency retrofitting. 2013 IEEE Workshop on Environmental Energy and Structural Monitoring Systems, p. 1-6, set. 2013.
 [4] COSTA, A. et al. Reabilitação estrutural: casos práticos de intervenção em estruturas patrimoniais. 1. ed. Porto: Universidade do Porto, 2014.
 [5] FRASER, M. et al. Sensor Network for Structural Health Monitoring of a Highway Bridge. *JOURNAL OF COMPUTING IN CIVIL ENGINEERING*, n. February, p. 11-24, 2010.